



УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ

25 ЛЕТ

Юбилейный сборник трудов
ООО «НПЦ «ЭХО+»

Москва; Санкт-Петербург
Издательство «СВЕН»
2015

Ультразвуковая дефектометрия — 25 лет. Бюллетенный сборник трудов ООО «НПЦ «ЭХО+». — Москва, Санкт-Петербург: Свен, 2015. — 140 с.

В сборник включены наиболее интересные работы, выполненные коллективом «НПЦ «ЭХО+» за последние годы. Одновременно с развитием и использованием автоматизированных ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных, представлены работы посвященные исследованию, разработке и применению приборов с фазированными антенными решетками. Описана новая электроника, сканирующие системы, алгоритмы улучшения качества изображений. Рассмотрены основные принципы построения методик контроля с использованием таких систем. Исследован вопрос о соотношении радиографии и ультразвука в неразрушающем контроле. Показано, что когерентный АУЗК в ряде случаев дает результаты не хуже, а в комплексе лучшие, чем радиография. Приведен опыт применения программы компьютерного моделирования задач УЗК «CIVA» для разработки методик ультразвукового контроля.

Под ред. А.Х. Вовилкина

А. Х. Вopilкин

A. Kh. Vopilkin

Введение

Introduction

2 апреля 2015 года компания НПЦ «ЭХО+» отмечает свой 25-летний юбилей. Каждый 5-летний юбилей мы стараемся ознаменовать новыми достижениями, разработками, публикациями. В 20-летний юбилей мы опубликовали сборник наших статей, состоящий из 13 публикаций, в которых изложили наиболее интересные, на наш взгляд результаты работ. В те годы основное направление наших разработок касалось применения ультразвуковых когерентных (голографических) методов автоматизированного контроля. Эта технология сразу же нашла свое место в диагностике объектов повышенной опасности, прежде всего в атомной энергетике. С помощью разработанных методик и систем решены многие задачи диагностики сварных соединений сложнейшей конфигурации, ранее, как правило, не контролировавшихся вовсе. Эта технология и системы и сегодня достаточно широко используется в различных отраслях, обеспечивая мониторинг за развитием эксплуатационных дефектов. Но наука не стоит на месте. Еще 8 лет назад мы начали осваивать технологию контроля с применением приборов с фазированными антенными решетками (ФАР). За рубежом это направление начало развиваться лет 15 назад и стало весьма модным. Но, проанализировав преимущества и недостатки традиционных технологий, основанных на ФАР, обнаружили, что эта технология далека от совершенства, ей присущи ряд принципиальных недостатков. Поэтому наши ученые пошли несколько другим путем, хотя и основанным на тех же антенных решетках, названного «Цифровая фокусировка антенны» (ЦФА). За пять лет, прошедших с момента предыдущего нашего юбилея очень много сделано в этом направлении, по сути создана новая технология и оборудование, использующие ЦФА. Данный сборник практически целиком состоит из нового материала разработок и исследований этого направления. А сделано действительно много. Это и новые алгоритмы, позволяющие очистить изображение контролируемой области от «фантомов» и обеспечивающих равно-



мерную чувствительность по глубине на больших толщинах. Это и новая электроника и ряд сканеров, перекрывающих большой диапазон диаметров и толщин. Это и аттестованные методики, по которым сегодня ведется контроль наиболее ответственных объектов. Несмотря на короткий промежуток времени, прошедший с момента начала работ, первое же внедрение показало высокую эффективность этого направления.

В сборник вошли две оригинальные статьи, одна из которых называется: «Радиография или ультразвук, что лучше». В ней мы впервые показали, показали, что когерентный АУЗК в ряде случаев дает результаты не хуже, а в комплексе лучшие, чем радиография. Вторая статья касается нашего опыта применения программы «ШИВА» компьютерного моделирования задач УЗК. С ее помощью у нас разрабатываются все методики контроля.

Мне бы хотелось, чтобы каждый читатель, который возьмет в руки этот сборник статей, нашел бы для себя что-то новое, чего он раньше не знал, может быть нашел бы решение своей не решенной проблемы, проникся бы перспективностью этого направления диагностики. Отмечу также, что приведенными в сборнике исследованиями не закрывается это направление. В нем еще огромный пласт не решенных задач. Надеюсь, что к следующему нашему юбилею мы продолжим публиковать материалы на эту тему.

Без истории нет будущего

(страницы жизни и развития НПЦ «ЭХО+» за 25 лет глазами Вовилкина)

Without history there is no future

(Pages of Life and Development SPC "ECHO +" for 25 years through the eyes of A. Kh.Vopilkin)

Близится юбилей компании ООО «НПЦ «ЭХО+» — 25 лет. Много это или мало? В масштабе вселенной — это миг, для вновь образованной компании — это жизнь целого поколения. Кто-то из классиков сказал «Не дай вам бог жить в эпоху перемен». Именно на это время пришелся период создания, становления и развития ЭХО+.

1. Первые шаги

Как все начиналось? До регистрации компании, а это событие было 2 апреля 1990 года, я уже имел 22 года стажа в НПО ЦНИИТМАШ после окончания Московского горного института. Прошел большую школу специалиста по ультразвуковому контролю от м.н.с. до завлаба, защитил кандидатскую и докторскую диссертации, два года стажировался на заводе «Шкода» (Чехословакия), выпускавшим оборудование для реакторных установок. Моими учителями были ученые с мировым именем: профессора Ермолов Игорь Николаевич, под руководством которого я проработал все годы в ЦНИИТМАШ, Гурвич Анатолий Константинович, многие ведущие специалисты ЦНИИТМАШ. В общем набрался опыта (теоретического, практического, организационного). На этот период пришелся небывалый подъем творческой и предпринимательской деятельности активных людей, связанный с Горбачевской перестройкой, ускорением, гласностью. Начали создаваться малые предприятия, кооперативы, НТТМ. В жестких тисках госпредприятий многим стало тесно работать, захотелось свободы, почувствовать на что ты способен. По предложению и активном участии моего друга и соратника, зав кафедрой Бауманки, академика РАН Алешина Николая Павловича я уволился из НПО ЦНИИТМАШ, начал работать в зарегистрированной мной компании ЭХО+. Поскольку ничем другим, кроме неразрушающего контроля (НК), я не умел заниматься, естественно, тематика работы компании должна была быть тесно связана с моей профессией.

Предварительно провел детальный анализ проблем, существующих в ультразвуковом нераз-

рушающем контроле (УЗНК). Пожалуй, главной проблемой этого метода является невозможность визуализировать дефекты и описать истинные параметры (длину, высоту, тип). Дело в том, что вследствие расходящегося ультразвукового пучка лучей, излученных преобразователем, разрешающая способность (минимальное расстояние между двумя отражателями, при котором сигналы разделяются) ухудшается с увеличением расстояния до дефекта. В результате не представляется возможность увидеть образ реального дефекта и измерить его параметры. Над решением этой проблемы работали многие ученые, в том числе и я. Моя кандидатская и докторская диссертации были посвящены повышению информативности контроля. Однако все эти технологии позволяли лишь несколько улучшить качество контроля, но не решали кардинально проблему. Ведь именно знание типа дефекта и его размеры являются определяющим при оценке работоспособности и эксплуатационной надежности конструкции. Это особенно актуально в атомной энергетике знание об истинных параметрах дефектов, скорости их роста. Задача эта очень актуальна для всех отраслей, где эксплуатируются объекты повышенной опасности.

Поэтому тематика работы компании была определена как разработка, производство и эксплуатация автоматизированных комплексов для УЗК с высокой разрешающей способностью, с визуализацией и измерением параметров дефектов. На нашу радость к этому времени уже в течение нескольких лет над этой проблемой работала группа ученых в Акустическом институте АН СССР под руководством к.ф.-м.н В.Г. Бадаляна, которая проработала научные основы ультразвукового голографического метода АУЗК с высокой разрешающей способностью. В основе этого метода лежит излучение УЗ волн преобразователем с широким углом раскрытия (30–60°), сканирование с мелким шагом (0,2–0,5 мм), прием и оцифровка всех сигналов, неважно от чего отраженных, и когерентное сложение этих сигналов. В результате достигается узкий, слабо рас-

ходящийся луч с фокальным пятном 1–1,5 мм. Такая технология и обеспечивает высокую разрешающую способность и, как следствие, возможность визуализировать дефекты и измерять их размеры.

С Бадалянм я был давно знаком, и когда я предложил ему перейти во вновь образованную компанию, он согласился, при этом, удалось сагитировать еще целую группу молодых, талантливых специалистов — цвет Акустического института. В их числе, Е.Г. Базулин, ставший с годами главным теоретиком и алгоритмистом новых методик, подготовил к защите докторскую диссертацию, Д.С. Тихонов профессионально выросший до зам генерального директора, защитивший кандидатскую диссертацию. А.М. Штерн, возглавивший отдел информационных технологий, А.В. Ломакин, сочетавший в себе и электроника, и программиста, и организатора процесса разработки, Е.А. Рубен, инженер-электроник (на нем держится вся аналоговая часть всех наших систем), М.В. Пентюк вначале инженер-электроник, в настоящее время зам. главного бухгалтера и С.М. Каплун, вначале — инженер электроник, в настоящее время — аудитор, консультант по юридическим и экономическим вопросам. Бадалян все эти годы по сегодняшний день работает моим замом по науке. В 2006 году защитил докторскую диссертацию.

Но все эти перемещения и должности будут потом, а вначале у нас не было ровным счетом ничего, ни помещения, ни оборудования, ни комплектующих, ни финансовой базы, только голый энтузиазм, граничащий с самопожертвованием. По прошествии многих лет начинаешь понимать, сколь авантюрная была идея: на голом месте, не имея ничего, создавать компанию, жертвовать не только своим благополучием, но и благополучием людей, которых я пригласил. Но об этом тогда никто не задумывался. Правда, кое-что на начальном этапе удалось организовать. День рождения 2 апреля 1990 года связан с двумя датами. Во-первых, это первый рабочий день единственного сотрудника Вopilкина, остальные подтягивались в течение 2–3 месяцев. Во-вторых, это дата подписания первого хозяйственного договора с НИКИЭТ, который удалось убедить в перспективности выбранного направления. НИКИЭТ еще несколько лет продолжал финансировать разработки. За что ему, в лице Б.П. Стрелкова, большое спасибо. На первые денежные поступления удалось приобрести 5 компьютеров 286, доставляли с милицейской охраной. Еще бы, время было тревожное, а каждый компьютер стоил как авто Жигули.

На первое время нас приютила ассоциация «Импекс-сервис», которая выделила нам сначала

комнату на Трифононской, а затем целую трехкомнатную квартиру, не где-нибудь, а в доме на набережной — Серафимовича, 2, с большим балконом и с видом на Кремль. Энтузиазм и романтика творчества были столь велики, что за первые полгода мы сделали макет первой в истории России, да и мира, голографической автоматизированной системы. Первый сканер для нас изготовил Вниинк (Кишинев). На этом макете мы получили первое изображение дефектов в образцах, которые мне удалось изготовить в ЦНИИТМАШ, в последний год до увольнения. На этих образцах мы до сих пор время от времени проводим эксперименты. Потом был второй макет, наш переезд в актовом зал института медицинского строительства на Солянке, 7. Здесь мы разработали первый опытный образец системы «Авгур 1.2». Кстати, название «Авгур» (предложил Бадалян) в древнем Риме означало касту римских жрецов, которые по полету и поведению птиц предсказывали будущее. Очень созвучно с тем, чем мы занимаемся. Это название наших систем стало нашим брендом и товарным знаком. В системе «Авгур 1.2» мы уже тогда применили оптоволоконную 300 метровую линию связи, которая обеспечивала передачу сигналов от сканера к компьютеру на большое расстояние. Первые испытания прошли в мае 1992 года на ЛАЭС, которые показали правильность технических решений, но в то же время выявили ряд принципиальных недостатков, которые мы еще долго устраняли.

Времена в те годы были довольно тяжелые. Останавливались предприятия, сокращалось производство, инфляция достигала десятков процентов в месяц. Промышленные предприятия превращались в торговые, становилось все труднее выживать. Тем не менее, каким-то чудом мы не только выживали, но и активно развивались, создавали все новые поколения Авгуров. Доходы часто не покрывали расходы, иногда нечем было платить зарплату, часто выручал случай. Например, как-то утром приезжаю на работу, а у нас потоп, воды по колено, компьютеры, приборы плавают в воде. Мы были в панике, надо сдавать заказчику систему, а тут все промокло, все пропало. Оказалось, что над нами арендовала помещение инофирма, у нее прорвало трубу, и всю ночь вода лилась на нашу технику. За причиненный ущерб они нам заплатили 5000 долларов, а эти деньги мы умудрились в течение полугодика платить зарплату всему коллективу 15 человек. Сегодня это зарплата двух квалифицированных сотрудников в месяц. Такова инфляция за 25 прошедших лет (более 3000%).

Приведу еще один случай, который помог нам развиваться в течение нескольких лет. Кто-то мне

дал телефон эксперта госкомитета по науке и технике (ГКНТ) Цоя Виктора Николаевича. Я позвонил ему, представился, рассказал, чем занимается компания, он пригласил на встречу. В течение часа я рассказал ему о некоторых результатах нашей работы. Он, не говоря ни слова, вышел из кабинета и через некоторое время привел начальника департамента ГКНТ Бойко Владимира Васильевича. Я снова повторил весь рассказ о наших работах. Теперь уже он ушел и через полчаса вернулся в сопровождении зам. председателя ГКНТ академика РАН Фортова Владимира Евгеньевича (сейчас он президент РАН). Я в третий раз повторил свой рассказ. Он, видимо, также заинтересовался тематикой и результатами и спросил какая помощь нужна. Я естественно сказал, что нам не хватает финансирования. Поскольку оказалось, что Фортов по совместительству руководит Фондом Технологического Развития при ГКНТ, то он предложил подать документы в фонд для финансирования проекта. Через пару месяцев мы имели приличное финансирование для продолжения наших разработок. Так волей судьбы за полдня мне удалось достичь того, на что иногда уходят годы. Наш Авгур понравился специалистам ГКНТ, и нас стали включать делегации от России на международные выставки. В период 1994–1997 годы мы посетили с экспонатами Германию (Цебит и Индастри), Японию, Австрию, Норвегию, Иран, Испанию.

2. Курчатовский институт

В 1993 году закончилась аренда на Солянке и нам надо было искать другое пристанище. В это время я познакомился с директором Центра новых технологий (Ценотех) Ивановым Вадимом Геннадьевичем, располагавшимся и существовавшим в составе Курчатовского института. Ценотех был организован и патронировался Адамовым Евгением Олеговичем, в те годы был главным инженером Курчатовского института, затем к моменту нашего знакомства — директором Никит, а позднее Министром атомной энергии РФ. Ценотех специализировался на создании робототехники, но к моменту нашей встречи испытывал кризис жанра, проектов не было, хороший коллектив распался. Объединение наших тематик должно было влить в Ценотех новую живую струю. Так, поначалу, оно и было. В Ценотехе были хорошие конструктора, свое производство, монтажники и другие специалисты. За полгода нам удалось создать следующую модификацию системы Авгур 4.2, в котором применялся электронный блок на лаптопе, и с которым мы спустя некоторое время начали производственно-коммерческую деятельность. С моей

подачи и благодаря энтузиазму, сверхактивности Иванова мы решили заняться серийным производством датчиков для УЗК, в кратчайшие сроки разработали линейку датчиков, которые могли конкурировать с импортными, даже разработали и выпустили каталог датчиков. Но этому проекту не суждено было реализоваться. Последующая цепь негативных событий привела к кардинальной перестройке компании ЭХО+. Заканчивался 1995, начинался 1996 год. Финансовый кризис в стране ударил и по нашему тандему Ценотех-ЭХО+. Начались задержки зарплаты. И народ начал искать лучшей доли, увольняться. Первым уволился Базулин Женя, правда, по причине нежелания работать с Ивановым, который в нем вызывал ужас работодателя. Затем Ломакин, Штерн, Каплун, Марина Пентюк. Конечно, мы оставшиеся остро переживали потерю единомышленников. К тому же Иванов собрал свой коллектив и объявил, что он распускает свой коллектив. Предложил мне поступить также. Добил нас еще один случай. Наметилось наконец финансирование одного нашего проекта через Курчатовский институт на сумму 3 млрд. руб. (в то время были такие деньги, зарплата составляла сотни тысяч руб.). Но выдали эти деньги в виде векселей. Стояла задача превратить их в реальные деньги. Руководство Курчатовского института к нашим трем добавило еще 4 млрд. векселей и попросило Иванова одним пулом продать эти векселя. Я в то время был председателем ревизионной комиссии ЭЛБИМ банка и договорился с управляющим о покупке этих векселей банком. Но Иванов, не посоветовавшись ни с кем, разместил эти векселя в другой маленький банк, который на следующий день исчез вместе с векселями, тем самым подставил Курчатник. Тут же Ценотех был расформирован, а нам закрыли пропуск и мы лишились аренды. Спас нас Адамов, который по моей просьбе обратился к директору Курчатника и нам вернули пропуск, учитывая, что мы ни в чем не виноваты. И волей случая, хотя мы потеряли большие деньги, но приобрели помещения, которые занимал Ценотех, и в ЭХО+ влились остатки коллектива. Но нам было уже не до производства датчиков. К этому направлению деятельности проявил большой интерес бывший главный инженер Ценотех Курочкин Александр Сергеевич. Он-то и уговорил меня выделить это направление в отдельную, вновь созданную компанию ЭХО-импульс. Я многое сделал для ее становления, передал помещение, оборудование, познакомил с заказчиками, консультировал, несколько сотрудников перешли в эту компанию. Мы договорились, что ЭХО-импульс будет выполнять заказы на датчики и для нас. Поначалу так все

и шло. Но со временем отношения стали напрягаться, мы перестали заказывать датчики и через некоторое время вновь у себя организовали производство датчиков для наших потребностей. Спустя время я понял, что это была моя большая ошибка, не надо было отдавать это направление на сторону, в чужие руки. Производство датчиков это высокоинтеллектуальный доходный бизнес.

Для того, чтобы финансово поддержать коллектив, я пошел на рискованный шаг, в 1996 году продал свою 3-х комнатную квартиру с Строгино, сам с семьей переселился в недостроенный загородный дом. Надо сказать, что риск оказался оправданным, помог нам перестроить нашу политику с упором на зарабатывание денег, и через 6 месяцев дела начали налаживаться, а через 1,5 года я смог вернуть вложенные деньги, и достроить дом.

3. Начало практического контроля

К концу 1996 года мы были практически полностью готовы для начала работ по внедрению наших разработок на промышленно опасных объектах. Была система Авгур 4.2, был метрологический сертификат на нее, изготовлено несколько комплектов. Первая попытка была предпринята на Смоленской АЭС. Я позвонил директору Сафрыгину Евгению Михайловичу, на удивление он сам взял трубку, я представился, рассказал о наших разработках. Уже на следующий день мы были у него в кабинете и прямо на его столе демонстрировали систему Авгур 4.2. Он так проникся результатом демонстрации, что тут же вызвал начальника лаборатории металлов и приказал ему заключить договор на контроль сварных швов главного циркуляционного трубопровода. Это был первый реальный контракт на применение новой технологии и аппаратуры с визуализацией и измерением реальных размеров дефектов. Сафрыгин посетовал на то, что такой технологии не было 10 лет назад, когда пускался 3 энергоблок. Тогда из-за отсутствия возможности измерять дефекты, пришлось провести огромное количество ненужных ремонтов, чтобы удовлетворить устаревшим нормативным документам.

Такая же ситуация повторилась через несколько дней на Ленинградской АЭС. Мы встретились с главным инженером Лебедевым Валерием Ивановичем, продемонстрировали систему и сразу же получили добро на договора. С этого момента началась новая страница жизни ЭХО+. Ушло целых 6 лет на исследования и разработку нового направления — ультразвуковая дефектометрия, которое с годами все более глубоко проникало сначала в атомную энергетику, а потом и в другие отрасли.

Почему именно в атомную энергетику пошло проникновение ультразвуковой когерентной дефектометрии? Дело в том, что когда мы только создавали компанию, уже было понимание, что при эксплуатационном контроле нормы браковки, основанные на эквивалентных и условных размерах, не дают ответ на вопрос: что за дефект, насколько он опасен, возможна ли эксплуатация объекта с дефектами различного типа. В то же время специалисты по прочности давно доказали, что нормы на эксплуатационный контроль должны быть значительно мягче, чем при производстве. Знание типа и размеров дефектов позволяет повысить безопасность эксплуатации АЭС, существенно сократить объем ненужного ремонта, соответственно сократить потери от незапланированного простоя энергоблока (потери за одни сутки не выработки электроэнергии составляют 1 млн. евро).

Только мы начали вставать на ноги, пошли договора на контроль, поставки систем, началась другая напасть — кризис не платежей по всей России. Начались бартерные схемы, обмены одного товара на другой. Выстраивались длинные цепочки превращения товара в живые деньги. Одна из многочисленных схем, по которой мы получали деньги, выглядела следующим образом. Станция расплачивалась с нами за проведенные работы электроэнергией, мы передавали ее на завод, выпускающий фенол. Последний поступал на мебельные фабрики. Мебель, изготовленная на этих фабриках, реализовывалась, и только после этого мы получали деньги. Поступление денег растягивалось на полгода и больше, потери из-за большого количества посредников доходили до 50%. Были и более удачные бартеры. По одной из цепочек мы получили первые два автомобиля Жигули, на которых мы ездили на контроль. За наличные деньги купить в то время было очень сложно.

Начиная с 1999 года, бартер постепенно стал уступать место вексельным расчетам. Но тоже в извращенной форме. Станции рассчитывались векселями, денежное наполнение которых составляло 30–35%. Это векселя ликвидных компаний, остальные 65–70% — векселя, по которым никогда, ни при каких обстоятельствах деньги получить было невозможно. В такой финансовой разрухе мы жили вплоть до 2002 года, когда рынок стал более цивилизованным, и пошли нормальные расчеты по договорам. Были случаи и 100% потерь по этим вексельным схемам. На этот период пришлось строительство и пуск первого энергоблока Ростовской АЭС (впоследствии переименованной в Волгодонскую АЭС). Первым директором тогда был В.П. Погорелый, высокий профессионал, потряса-

ющий организатор. На ведение строительства ему, как и всем, выдавали не обеспеченные векселя. Остается большой загадкой, как ему удалось завершить строительство и в 2000 году пустить блок. Вскоре после пуска блока его по какой-то причине отстранили от руководства, он не пережил этой несправедливости и вскорости умер. Эхо+ был одним из основных подрядчиков по входному и предпусковому контролю оборудования. С нами станция рассчиталась векселями на сумму 10 миллионов рублей. В это время вокруг станции крутилось много аферистов, обещавших превратить векселя в деньги. На одну из таких фирм напоролись и мы. В результате ни денег, ни векселей. Арбитражные суды в те годы подобные дела не рассматривали. После удачного по качеству, но не удачного по доходам входного и предэксплуатационного контроля на РАЭС, мы успешно осуществляли подобный контроль на пусковых 2-м и 3-м блоках ВдАЭС и 3-м и 4-м энергоблоках Калининской АЭС.

Как я уже отмечал, коммерческая деятельность началась в 1996 году. До этого, правда, мы продавали систему калибровки Авгур 2.4, затем Авгур 4.4, удачно отпочковавшаяся от основной системы Авгур 4.2. Она оказалась очень удобной для калибровки пьезодатчиков. В системе измеряются 10 параметров за 1 минуту, включая диаграмму направленности и расчет АРД диаграммы. За все время мы реализовали около 20 комплектов систем калибровки. Большая часть из них используется на предприятиях РЖД. На основе этой разработки Базулин Андрей успешно защитил кандидатскую диссертацию. Начались работы на станциях с реакторами РБМК (ЛАЭС, СМАЭС, КУАЭС.) Вначале это были сварные швы главного циркуляционного трубопровода диаметром 870 мм. Уже в первые годы применения голографического контроля, удалось снизить более, чем в два раза объем ремонта, благодаря тому, что появилась возможность классифицировать выявляемые дефекты на опасные и не опасные, которые не влияют на работу объекта. А таких дефектов большинство, как правило, они образовались еще на стадии изготовления оборудования и в течение всего срока эксплуатации не развивались.

Еще один показательный пример эффективности применения голографической технологии контроля. На этих типах реакторов имеются большое количество сварных соединений диаметром 325 мм (примерно 1700 на каждом блоке). Причем все эти швы аустенитные, а контроль таких швов отсутствовал, из-за крупнозернистой структуры. В то же время в процессе эксплуатации энергоблока в них встречаются случаи образования и роста

трещин с внутренней поверхности. В 1996 году на одном из блоков стали наблюдаться случаи выхода из строя этих швов по трещинам. Вследствие отсутствия контроля и картины дефектности швов, пришлось ремонтировать практически все швы, блок простоял в ремонте целый год. Поэтому, когда мы предложили нашу технологию выявления трещин и измерения их размеров, к ней сразу был проявлен большой интерес, и, начиная с 1997 года, начался масштабный контроль этих швов на всех станциях. Причем, базируясь на наших данных контроля и периодического мониторинга, специалисты по прочности создали эксплуатационные нормы оценки дефектов, в которых впервые допускаются сварные швы с трещинами. Зная скорость их роста, в каждый ремонтный период появилась возможность заранее планировать ремонт небольшого количества тех швов, в которых трещины достигли критического значения. Экономический эффект от внедрения новых технологий в атомной энергетике не принято подсчитывать, но можно с уверенностью сказать, что он составляет многие сотни миллионов рублей. Сегодня все сварные соединения этого типа подвергаются постоянному мониторингу нашими системами Авгур. На сленге станций — «проавгурить». На сегодня «проавгурено» более 60000 сварных соединений.

Экономический дефолт 1998 года мы прошли более спокойно, чем вся страна, поскольку денежными капиталами мы не обросли, девальвация рубля по нам не сильно ударила, разве что подорожали импортные комплектующие. Зато нам удалось продать две системы за границу, одну в Латвию в компанию Латространс, другую в Финляндию, в известную компанию» VTT Manufacturing», которая занимается эксплуатацией финских и европейских АЭС. Это были первые продажи наших разработок за рубеж.

1999 год ознаменовался началом цикла работ, связанных с участием России в грандиозном международном проекте: создание исследовательского термоядерного реактора (ИТЕР). 20 ведущих стран мира объединили силы и средства и начали сначала поисковые работы, затем пошли разработки, а сегодня этот проект начал реализовываться на практике. Во Франции в местечке Кадараше полным ходом идет строительство фантастически сложного объекта, каким является первый в истории планеты Земля, термоядерного реактора, призванного в будущем, прийти на смену атомной энергетике. От России головным институтом назначен С. Петербургский институт электрофизической аппаратуры им. Ефремова (НиИЭФА). Нам было поручено создание технологии и аппаратуры

для АУЗК аустенитных сварных соединений корпуса реактора. За базу была взята система Авгур 4.2., созданы специальные сканеры, обеспечивающие сканирование по сложному профилю внутренней поверхности. Система должна была сопрягаться с американским роботом, задача которого доставлять сканер в нужную зону контроля. Испытания проводились в Японии в национальном ядерном центре, признаны успешными, и наша технология была включена в документацию по строительству реактора. Наше сотрудничество с Нииэфа продолжается на новом витке и сегодня. Мы разрабатываем методики и оборудование для контроля элементов дивертора очень сложной конструкции. Представьте себе, на изделии, толщиной 7 мм расположено 3 типа разнородных сварных соединений. Здесь мы уже перешли на применение систем с использованием антенных решеток, о которых речь пойдет позднее.

4. Новое поколение Авгуров

В 2003 году были проведены приемочные испытания системы Авгур 5.2, пришедшей на смену Авгур 4.2. и на десятилетие определившей все наши внедренческие работы. С началом использования Авгур 5.2 началось наше активное вхождение в тематику контроля сварных соединений реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Здесь оказалось не паханое поле задач и проблем. На многих швах контроля вообще никакого не существовало. Лишь для некоторых швов действовали ручные методики. Швы эти оказались не простые, как правило, аустенитные, большой толщины, многие из них разнородные, ограниченные поверхности ввода ультразвука, к тому же криволинейные. До нашего участия в этих работах, такие швы считались не контролепригодными. Первый же контроль разнородных соединений на реакторе ВВЭР 440, отработавший 30 лет, показал наличие огромной трещины, высотой 2/3 толщины шва и длиной в половину периметра. Станционные работники не хотели верить, что такое возможно, долго не принимали решение о ремонте, но когда вскрыли шов, и провели металлографические исследования, и все подтвердилось, доверие станций к нашим разработкам возросло многократно. Вообще ситуацию недоверия к результатам разработок и контроля мы проходили многократно, особенно в начале, и каждый раз приходилось доказывать достоверность путем вскрытия и металлографии.

За период с 2003 по 2013 годы нами разработано порядка 15 методик, охватывающие основные сварные соединения реакторов ВВЭР. Почему так много методик? Дело в том, что в атомной отрасли существует непреложное правило: не допускают до

контроля новым оборудованием, если нет аттестованной методики применительно именно к данному конкретному шву, а оборудование не прошло сертификацию в Госстандарте. Недопустимо использование универсальных методик, слишком большое значение придается качеству контроля каждого шва. Причем при каждой аттестации новой методики требуется проводить испытания на образцах с искусственными и реалистичными дефектами. Изготовление образцов — это также забота и головная боль разработчика. В развитых странах существуют специализированные независимые валидационные центры, оснащенные парками образцов на все случаи жизни. Им передаются методики и оборудование, и они проводят экспертизу и выдают сертификат о возможности применения. К сожалению, у нас ничего подобного нет, сам разработчик «и кузнец, и жнец, и на трубе игрец».

В начале 2000 годов в ЭХО+ был создан отдел неразрушающего контроля, который оснащался нашими разработками, методиками, обученными кадрами. Начался массовый контроль практически на всех станциях в периоды ППР. Это оказалось очень существенной статьей доходов в бюджете компании. В разные годы эта статья доходов составляла от 30 до 60% в балансе. Кроме того, наши специалисты, осваивая новую технику, стали лучшими экспертами, давая рекомендации разработчикам по улучшению оборудования.

5. Последствия автоаварии

В 2001 году ЦТД «Диаскан», входящий в состав компании «Транснефть», предложил нам включиться в разработку ультразвукового внутритрубного дефектоскопа для контроля магистральных нефтепроводов. До этого они применяли импортные очень дорогие снаряды-дефектоскопы. Решили производить свои дефектоскопы. Хотя это не наша тематика, появился соблазн расширить сферу нашего влияния на диагностику нефтепроводов. К тому же разработка хорошо оплачивалась. За два года такая разработка была выполнена, дефектоскоп прошел все испытания, принят в эксплуатацию и началось его тиражирование. Учитывая положительный опыт его создания, Диаскан предложил взяться за следующую разработку, создание другого типа дефектоскопа, а именно магнитного. Хотя эта технология выходила за рамки нашей сферы деятельности, мы в содружестве с компанией «Интрон плюс» взяли за разработку. Через несколько месяцев произошло событие, поставившее под угрозу само существование ЭХО+. 24.02.2003 года с двумя ведущими разработчиками (не из ЭХО+) поехали в Диаскан (Луховицы) на сдачу очередного

этапа по этому проекту. Так случилось, что мы попали в очень серьезную аварию (лобовое столкновение с пьяным водителем, который через несколько дней скончался в больнице). Я очень сильно пострадал, чудом выжил, коллеги тоже пострадали, но без угрозы для жизни. На реабилитацию у меня ушло 6 месяцев, работы по этой причине встали. Диаскан, подождав 2 месяца, не счел случившееся за форс-мажор, разорвал с нами договор, и заставил вернуть всю сумму аванса со штрафными санкциями. Это были еще не все беды. В тот период у меня коммерческим директором работал сотрудник, с которым мы считались друзьями по жизни и по работе, и который решил воспользоваться ситуацией, расколоть компанию, уведя из нее всех контролеров и специалистов, обслуживающих наши системы, оставив в компании, разработчиков и администрацию. К чести нашего коллектива всего два человека поддались этим уговорам. Остальные категорически отвергли это предложение. Естественно, как только я вышел на работу, мы со скандалом расстались с этими людьми. Но финансовый 2003 и половина 2004 года были провальными. И только спустя 1,5 года мы снова вошли в нормальное русло. Из этого происшествия я сделал для себя главный вывод: не бери на работу друзей, особенно на ключевые посты. Я уже не говорю о том, что об использовании наработанного значительного потенциала с Диасканом не могло быть и речи.

6. Железнодорожный транспорт

Хочу рассказать еще об одном проекте, на первый взгляд, очень перспективном, но не получившем развитие. В период 2006–2008 годы по контракту с ОАО «Российские железные дороги» мы выполнили две разработки. Первая касалась создания автоматизированного комплекса для контроля колесных пар грузовых и пассажирских вагонов. Вторая разработка относилась к экспертному контролю дефектных участков рельсов, уложенных в путь. В обеих разработках мы впервые реализовали комплексный подход к оценке качества контролируемого объекта с выходом на остаточный ресурс. Он заключается в том, что в автоматическом режиме осуществляется контроль всего металла колесной пары или дефектного участка рельса, в голографическом режиме измеряются геометрические размеры дефектов, эти параметры транслируются в программу расчета ресурса, специально разработанную прочнистами в виде расчетного модуля и зашитую в комплекс программ системы. Результатом диагностики является величина миллионов тонно-километров перевозимого груза через рельс или колесной парой. Причем при таком подходе ресурс

увеличивается примерно в 10 раз за счет более точного учета влияния дефекта на работоспособность конструкции. Обе системы прошли испытания и внедрены, правда, в 1 экземпляре на предприятиях ОАО «РЖД». Системы демонстрировались президенту В.И. Якунину и старшему вице-президенту Гапановичу и получили положительный отзыв. Экономический эффект в рамках всей отрасли мог бы быть огромным (многие сотни миллионов рублей). Но дальше опытных образцов дело не пошло, хотя, в начале работ нас уверяли, что потребность отрасли в системах оценивалась десятками систем.

За создание и внедрение новых разработок на опасных промышленных объектах трое ученых компании в составе авторского коллектива нескольких организаций удостоены Премии Правительства России за 2006 год. Привожу выдержку из Российской Газеты от 28.02.2007 г. Постановление Правительства РФ от 22 февраля 2007 года № 121, г. Москва «О присуждении премий Правительства РФ 2006 года в области науки и техники».

Рассмотрев предложения Межведомственного совета по присуждению премии Правительства РФ в области науки и техники, Правительство РФ постановляет:

6. Вopilкину Алексею Харитоновичу, доктору технических наук, профессору, генеральному директору общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр неразрушающего контроля «ЭХО+», руководителю работы, Бадаляну Владимиру Григорьевичу, кандидату физико-математических наук, заместителю генерального директора, Тихонову Дмитрию Сергеевичу, техническому директору, — работникам того же общества; Дымкину Григорию Яковлевичу, доктору технических наук, профессору, директору филиала федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт мостов и дефектоскопии Федерального агентства железнодорожного транспорта»; Казанцеву Александру Георгиевичу, доктору технических наук, заведующему отделом федерального государственного унитарного предприятия «Государственный научный центр Российской Федерации — Научно-производственное объединение по технологии машиностроения (ЦНИИТМАШ)», Караеву Алибеку Басхануковичу, заведующему лабораторией, Санькову Николаю Ивановичу, Сугирбекову Болату Азимбаевичу, кандидатам технических наук, ведущим научным сотрудникам, — работникам того же предприятия; Коннову Владимиру Васильевичу, доктору технических наук, генеральному директору закрытого акционерного общества «Научно-производственный центр «Молния»; Харебову

Владимиру Георгиевичу, генеральному директору общества с ограниченной ответственностью «ИНТЕРЮНИС», — за создание и промышленное внедрение технологий комплексной диагностики, методов и импортозамещающих приборов с целью снижения аварийных ситуаций на потенциально опасных объектах.

В 2008 году ОАО «Газпром» объявил конкурс на решение задачи контроля сварных соединений тройников с накладками (ТСН). Проблема состоит в том, что шов сварки центрального трубопровода закрыт накладкой размером вдоль оси 300–800 мм. Т.е. непосредственного доступа к этому шву нет. В то же время этот шов оказался проблемным, имелись случаи аварии. Таких ТСН в системе Газпрома эксплуатируется более 40000 шт. В конкурсе приняло участие 8 компаний, в том числе и мы. Под решение этой задачи мы создали новую систему Авгур-Т, главной отличительной особенностью ее стало применение трехмерной обработки с использованием волноводного распространения звука в стенке трубы. Иными словами удалось сфокусировать луч в двух плоскостях на значительном расстоянии от шва, свести к минимуму шумы, достичь требуемой чувствительности и разрешающей способности. В результате проведенных испытаний система Авгур-Т, единственная, была допущена к применению. Поставлено заказчикам 10 комплектов. Через два года в системе была реализована опция контроля основного металла с использованием волноводного распространения ультразвука. В ней мы впервые применили так называемую фронтальную голографию, позволившую получить сфокусированный, слабо расходящийся луч на расстоянии в несколько метров и, соответственно, разрешающую способность не более 10 мм. На базе Авгур-Т мы выполнили еще несколько поставок для производства нефтехимических сосудов большой толщины (до 300 мм.). Пожалуй, они оказались единственным в России оборудованием, которое позволило обеспечить высокие чувствительность и разрешающую способность на таких толщинах.

7. Антенные решетки

Двухтысячные годы в мире неразрушающего контроля ознаменовались быстрым развитием направления, связанного с применением фазированных антенных решеток (ФАР). Многие уважаемые компании предложили на рынок приборы на ФАР. Мне показалось перспективным это направление развития средств контроля. Мои ведущие специалисты поначалу не поддержали покупку прибора, мотивируя тем, что у нас есть система Авгур, более мощное средство, чем ФАР. Тем не менее, я настоял

на приобретении в 2007 году прибора X-32 компании Харфанг. Это стало эпохальной, поворотной вехой в развитии компании. Но все по порядку. Детальное изучение прибора и в целом технологии ФАР показало, что перед Авгуром у нее есть как минимум два преимущества. Первое состоит в том, что за счет качания луча по глубине отпадает необходимость сканирования по одной координате, тем самым повышается производительность контроля. И второе — мгновенная обработка и результаты выводятся сразу на экран, что также повышает производительность. Зато обнаружилось множество недостатков и проблем его применения. Это и ограничения применения для толщин свыше 50 мм, фокусировка изображения только по одной линии, и наличие ложных изображений, усложняющих расшифровку, и проблемы встраивания приборов в автоматические системы, и ряд других проблем. Нельзя забывать, что в России не было разработано ни одной методики ни в одной отрасли, регламентирующих их применение. К тому же стоимость приборов зашкаливала за 100 тысяч долларов. Это обстоятельство существенно тормозило применение, в общем-то, прогрессивной технологии ФАР, несмотря на то, что на все АЭС централизованно было поставлено по два прибора Омнискан.

После детального изучения на практике технологии и приборов ФАР у наших ученых появилось множество идей как улучшить эту технологию, и создать более совершенное оборудование для автоматизированного УЗК. Был предложен и разработан новый алгоритм под названием С-САФТ, который в дальнейшем трансформировался в ЗД-С-САФТ. Строго говоря, к этому времени уже появились работы Российских ученых А.А. Самокрутова и В.Г. Шевалдыкина (компания «Акустические контрольные системы»), и даже выпускается прибор А 155 Интровизор. Но мы пошли дальше, и разработали впервые автоматизированную систему Авгур-Арт. Именно в автоматизированном режиме в полной мере проявляются все преимущества этой технологии, которая, кстати, названа «Цифровая Фазированная Апертура» (ЦФА).

В чем преимущества этой технологии ЦФА? Не вдаваясь в физику и тонкости этой технологии, следует выделить, во-первых, формируется такое акустическое поле в изделии, узкий слабо расходящийся узкий луч шириной менее 1 мм, что обеспечивает высокую разрешающую способность вдвое более высокую, чем при голографии. Чем больше толщина изделия, тем более значимо это преимущество. Благодаря формированию узкого пучка лучей, чувствительность контроля повысилась примерно в 10 раз, появилась возможность контролировать изде-

лия большой толщины 300 мм и более с возможностью измерения размеров дефектов от 1 мм. Другое большое преимущество состоит в следующем. Для всех когерентных методов визуализации характерно наряду с основным изображением наличие ложных изображений (фантомов), связанных с другими модами волн, неизбежно возникающих на дефекте, затрудняющих анализ результатов и препятствующих автоматизации этого самого процесса анализа. В свое время мы предпринимали немалые усилия для решения этой проблемы, приглашали ученых-специалистов по распознаванию изображений, но практического результата достичь не удалось именно из-за многообразия фантомов. Так вот технология ЦФА предоставляет возможность эти самые фантомы превратить во благо, а именно, проанализировать отдельно всех мод изображений и когерентно сложить их. Тогда все изображения дефектов, каким бы ходом лучей они ни получены, превратятся в одно единственное изображение без фантомов. Имея такое изображение, уже можно автоматизировать и процесс анализа, и получение протокола контроля. Еще одно преимущество связано с тем, что при формировании правильного изображения большую роль играет профиль внутренней поверхности справа и слева от сварного шва, который далеко не всегда совпадает с чертежом, и заранее неизвестен. Это не знание приводит к размыванию изображения и увеличению погрешности измерения размеров дефектов. Опять же технология ЦФА позволяет при размещении АР с двух сторон шва восстановить профиль внутренней поверхности, и с учетом его получить новое изображение, в котором эта ошибка будет сведена к нулю. Кстати эта возможность легла в основу предложенной нами технологии измерения толщины и профиля внутренней поверхности по всему периметру сварного соединения, что дает дополнительную информацию о его качестве. Есть еще ряд менее значимых преимуществ технологии ЦФА, таких, как более высокое отношение сигнал-шум при контроле аустенитных сварных швов, безэталонное и одновременное измерение толщины и скорости продольных и поперечных волн. Все эти преимущества как раз и удалось реализовать в новой системе Авгур-Арт.

8. Новые разработки на основе антенных решеток

В 2010 году сложилась благоприятная ситуация по форсированному развитию приборов и технологий с использованием ФАР применительно к контролю сварных соединений на АЭС. С одной стороны, в концерне и на АЭС понимали, что применение дефектоскопов ФАР современно, модно и перспектив-

но, и даже на все АЭС было закуплено по два прибора. Но отсутствие разрешенных методик не позволяло их применение. С другой стороны, мы накопили достаточно большой опыт использования дефектоскопов ФАР. Факультативно в течение нескольких лет мы их применяли при контроле. Я вышел в концерн РЭА с предложением создать комплексную программу развития этого направления. Эту идею поддержали ведущие специалисты концерна РЭА: В.Н. Ловчев и Д.Ф. Гуцев, и все руководители отделов неразрушающего контроля станций. Такая программа была создана, утверждена на уровне руководства концерна и в течение 4-х лет финансировалась. Благодаря этой программе нам удалось разработать ту самую базовую систему Авгур АРТ, которая на несколько лет вперед становится основным нашим продуктом, разработано и разрешено к применению 15 методик, практически на все наиболее ответственные сварные соединения реакторных установок типа ВВЭР идет поставка этих систем на все АЭС.

В последние два года нами были выполнены две разработки для предприятий, производящих изделия большой толщины. Для ОАО «Ижорские заводы», производящего сосуды химических реакторов диаметром до 5.5 метров, длиной до 40 метров и толщиной 300 и более мм. Небольшое лирическое отступление. Когда я только начинал свою трудовую деятельность в ЦНИИТМАШе, я очень часто бывал на Ижорском заводе. Это был гигант советской индустрии, более 100 цехов, на котором трудилось 36 тысяч человек, по территории разъезжали железнодорожные составы, от проходной до дальних цехов надо было идти целый час. Сегодня, в результате приватизации, этот гигант распался на два десятка небольших заводиков, из них самым крупным оказался именно тот завод, который выпускает химические реакторы и корпуса реакторов для АЭС. Больше всего меня поразило, что за прошедшие 40 с лишним лет на ключевых постах в центральной заводской лаборатории остались те же уже не молодые, но классные специалисты, такие, как Евгений Федорович Кретов, Рудольф Леонидович Табакман (совсем недавно ушедший на пенсию) и другие. Меня поражало, что все 90 и двухтысячные годы завод был в полном запустении, холод, выбитые стекла хлам и пустота в цехах. И только в конце двухтысячных годов завод начал подниматься из руин, начал получать большие заказы из-за рубежа. Возвращаюсь к нашей поставке. За рубежом нашел широкое применение для контроля сварных швов так называемый ТОФД (время пролетный метод), разновидность ультразвукового метода контроля. В России метод ТОФД совершенно не представлен, нет ни методик, ни

аппаратуры. Мы взялись восполнить этот пробел и за 8 месяцев разработали и поставили систему на базе Авгур-Т, реализующую технологию применительно к большим толщинам 300 и более мм. Преимущество технологии ТОФД состоит в высокой производительности контроля (отсутствие одной координаты сканирования), а также в возможности измерения высоты дефектов с достаточно высокой точностью. Но имеется и серьезный недостаток — трудности расшифровки результатов, требующих высокую квалификацию специалистов. Последняя наша поставка состоялась на Ленинградский металлургический завод (ЛМЗ), готовящийся выпускать сварные ротора турбин новой конструкции с большой толщиной сварных швов — до 200 мм. С этой целью мы переработали систему Авгур-Арт, таким образом, чтобы она поддерживала контроль одновременно четырьмя АР, две из которых предназначены для контроля продольных дефектов, а две других АР — для выявления поперечных дефектов.

Не могу не отметить еще одно достижение компании, которое как раз базируется на высокой разрешающей способности наших систем. Дело вот в чем. Вследствие плохой разрешающей способности традиционного УЗК, на ответственные узлы, как правило, конструктора назначают помимо УЗК еще радиографический контроль (РГ), либо только его, который обладает высокими характеристиками по точности измерения реальных размеров дефектов. В тоже время, разрешающая способность систем Авгур уже приближается к параметрам РГ, особенно для толщин более 20 мм, а для толщин более 80 мм просто превосходит РГ. Учитывая другие преимущества такого контроля (выявление трещин, высокая чувствительность, производительность, безопасность, экономичность, контроль объектов с высоким радиационным фоном), АУЗК становится прямым конкурентом РГ. У нас уже имеется опыт замены РУ на АУЗК. Приведу пример. К нам обратилась компания Волгонефтехиммонтаж, возводившая в Кстово нижегородской области завод Нефтеоргсинтез. На этом объекте монтировалось большое количество трубопроводов диаметром 400–700 мм со сварными швами аустенитного класса, которые ранее принципиально не контролировались УЗК, поэтому предписан был контроль РГ источником ионизирующего излучения. На контроль каждого сварного шва уходит 4,5 часа, при этом, требуется эвакуация персонала из зоны контроля. Мы разработали методику, провели приемочные испытания со вскрытием, металлографией, и сопоставлением результатов, которые оказались положительными, и Ростехнадзор разрешил замену РГ на АУЗК. Мы проконтролировали 100 швов за 15 смен, при этом, монтаж объекта

не прерывался. Для РГ потребовалось бы 55 смен с остановкой монтажа и срывом сроков пуска объекта. Сегодня мы уже имеем несколько методик для атомных станций, разрешенных для замены РГ.

9. ЭХО+ сегодня

За 25 лет развития компании накоплен огромный научный и практический опыт создания и применения автоматизированных комплексов. Были взлеты, были падения, несколько раз мы были на грани исчезновения из бизнеса, но каждый раз мы, с божьей помощью, вставали с колен, как птица Феникс из пепла, еще более окрепшими, еще более уверенными в правоте того дела, которому посвятили жизнь. Нам удалось собрать очень мощную творческую команду, состоящую из умных, талантливых профессионалов. Больше всего я горжусь тем, что мне удалось создать такие моральные и материальные условия, при которых те специалисты, которые уволились в 90-х годах, практически все вернулись в родную гавань. Первым возвратился Женя Базулин. Поработав в частных фирмах, освоив специальность бухгалтера, он вернулся, как раз, главным бухгалтером, одновременно занялся весьма успешно наукой. Сегодня он начальник научно-методического отдела, главный алгоритмист-исследователь, в ближайшее время защищает докторскую диссертацию. Затем вернулся Андрей Штерн, возглавивший отдел информационных технологий, отвечающий за все программное обеспечение наших систем. Далее возвратилась Марина Пентюк, правда не инженером-электроником, а зам. главного бухгалтера. И, наконец, возвратился Сергей Каплун, тоже сменивший специальность, теперь он — аудитор-консультант по финансово-экономическим вопросам. В компании есть практически все специалисты, необходимые для разработки, производства, продажи, обслуживания систем и осуществления диагностических работ на промышленно опасных объектах, в первую очередь на АЭС.

Мы ведем активную научно-публицистическую деятельность, за 25 лет нами опубликовано порядка 220 статей в различных изданиях, в том числе 6 отдельных изданий. Среди них наибольшую гордость представляет коллективная монография «Методы ультразвуковой дефектометрии металлов», изданную в цвете в издательстве «Машиностроение» в 2008 году. В ней мы впервые закрепили за собой право первенства на новое направление — ультразвуковая дефектометрия, которое все более широко используется в различных отраслях. Более того, в атомной энергетике сегодня завершается разработка федеральных норм и правил на эксплуатационный контроль оборудования АЭС. В них



Коллектив ООО «НПЦ «ЭХО+»

впервые оценка работоспособности объектов АЭС будет осуществляться на основе значений геометрических размеров дефектов, которые в обязательном порядке будет необходимо измерять. По сути, сегодня в России имеется две модели систем, позволяющие измерять реальные размеры дефектов, и обе системы — разработки ЭХО+, а именно Авгур 5.2 и Авгур-Арт. ЭХО+ уже в достаточной степени подготовился к переходу на контроль и оценку качества по реальным размерам, разработано более 15 методик контроля, идет оснащение АЭС системами Авгур-Арт.

10. ЭХО+ в цифрах

За 25 лет существования ЭХО+ произошло:

- Выполнено работ на разных объектах — 2.250.000.000 рублей.
- Опубликовано статей 235, в том числе 7 монографий.
- Защищено 2 кандидатских и 2 докторских диссертации
- Получено 10 патентов на свои разработки.
- Поставлено в промышленность 120 систем.
- Разработано и аттестовано 27 методик контроля с использованием наших разработок.
- Продиагностировано 125000 погонных метров сварных соединений.
- Сыграно 42 одноразовых спектаклей силами сотрудников компании.
- У сотрудников родилось 47 детей и внуков.

11. Благодарности

В первую очередь, я хочу поблагодарить свою маму, которая дала мне жизнь, творить и наслаждаться этой прекрасной жизнью, наградила меня хорошими генами, не склочным, доброжелатель-

ным характером. И, хотя, она мало занималась моим воспитанием, но ее пример, честного и добросовестного служения людям, всегда стоял передо мной.

Все, что я достиг, я неразрывно связываю с нашим коллективом единомышленников и энтузиастов, которые ковали и продолжают ковать успех нашей компании. Благодаря их самоотверженному труду наша компания позиционируется в России и в мире как одна из самых передовых и инновационных компаний в области неразрушающего контроля.

Вся моя трудовая жизнь была связана с именем всемирно признанного ученого, профессора Игоря Николаевича Ермолова вплоть до самой его кончины в 2007 году. Работая 22 года в ЦНИИТМАШе непосредственно под его крылом, я и стал тем, кем я стал. Все, что я достиг и чему научился так или иначе связано с его именем. И после создания ЭХО+ он влился в наш коллектив, по сути, как научный руководитель, оказывая, прежде всего, своим авторитетом и именем неоценимую помощь компании. Слава ему на века.

На разных жизненных этапах мне встречались очень достойные, умные и порядочные люди, которые постоянно оказывали на меня благотворное влияние. Это и коллектив отдела неразрушающих методов контроля ЦНИИТМАШ, это и наши заказчики в концерне Росэнергоатом и на АЭС, которые ставили перед нами подчас невыполнимые задачи, это и мои друзья, с которыми я делил радости и трудности, наконец, это коллеги по профессии из разных компаний, с которыми мы часто обмениваемся информацией, обогащая друг друга. Низкий вам поклон.

25 февраля 2015

25-летний опыт диагностики сварных соединений объектов повышенной опасности системами Авгур

25 years of experience diagnosis welds high-risk facilities systems AUGUR

В статье представлен обзор работ по автоматизированному ультразвуковому контролю (АУЗК), выполненных в ООО «НПЦ «ЭХО+» за 25 лет с 1990 г. Контроль выполнялся с применением систем с когерентной обработкой данных серии АВГУР. Описана, предложенная ООО «НПЦ «ЭХО+», комплексная технология АУЗК сварных соединений, использующая аппаратуру с когерентной обработкой данных. Сообщаются результаты АУЗК сварных соединений (СС) трубопроводов и оборудования АЭС. Приведены результаты АУЗК СС трубопроводов обвязки на газокompрессорных станциях Газпрома, СС нефтепроводов ОАО «Транснефть», замыкающих СС корпусов реакторов гидрокрекинга.

The article presents a review of research on automated ultrasonic testing (AUT), performed in "SPC ECHO+" for 25 years since 1990. Monitoring was carried out with the use of systems with coherent processing of data series Augur. Described proposed "SPC ECHO+" complex technology of welds ultrasonic examination using equipment with a coherent data processing. Reported the results of AUT welds in pipelines and plant equipment. The results of AUT of welds at Gazprom gas compressor stations, Transneft pipelines, closing welds reactor of vessels hydrocracking presented.

Введение

Ультразвуковые (УЗ) методы широко используются в промышленности. Однако наиболее широко распространенные методы УЗ контроля (УЗК), имеют ряд существенных недостатков, основным из которых является невозможность измерить истинные (а не условные и эквивалентные) размеры дефектов. Это связано с тем, что информационными параметрами таких методов являются: амплитуда УЗ сигнала и его пространственно-временные характеристики. В результате, применение этих методов позволяет оценить наличие несплошности (дефекта), ее условную длину и координаты. Это приводит к необоснованно жестким нормам на УЗК и, в результате, к значительному объему ремонта неопасных сварных швов. Кроме того, наличие амплитуды УЗ сигнала, как основного информационного параметра, по которому выполняется оценка характеристик дефекта, приводит к значительному ограничению возможностей УЗК. Например, сильная зависимость амплитуды сигнала от качества акустического контакта и зависимость амплитуды сигнала от индикатрисы рассеяния дефекта [1] приводит к значительным трудностям при выполнении мониторинга дефектных сварных соединений.

Вместе с тем, в последние десятилетия появились приборы УЗК, широко использующие коге-

рентную обработку данных. Такие приборы позволяют не только выявлять дефект, но и определять его реальные параметры: координаты, тип, длину, высоту, профиль [2, 3, 4]. Это привело к увеличению достоверности и точности оценки ресурса контролируемой конструкции за счет более эффективно-го сотрудничества со специалистами по прочности.

Комплексный ультразвуковой контроль сварных швов трубопроводов с определением ресурса и мониторингом

Приборы УЗК с когерентной обработкой наиболее часто используют различные методы фокусировки акустических полей излучаемых или регистрируемых. Для этого используется либо аппаратная фокусировка полей излучения и приема с цифровым управлением акустическим пучком (приборы с фазированными антенными решетками) [см., например, 1] либо цифровая фокусировка с применением различных разновидностей метода фокусированной синтезированной апертуры (SAFT) [6].

В НПЦ «ЭХО+» разработаны УЗ системы неразрушающего контроля серии «Авгур», в которых используется когерентная обработка сигналов. Алгоритм обработки — многочастотная, многокурсовая акустическая голография — аналогичен методу FT-SAFT [7-8]. В последних приборах серии

«Авгур» (АВГУР-АРТ) для получения изображений используется алгоритм C-SAFT [9] и большое число алгоритмов улучшения качества акустических изображений, что значительно увеличивает достоверность контроля. Получаемые в результате такой обработки данных ультразвуковые изображения имеют ряд полезных особенностей:

1. Высокое разрешение $\approx \lambda$, что связано с использованием амплитудно — фазовых характеристик рассеянного акустического поля.
2. Сжатие динамического диапазона изображений, которое является следствием высокого разрешения.
3. Повышенное отношение сигнал/шум. Это свойство связано с совместной обработкой А-сканов при восстановлении изображений и использованием множества схем регистрации данных.

Относительная нечувствительность к амплитуде эхо сигнала связана с тем, что около 70% информации содержится в фазовой составляющей А-сканов [10]. Это обстоятельство позволяет проводить периодический УЗК изделий, осуществляя мониторинг.

Использование приборов с фазированными антенными решетками (ФАР) также позволяет получать высококачественные изображения, обладающие похожими особенностями.

Отметим, что изображения дефектов являются промежуточным результатом контроля. Их анализ заканчивается составлением протокола контроля, в котором отражен тип и геометрические размеры несплошности, координаты ее залегания.

Указанные выше особенности акустических изображений, полученных в результате когерентной обработки данных, позволяют применять комплексную технологию контроля сварных соединений и осуществлять анализ качества сварных швов через анализ влияния дефектов на прочность шва (Рис. 1).

Данная технология реализуется в три этапа [11].

На первом этапе проводится поисковый контроль, используя ручной или автоматизированный УЗК по стандартным методикам контроля.

Целью этого этапа является поиск несплошностей, определение их местоположения, описание на языке

условных размеров, эквивалентных площадей и определение годности сварного шва в соответствии с действующими нормативными документами.

Для исключения случаев пропуска опасных дефектов плоскостного типа, чувствительность фиксации контроля увеличивается в сравнении со стандартными методиками на 6–12 дБ до уровня поисковой чувствительности. Если амплитуда эхо-сигнала от отражателя не достигает уровня фиксации, то шов признается годным и пропускается в эксплуатацию.

На втором этапе проводится автоматизированный измерительный УЗК с помощью систем с когерентной обработкой данных серии «Авгур» с целью определения типа и размеров дефектов.

Целью второго этапа контроля является определение типа несплошностей, измерение их координат и действительных размеров (длины, глубины, если необходимо, профиля).

Измерительному контролю подвергаются те швы, в которых на первом этапе были обнаружены

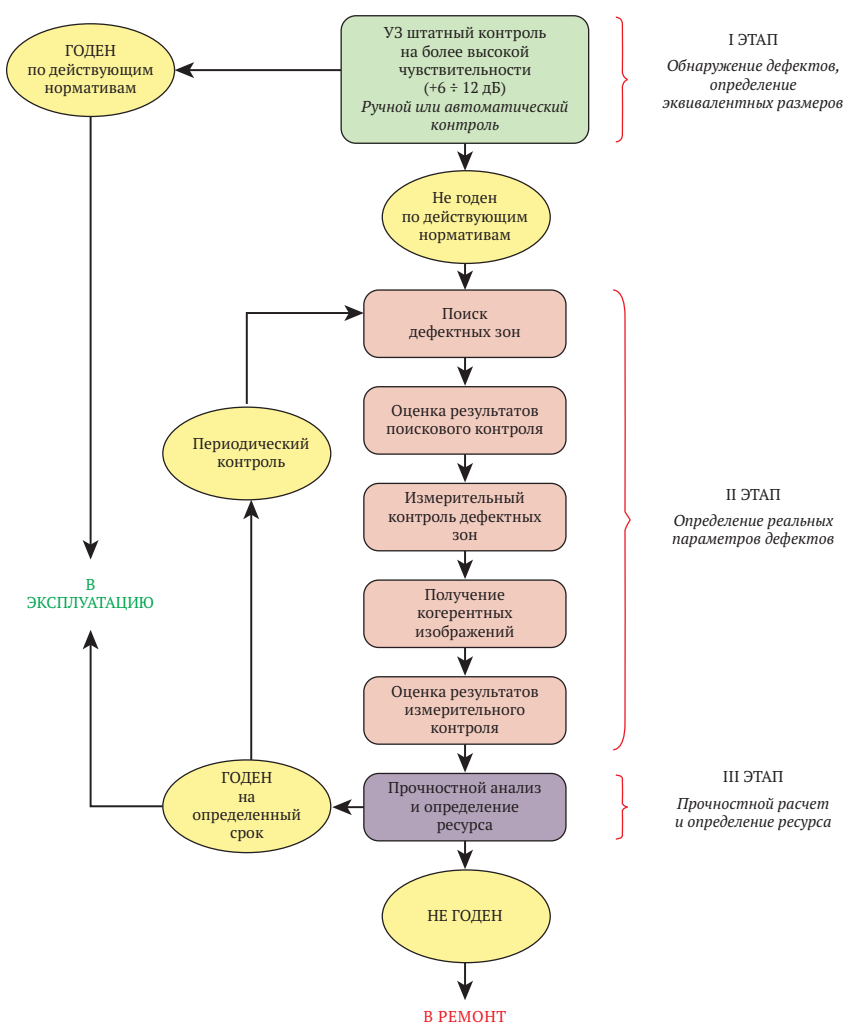


Рис. 1. Комплексная технология контроля сварных соединений с применением систем с когерентной обработкой серии Авгур

отражатели с амплитудой эхо-сигналов достигающей уровня фиксации. Измерительный УЗ контроль характеризуется использованием методов когерентной обработки данных, что значительно повышает чувствительность и разрешающую способность контроля. Затем выполняется обработка данных автоматизированного экспертного контроля с целью получения трехмерных изображений несплошностей. По этим изображениям, после обработки и анализа данных, составляются заключения о размерах и типе дефектов и несплошностей.

На третьем этапе информация о параметрах дефектов используется для прочностного расчета ресурса работы сварного шва с учетом других характеристик, влияющих на ресурс. Если расчет показывает, что запас прочности таков, что имеется возможность дальнейшей эксплуатации, шов допускается в работу оборудования. В противном случае, шов отправляется в ремонт. Сварной шов, допущенный в эксплуатацию, подлежит периодическому измерительному контролю с целью наблюдения за развитием несплошности, которая определяется по результатам прочностных расчетов.

Необходимо отметить, что в настоящее время ведется разработка нормативов допускаемых размеров дефектов для различных объектов контроля. В этом случае целесообразность использования разработанной технологии контроля увеличивается, так как, в подавляющем числе случаев, для принятия решения о ремонте объекта контроля не будет требоваться подключение специализированных расчетных организаций.

Данная технология ультразвукового диагностирования позволяет:

- значительно повысить надежность выявления дефектов различного типа за счет более высокой чувствительности контроля;
- минимизировать как «недоработку», так и «перебраковку» благодаря регистрации всей информации о контроле и возможности детального анализа ее оператором в особо сложных и важных случаях;
- составить базу данных о наличии в сварных швах различного рода допустимых несплошностей (осуществить паспортизацию швов);
- осуществлять эксплуатацию оборудования с «непроходными» (по действующим нормам) дефектами благодаря возможности оценки ресурса работы сварной конструкции по установленным размерам несплошностей и параметрам напряженного состояния;
- проводить мониторинг за развитием дефектов в процессе эксплуатации объектов.

Таким образом, эта технология обеспечивает эффективное использование результатов НК в прочностных расчетах по оценке надежности и ресурса контролируемых изделий и постоянное наблюдение за состоянием объекта.

Для того чтобы в полной мере реализовать преимущества описанной выше технологии комплексного контроля и мониторинга необходимо использовать приборы, которые должны позволять выполнять УЗК с определением реальных параметров дефектов с известной погрешностью и обеспечивать возможность наблюдения за поведением выявленного дефекта в течение длительного времени. Этим требованиям удовлетворяют приборы с когерентной обработкой данных, с помощью которых получают акустические изображения внутреннего объема контролируемого объекта с высоким пространственным разрешением и слабой зависимостью от амплитуды зарегистрированных эхо-сигналов.

При использовании систем с ФАР технология контроля упрощается, так как сразу выполняется регистрация фокусированных акустических изображений с высоким разрешением, обеспечивающая возможность измерения размеров дефектов (рис. 2). На схеме контроля рис. 2 пунктирными линиями показаны связи, осуществляемые при периодическом контроле выявленной несплошности.

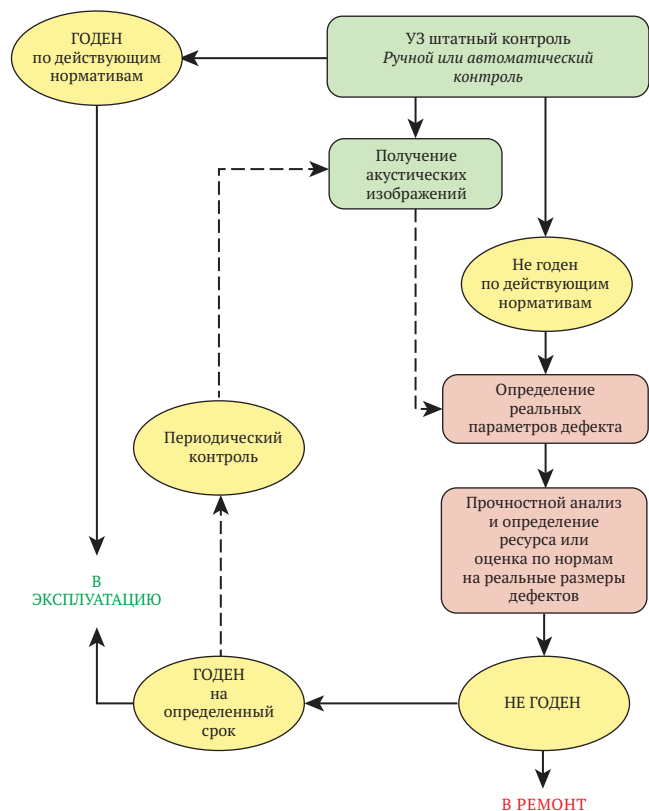


Рис. 2. Технология контроля сварных соединений с применением приборов с ФАР

Необходимо отметить, приведенные варианты технологии контроля предполагают, что пространственно-временные характеристики эхосигналов имеют характерные особенности, соответствующие присутствию несплошности (для рис. 1), или амплитуда изображений превышает поисковый уровень (для рис. 2). В ряде изделий амплитуда изображений от элементов трещины очень мала и может быть меньше браковочного уровня. Поэтому, если на акустическом изображении наблюдаются элементы изображения несплошности с малой амплитудой эхо-сигналов, то выполняется анализ изображений с целью определения реальных параметров выявленного дефекта с дальнейшим прочностным расчетом.

Для реализации этой концепции использовалась система серии Авгур [2]. Многолетний опыт эксплуатации этих систем показал их эффективность. В последние годы в НПЦ «ЭХО+» были разработаны и эксплуатируются автоматизированные системы на основе приборов с ФАР «Омникан» и «Харфанг».

Результаты исследований по определению погрешности измерения высоты и длины дефектов типа трещин при использовании систем серии Авгур и примеры многолетнего наблюдения за развитием таких дефектов приведены в [2].

Опыт применения комплексной технологии для контроля сварных швов и мониторинга.

Контроль трубопроводов и оборудования АЭС

Начиная с 1996, комплексная технология неразрушающего контроля успешно применяется как при предэксплуатационном контроле строящихся АЭС, так и при эксплуатационном контроле на действующих АЭС.

В 1998–2000 гг. был выполнен цикл работ по предпусковому контролю трубопроводов I и II контуров первого блока Волгодонской АЭС [5] и в 2002–2003 гг. на строящемся 3 энергоблоке Калининской АЭС; в 2008–2009 гг. — на 2 энергоблоке Волгодонской АЭС; в 2011 г. — на 4 энергоблоке Калининской АЭС.

В дальнейшие годы осуществлялось обязательное наблюдение за выявленными дефектами в процессе эксплуатации:

- ежегодно, начиная с 2000 г. на Волгодонской АЭС (1 энергоблок);
- ежегодно, начиная с 2011 г. на Волгодонской АЭС (2 энергоблок);
- в 2006, 2009, 2010, 2011, 2013 гг. на Калининской АЭС (3 энергоблок).

- в 2012, 2013 гг. на Калининской АЭС (4 энергоблок);

На действующих АЭС с реакторами РБМК: Ленинградской, Курской, Смоленской АЭС основными объектами эксплуатационного контроля являлись перлитные сварные швы трубопроводов первого контура Ду 800 и аустенитные швы трубопроводов первого контура Ду 300 реактора.

Работы по эксплуатационному контролю выполнялись также на АЭС с реакторами типа ВВЭР: Балаковской, Волгодонской, Калининской, Кольской, Нововоронежской АЭС. Выполнялся контроль перлитных сварных швов трубопроводов первого и второго контуров — Ду 850, Ду 200 — Ду 600 и аустенитных сварных швов Ду 400, Ду 500, сварных соединений № 111 узла приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам, сварных соединений № 10 приварки переходной втулки к патрубку корпуса реактора ВВЭР.

В 2010–2013 гг. в НПЦ «ЭХО» разработаны методики контроля приборами использующими ультразвуковые ФАР и автоматизированные сканирующие устройства [6].

В 2012 г. на Нововоронежской АЭС на 3 и 4 энергоблоках был выполнен автоматизированный УЗК сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду200 с применением систем состоящих из автоматизированного сканера и ФАР-дефектоскопа X-32 (Харфанг).

Особенно активно такая система использовалась в 2013 г. для контроля кольцевых сварных соединений № 111 узла приварки коллекторов к патрубкам парогенераторов реакторов типа ВВЭР-1000, имеющих диаметр 1335 мм и толщину 40 мм. Был выполнен контроль на Калининской АЭС (3 энергоблок), Нововоронежской АЭС (4, 5 энергоблоки), Волгодонская АЭС (2 энергоблок), Балаковская АЭС (3 энергоблок). Кроме того, на Балаковской АЭС (3 энергоблок) был выполнен контроль СС аустенитных трубопроводов Ду200, композитных СС дыхательных трубопроводов и патрубков сброса и впрыска пара (табл. 1).

Обобщённые результаты АУЗК сварных соединений № 111 узла приварки коллекторов к патрубкам парогенераторов с применением когерентных систем приведены на рис. 3. Статистический анализ выявленных несплошностей по размерам, показывает, что:

- 92% несплошностей имеет малую высоту менее 5 мм и только 6% всех выявленных несплошностей имеет высоту 5 мм и более. Из них не более 2% имеет высоту от 10 до 16 мм (см. рис. 3а).
- 95% несплошностей имеет длину менее 50 мм и только 4,4% всех выявленных несплошностей

Табл. 1. Автоматизированный УЗК с применением систем, использующих ФАР-дефектоскопа X-32

АЭС	№ энерго-блока	Объект контроля	Год выполнения контроля
Балаковская	3	СС Ø 1335x72	2013
		Композитные СС Ø426x40	
		Композитные СС Ø406x93	
Волгодонская	2	СС Ø 1335x72	2013
Калининская	3	СС Ø 1335x72	2013
Нововоронежская	3	Аустенитные СС Ø 236x18	2012
	4	Аустенитные СС Ø 236x18	2012
		СС Ø 1335x72	2013
	5	СС Ø 1335x72	2013

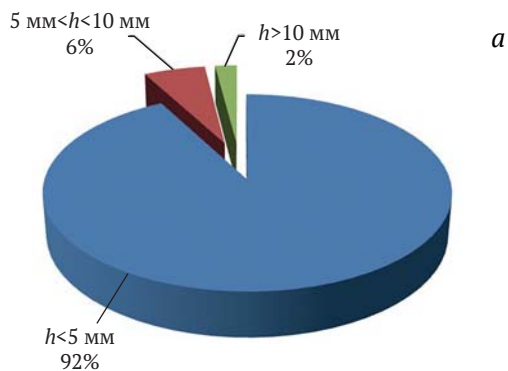
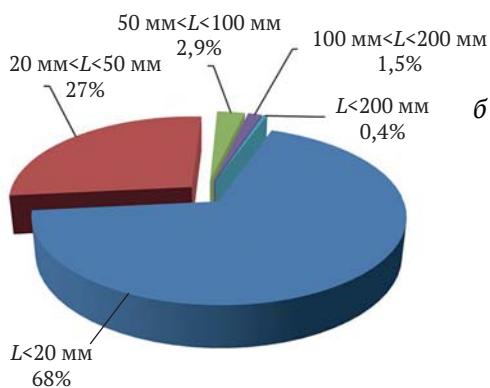
Обобщенное распределение несплошностей по высоте h , выявленных при АУЗКОбобщенное распределение несплошностей по длине L , выявленных при АУЗК

Рис. 3. Распределение несплошностей по высоте (а) и длине (б) в СС Ду 1200

имеет длину от 50 мм и не более 200 мм (см. рис. 3б).

Организация работ по реализации, изложенной выше технологии на АЭС, выполнялась следующим образом:

- Системы серии Авгур, предназначенные для контроля таких трубопроводов, эксплуатирова-

лись специалистами НПЦ «ЭХО+» — разработчиками систем серии Авгур и обученными специалистами атомных станций.

- В первые годы проведения работ данные обрабатывались в НПЦ «ЭХО+». Здесь составлялись экспертные заключения с оценкой параметров выявленных несплошностей: типа, локализации относительно сварного соединения; определялась длина, высота и профиль несплошности. При повторном контроле, выполнялся сравнительный анализ полученных данных и данных прошлых лет.

В последние годы обработка и оценка данных контроля, в основном, осуществляется аттестованными специалистами атомных станций.

- Прочностной анализ на основании экспертного заключения и принятие решения о допустимости в эксплуатацию осуществляет специализированная организация (НИКИЭТ, РНЦ «Курчатовский институт, ВНИИАЭС).

В ближайшее время готовятся к выходу из печати федеральные нормы и правила эксплуатационного неразрушающего контроля, в основе которых будет заложено решение о дальнейшей эксплуатации через измерение реальных размеров дефектов по эксплуатационным нормам. В этих условиях актуальность разработанных методик и аппаратуры серии АВГУР возрастает.

Контроль трубопроводов обвязки на газокompрессорных станциях (ГКС) Газпрома.

В 2003 г. был выполнен автоматизированный ультразвуковой контроль кольцевых сварных соединений на трубопроводах ГПА, ГМК, ПУ, абсорберов и выходных коллекторов с использованием системы автоматизированного ультразвукового контроля «Авгур 4.2» (рис. 4).



Рис. 4. Контроль системой «Авгур 4.2» трубопровода Ду 1200 на ГКС

Всего было проконтролировано 57 кольцевых сварных соединений (104 погонных метра). Все сварные соединения имели дефекты, недопустимые по результатам штатного контроля.

Были определены типы и геометрические размеры несплошностей в сварных соединениях (Рис. 5).

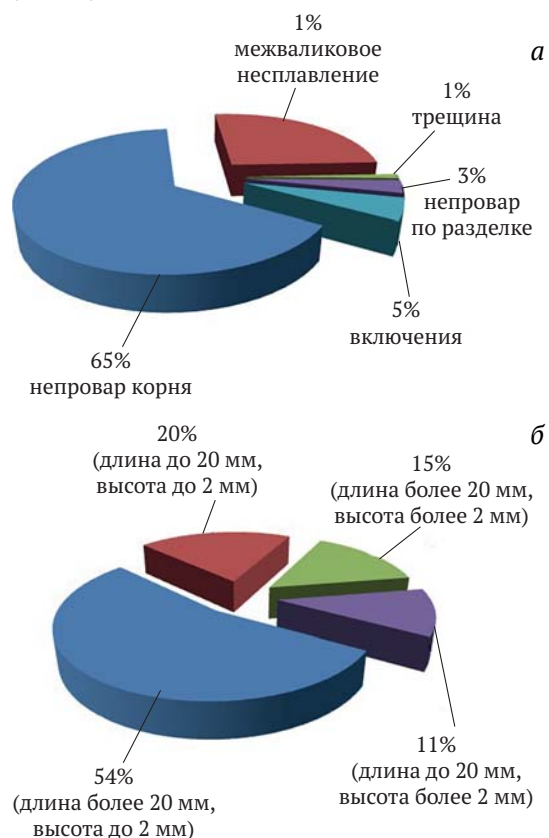


Рис.5. Классификация по типам (а) и распределение по размерам (б) несплошностей, обнаруженных при проведении АУЗК на ГКС

Результаты АУЗК показали, что 94% несплошностей является непроварами корня и межваликовыми несплавлениями, 5% — включениями, а 1% — трещины.

Анализ размеров выявленных несплошностей показал, что 54% несплошностей имеют длину более 20мм, а высоту до 2мм, 20% несплошностей имеют длину до 20мм и высоту до 2мм, 15% — несплошности с длиной более 20мм и высотой более 2мм, 11% — несплошности с длиной до 20мм и высотой более 2мм.

Эти данные позволили сделать вывод, что большинство обнаруженных несплошностей появилось в сварных соединениях в процессе монтажа трубопровода. Так как эти несплошности являются концентраторами напряжений и могут развиваться в процессе эксплуатации, то они подлежат периодическому контролю.

Сварные соединения, содержащие несплошности, были подвергнуты прочностному расчету и были даны рекомендации по дальнейшей эксплуатации проконтролированных сварных соединений. В результате было рекомендовано отремонтировать 1 шов, а остальные сварные швы подлежат АУЗК с различной периодичностью от полугода до 2 лет.

Аналогичные работы были выполнены в 2004 г. при контроле кольцевых сварных швов трубопроводов Ду 1000 на одном из ЛПУ ООО «Пермтрансгаз» (рис. 6). Всего было проконтролировано 283 кольцевых сварных соединений. Из них: 255 сварных соединений оказались бездефектными; в 28 сварных соединениях обнаружено 278 несплошностей, определены их тип, координаты расположения и геометрические размеры.



Рис. 6. Сканер системы серии Авгур 5.2 на объекте контроля

С 2010 г. началось широкое применение систем серии Авгур-Т для диагностического обследования тройниковых соединений газопроводов и основного металла магистральных нефтепроводов. Особенностью контроля таких объектов является значительное удаление контролируемой области от области ввода акустических колебаний. Поэтому

при контроле используется эффект волнового распространения акустических волн в объекте [7].

В 2010 г. был выполнен АУЗК внутренних сварных соединений «патрубок–обечайка» равнопроходных тройников 700×700 с усиливающими накладками трубопроводной обвязки ГПА Холм-Жирковского ГКС (рис. 7). Всего было проконтролировано 25 тройников. По результатам АУЗК с применением Авгур-Т из 25 проконтролированных сварных соединений 20 признаны негодными и только 5 — годными. Из них: 4 сварных соединения были допущены по результатам других методов контроля и одно сварное соединение признано ремонтпригодным. Сопоставление результатов ручного ультразвукового контроля, с дефектами, выявленными системой АВГУР-Т, по координатам их положения и по эквивалентным размерам дало хорошее совпадение.



Рис. 7. Сканер системы серии Авгур-Т на объекте контроля

В 2012 г. был выполнен значительный объем работ по АУЗК внутренних сварных соединений «патрубок-обечайка» в 16 тройниковых соединениях 1400×700 мм магистральных трубопроводов «Пунга — Ухта — Грязовец», «Пунга — Вуктыл — Ухта-2», «Ухта — Тожок-3»; внутренних сварных соединений «патрубок-обечайка» в 14 тройниках 1000×700 мм магистральных трубопроводов «Парабель — Кузбасс», «Омск — Новосибирск — Кузбасс».

В октябре 2012 г. на Оршанском ГКС были выполнены работы по диагностическому обследованию 6 тройниковых соединений объектов ОАО «Белтрансгаз» магистрального трубопровода «Торжок — Минск — Ивацевичи». В этих работах специалисты ООО «ЭХО+» выполняли контроль кольцевых и внутренних сварных соединений «патрубок-обечайка» тройников с применением системы Авгур-Т.

Контроль сварных соединений нефтепроводов ОАО «Транснефть»

В 2002 г. был выполнен АУЗК кольцевых сварных соединений на нефтепроводах Ду1000, Ду800, Ду600.

Всего было проконтролировано свыше 220 кольцевых сварных соединений (около 600 погонных метров). В 38 сварных соединениях несплошностей не было зафиксировано. В остальных сварных соединениях были обнаружены несплошности.

По результатам работы были определены типы и геометрические размеры несплошностей в проконтролированных сварных соединениях. Все сварные швы, содержащие дефекты, были подвергнуты прочностным расчетам.

10% дефектов не имели однозначных признаков для отнесения их к какому-либо типу. В этом случае прочностной расчет проводился по наиболее консервативной оценке — предполагалось, что несплошности неустановленного типа имеют плоскостной характер (являются трещинами).

Полученные данные автоматизированного УЗК позволяют сделать вывод о том, что подавляющая часть обнаруженных дефектов (не менее 77%) появилась в сварных швах в процессе монтажа трубопровода. Однако, в сварных швах также имеются опасные дефекты плоскостного типа, которые могут развиваться в процессе эксплуатации.

По результатам прочностных расчетов большинство сварных соединений с несплошностями было допущено в эксплуатацию без ограничений и их необходимо контролировать через 4 года. Несколько сварных соединений допущено в эксплуатацию с ограничениями. Все сварные соединения, имеющие ограничения по эксплуатации, необходимо повторно проконтролировать через 1 год. После повторного контроля и расчёта на прочность будет установлен срок следующего контроля или выдано заключение о необходимости ремонта сварного шва. Один сварной шов содержал недопустимый дефект — трещину значительной длины и высоты и был отремонтирован.

С разработкой мобильной системы Авгур-Т, позволяющей выполнять высокопроизводительный АУЗК основного металла стенки труб, начались работы по ультразвуковой интегральной диагностике нефтепроводов, предназначенных для магистральных газопроводов, непосредственно на площадке складирования (рис. 8).

В 2008 г. был с использованием системы АУЗК Авгур-Т выполнена диагностика основного металла трубопроводов, предназначенных для строительства подводного перехода магистрального трубопровода через реку Гилую. Всего было обследовано 7 труб диаметром 1220 мм и толщиной 26 мм (общая длина 79 м). В результате контроля были определены трубы со значительным числом индикаций, определены их координаты и угловое положение.



Рис. 8. Плети нефтепровода на производственной площадке

В 2010 г. выполнена интегральная диагностика основного металла стенки труб, находящихся на площадке складирования на ж/д станции Беркакит Нерюнгринского района республики Саха (Якутия). Обследовались трубы средней длины 11,5 м диаметром 1220 мм и толщинами 26 мм, 22 мм, 19 мм и 16 мм (Табл. 2). Всего было проконтролировано 222 трубы общей длиной около 2540 м. Из них обследовано 92 м труб толщиной 26 мм, 675 м труб толщиной 22 мм, около 1600 м труб толщиной 19 мм и 172 м труб толщиной 16 мм. Только в 3 трубах диаметром 1220×19 наблюдались индикации, связанные с неоднородностями материала трубопровода, которые требуют дополнительных исследований, используя методы и аппаратуру УЗК.

В 2010 г. был выполнен АУЗК кольцевых аустенитных сварных соединений технологического оборудования на участке гидроочистки вакуумного газойля комплекса каталитического крекинга нефтеперерабатывающих заводов на установке гидроочистки ООО «Лукойл-Нижегороднефте-

оргсинтез» (г. Кстово). Контроль выполнялся с использованием системы АВГУР-Т. Всего было проконтролировано 91 сварное соединение различных размеров: $\varnothing 559 \times 38$ мм (36 шт.); $\varnothing 509 \times 35$ мм (12 шт.); $\varnothing 457 \times 35$ мм (27 шт.), $\varnothing 406 \times 28$ мм (16 шт.). Типы сварных соединений весьма разнообразны: «гиб-труба», «гиб-тройник», «тройник-тройник», «гиб-короткая катушка-гиб» и только 2 соединения были «труба-труба». Это потребовало разработки и использования нескольких универсальных сканеров для обеспечения автоматизированного контроля. АУЗК показал, что все СС были выполнены качественно и годны к эксплуатации. В некоторых СС встречались непротяженные дефекты (поры); только в одном СС встретился протяженный дефект (34 мм) малой высоты (менее 2 мм).

Автоматизированный голографический ультразвуковой контроль сварных соединений реакторов гидрокрекинга

В 2009 г. был выполнен АУЗК замыкающего сварного соединения с использованием подкладного кольца двух корпусов реакторов гидрокрекинга ОАО «Ижорские заводы». Контроль выполнялся с использованием системы АВГУР-Т. Геометрические параметры сварного соединения: наружный диаметр — 5922 мм, толщина стенки — 205 мм, толщина наплавки — 5 мм; разделка замыкающего шва V — образная.

АУЗК проводился по методике, разработанной в ООО «НПЦ «ЭХО+» и согласованной с Заказчиком работы [16]. На рис. 9 представлен объект контроля, на котором установлен локальный гибкий трек со сканером, закрепленный на поверхности корпуса с помощью оранжевой ленты.

В результате контроля было выявлено семь несплошностей отражательная способностью кото-

Табл. 2. Автоматизированный УЗК основного металла труб для строительства магистральных нефтепроводов с применением системы Авгур-Т на ж/д станции Беркакит

Труба диаметр × толщина (мм)	Количество труб, шт.	Число индикаций	Примечание
1220×26	8	нет	Не требуется дополнительное дефектоскопическое обследование
1220×22	59	нет	Не требуется дополнительное дефектоскопическое обследование
1220×19	140	Имеются индикации в 3 трубах	Требуется дополнительное дефектоскопическое обследование
1220×16	15	нет	Не требуется дополнительное дефектоскопическое обследование



Рис. 9. Общий вид помоста, с которого выполнялась установка трека и сканера

рых была равной или превышающей браковочный уровень $3,5 \text{ мм}^2$ (см. Табл. 3). Амплитуда эхо-сигналов от несплошностей 1–4 превышает контрольный уровень на 6–12 дБ. Амплитуда эхо-сигналов от несплошностей 5–7 превышает контрольный уровень на 1 дБ. Несплошности 5–7 представляют собой скопления непротяженных несплошностей, локализованные в центре сварного соединения на глубинах 69–90 мм. Несплошности 1–4 локализованы на границе основной металл — сварной шов, на глубинах 141–147 мм. Несплошности имеют малую высоту от 2 мм до 4 мм. Выявленные несплошности являются допустимыми, а сварные соединения годными в соответствии с [16]. Контроль, проводи-

мый по настоящей методике, обеспечил выявление продольно ориентированных несплошностей с эквивалентной отражающей способностью более $3,5 \text{ мм}^2$ по плоскодонному отражателю и измерение их геометрических размеров с погрешностью не более 2,0 мм.

Оценка качества сварных соединений выполнялась на основе информации о реальных размерах дефектов в соответствии с [16].

Некоторые особенности систем серии Авгур

Системы автоматизированного УЗК серии Авгур могут работать в двух режимах:

- в режиме **поиска несплошностей** по длине сварного шва (быстрый обзорный режим). В этом режиме обнаруживаются несплошности, определяется их длина и маркируются области расположения несплошностей.
- в **измерительном** режиме, в котором обеспечивается детальная регистрация акустического поля, рассеянного несплошностью определяется высота и профиль дефекта.

Полученные в измерительном режиме данные обрабатывают методом FT-SAFT и получают изображения несплошностей с высоким разрешением. Это позволяет определить истинные (а не условные) параметры несплошностей такие, как координаты, длина, высота, тип.

Многолетний опыт эксплуатации систем серии Авгур 4.2 на различных объектах показал, что в общем объеме контроля только 10–15% занимает из-

Табл. 3. Характеристики несплошностей, выявленных при контроле замыкающих сварных соединения корпусов реакторов гидрокрекинга

Несплошность №	Экв. Размер (мм^2)	Длина, мм	Высота, мм	Локализация
1	12	30	4	на Р-границе сварного соединения на глубине 141 мм
2	10	46	4	на Р-границе сварного соединения на глубине 141 мм
3	7	25	2	на Р-границе сварного соединения на глубине 143 мм
4	5	20	3	на Р-границе сварного соединения на глубине 147 мм
5	скопление непротяженных несплошностей	24	14	Центр сварного соединения на средней глубине 80 мм
6	скопление непротяженных несплошностей	29	5	на Р стороне сварного соединения на глубине 141 мм
7	скопление непротяженных несплошностей	16	21	Центр сварного соединения на средней глубине 83 мм

мерительный высокоточный контроль, остальной объем контроля составляет поисковый контроль, который наряду с обнаружением области залегания несплошности позволяет определять ее параметры в соответствии с нормативными документами. Вместе с тем система АВГУР после доработки может выполнять как функции высокоскоростного штатного контроля, так и измерительного контроля, объединив, таким образом, первый и второй этапы выполнения технологии контроля. Для решения этой задачи НПЦ «Эхо+» разработана система нового поколения — АВГУР 5.

Особенностью системы АВГУР 5 является:

- возможность выполнения сплошного штатного контроля и выборочного (в соответствии с технологией) экспертного контроля,
- новое программное обеспечение, учитывающее особенности штатного контроля (средства сжатия данных, автоматизированное формирование протокола и т.д.),
- средства автоматизации количественной оценки результатов контроля,
- использование базы данных.

Применение систем серии АВГУР имеет большие перспективы там, где используются изделия большой стоимости, или очень высока цена возможной аварии. Это почти все отрасли промышленности: атомная и теплоэнергетика, нефтегазовый комплекс, химическая промышленность, судостроение.

К 2008 г. была разработана система АВГУР-Т, предназначенная для обнаружения областей вероятной локализации неоднородностей в основном металле трубопровода, определения координат их положения и последующей оценки их характеристик. В этой системе используется эффект волнового распространения акустических волн в объекте, что позволяет выполнять контроль объектов (например, сварных соединений) локализованных на значительном расстоянии от области ввода акустических волн. Для увеличения разрешения акустических изображений в программное обеспечение системы введен алгоритм улучшения качества изображений путем 3D обработки данных контроля. В результате появилась возможность получать высококачественные изображения внутренних сварных соединений типа «патрубок-обечайка» в тройниках газопроводов, расположенных на расстоянии до 700 мм от области ввода акустических волн.

В 2014 г. прошла испытания и подготовлена к серийному выпуску система АВГУР-АРТ. Особенностью этой системы является использование акустических антенных решеток и когерентная обработка данных по алгоритму C-SAFT, в котором

учитываются многократные отражения и преобразования типов волн [17].

Заключение

Таким образом, специалистами ООО «НПЦ «ЭХО+» были разработана аппаратура и выполнены многочисленные работы в различных областях промышленности используя ультразвуковую неразрушающую дефектometriю. Для этого:

1. Были разработаны аппаратные и программные средства АУЗК с когерентной обработкой данных, позволяющие получать акустические изображения с высоким разрешением внутреннего объема контролируемых изделий — системы серии АВГУР; сканирующие устройства и программные средства, позволяющие применять серийные ФАР-дефектоскопы в составе автоматизированных систем ультразвукового контроля. Все эти приборы позволяют определять тип несплошностей, их реальные длину, высоту, азимут, угол наклона.
2. Предложена и апробирована новая комплексная технология контроля сварных соединений с применением систем когерентной обработкой данных — АВГУР и комплексов АУЗК с ФАР-дефектоскопами.
3. Разработан и утвержден в атомной энергетике и Ростехнадзоре комплекс методик АУЗК с использованием систем серии АВГУР и систем с фазированными антенными решетками для широкого круга объектов атомной энергетике, нефте- и газопроводов.
4. За период 1997–2014 гг. выполнены работы по ультразвуковой дефектometriи:
 - разнообразных объектов и трубопроводов всех АЭС России и на Ровенской АЭС (Украина),
 - трубопроводов обвязки на газокompрессорных станциях Газпрома в 2003–2012 гг.,
 - сварных соединений нефтепроводов ОАО «Транснефть» в 2002–2010 гг.,
 - сварных соединений реакторов гидрокрекинга ОАО «Ижорские заводы» (2009 г.).
5. Полученные в результате АУЗК данные о дефектности изделий использовались в прочностных расчетах специалистами НИКИЭТ, ИАЭ им. Курчатова, ГИДРОПРЕСС, ВНИИСТ и др.
6. Разработанные технология и средства АУЗК позволили:
 - резко (более чем в 10 раз) сократить объем необоснованного ремонта швов,
 - исключить пропуск в эксплуатацию опасных дефектов,
 - создать условия для оптимального планирования ремонтных работ.

7. За разработку и внедрение систем и методик на потенциально опасных объектах А.Х. Вopilкин, В.Г. Бадалян. и Д.С. Тихонов в 2006 г., в составе творческого коллектива, удостоены премии Правительства РФ.

Литература

1. Вopilкин А.Х. Волны дифракции и их применение в ультразвуковом неразрушающем контроле (Обзор) — Дефектоскопия, 1985, № 2, с. 72–85.
2. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. и др. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов/под ред. А.Х. Вopilкина/М.: Машиностроение, 2008. — 368 с.
3. <http://www.harfang.ru/content/x-32.html/>, X-32 (ФАР-дефектоскоп).
4. <http://www.olympus-ims.com/ru/omniscan-mx/>, OmniScan MX (ФАР-дефектоскоп).
5. Introduction to phased array ultrasonic technology applications. R/D Tech, 2007
6. Системы акустического изображения: пер. с англ./под. ред. Г. Уэйда. Л. Судостроение, 1981. — 240 с.
7. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. — Акустический журнал, 1988, 34, № 2, с. 222–231.
8. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Алгоритм совместной обработки многочастотных и многоконфигурационных голограмм для восстановления изображения дефектов. — Дефектоскопия, 1989, № 3, с. 25–32.
9. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций. Состояние и тенденции //Заводская лаборатория. 2007, № 1. С. 50–69.
10. Gallagher N.C., Optimum quantization and relative information content of holographic magnitude and phase — Acoustical imaging and holography. 1979, V.1, № 2, p. 119–132.
11. Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Новый подход к ультразвуковому неразрушающему автоматизированному контролю ответственных сварных соединений. — Контроль. Диагностика, 1999, № 10. С. 23–31.
12. Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х. Опыт применения ультразвуковой экспертной системы с когерентной обработкой данных «Авгур» на российских АЭС // Контроль. Диагностика. 2000, № 9. С. 35–39.
13. Методики контроля, используя аппаратуру с ФАР объектов АЭС:
 - 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;
 - Методика автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых разнородных (композитных) сварных соединений дыхательных трубопроводов 426x40 компенсатора давления реакторов ВВЭР-1000 с применением технологии фазированных решёток, МФАР.АЭ12. Т0С/4-К-11,
 - 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;
 - Методика ультразвукового контроля композитных сварных соединений приварки патрубков уравнильных трубопроводов, приварки патрубков впрыска компенсаторов давления и приварки патрубков САОЗ корпуса реактора ВВЭР-440 к переходной втулке с применением технологии фазированных решёток, МФАР.АЭ11. П0М/26-К-11;
 - 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;
 - Методика ультразвукового контроля сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 с применением технологии фазированных решёток, МФАР.АЭ2. Т2М/2-К-13.
14. Ромашкин С.В., Тихонов Д.С. Опыт применения системы «Авгур-Т» на объектах нефтегазовой отрасли промышленности. В мире НК, 2010, № 1 (147). С. 30–34.
15. Автоматизированный ультразвуковой контроль замыкающих сварных соединений корпусов реакторов гидрокрекинга с использованием методов акустической голографии, 2008, (МА5-НГ2-С1Б/0-К-08).
16. Cases of Asme Boiler and Pressure Vessel Code. Case 2235–09, Table 2, 2005
17. Базулин Е.Г., Голубев А.С., Коколев С.А. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов. Дефектоскопия, 2009, № 2, с. 18–32.

Радиография или ультразвук – что лучше?

Radiography or ultrasound – which is better?

Рассмотрены преимущества и недостатки радиографии и автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) с когерентной обработкой данных. Сопоставляются информативность и чувствительность этих методов. Проанализированы возможности измерения размеров дефектов в радиографии и при АУЗК. Утверждается, что для практических целей выявляемость и погрешность определения геометрических размеров дефектов при АУЗК с когерентной обработкой данных вполне достаточна.

Приведен пример применения системы с когерентной обработкой данных для контроля аустенитных сварных соединений трубопроводов значительной толщины — до 45 мм. Трубопроводы использованы при строительстве комплекса каталитического крекинга. Хронометрирование работ показало, что выполнение АУЗК одного сварного соединения $\varnothing 508 \times 34$ мм не превышало 60 мин, при возможности проведения других монтажных работ.

The advantages and disadvantages of radiography and automated ultrasonic testing (AUT) with a coherent data processing. The information content and sensitivity of these methods are compared. The possibilities of measuring the size of defects in radiographic and ultrasonic examination are analyzed. It is argued that for practical purposes, detection and error in determining the geometric dimensions of the defects in the AUT with a coherent treatment of data is sufficient.

An example of application of the system with a coherent treatment of data for testing of austenitic welds in pipelines of considerable thickness — up to 45 mm. Pipes used in the construction of a catalytic cracking unit. Timekeeping work showed that the performance of one AUT-welded joints of $\varnothing 508 \times 34$ mm didn't exceed 60 minutes at the possibility of other object construction job.

Идея этой статьи принадлежит И.Н. Ермолову, который в 2000 году подготовил первый вариант статьи. С тех пор нами накоплен значительный опыт по замене радиографии автоматизированным ультразвуковым контролем (АУЗК).

Ультразвук и радиография — два основных вида контроля сварных соединений (СС) ответственного назначения, способных выявлять, как внутренние так и наружные дефекты. Каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками.

Предложения о целесообразности замены радиографического контроля ультразвуковым выдвигались многими специалистами (см., например, [1, 2]). В ряде зарубежных документов, анализируется возможность замены радиографического контроля ультразвуковым и сформулированы требования к ультразвуковому контролю, при выполнении которых он может полноценно заменить радиографию [3].

В связи с развитием компьютерной техники, созданием методов и средств АУЗК, использующих когерентную обработку данных, ультразвуковой метод контроля приобрел ряд дополнительных качеств таких, как возможность:

- хранения данных контроля,
- анализа данных и интерпретации результатов независимыми специалистами,

- определения реальных параметров несплошностей и, в первую очередь, плоскостных дефектов,
- точного, в пределах практической необходимости, определения координат залегания несплошностей.

В работе рассмотрен вопрос о возможности и целесообразности замены радиографического контроля ультразвуковым контролем с когерентной обработкой данных, что делает неразрушающий контроль сварных соединений достаточно точным (в пределах требований практики), более надежным, чувствительным, безвредным и дешевым.

1. Радиография

В настоящее время основным средством неразрушающего контроля СС трубопроводов является радиография. В частности, в атомной энергетике в общем объеме неразрушающего контроля радиография занимает около 30%. Это связано с более долгим периодом развития и применения в промышленности, а также несомненными достоинствами этого метода контроля из-за использования коротковолнового излучения для получения изображений внутренних дефектов в объектах. В результате этого изображения дефектов, получаемые при радиографии, близки к оптическим, и поэтому

сравнительно легко расшифровываются и оцениваются специалистами-дефектоскопистами, сварщиками и эксплуатационным персоналом. Кроме того для облегчения интерпретации полученных при контроле изображений созданы атласы, помогающие быстро классифицировать тот или иной дефект. Существенным также является то, что радиационные методы позволяют измерять размеры выявленных дефектов с высокой точностью, недостижимой для практического ультразвука при контроле изделий толщиной менее 40 мм. Необходимо отметить, что радиационные методы с высокой достоверностью обнаруживают некоторые типы дефектов — объемные дефекты типа пор и шлаковых включений.

Вместе с тем радиографические методы контроля обладают существенными *недостатками*:

- точность определения геометрических размеров несплошностей (длины, ширины) значительно снижается с увеличением толщины контролируемого изделия;
- достоверность обнаружения наиболее опасных — плоскостных дефектов типа трещин и непроваров — низкая;
- чувствительность к выявлению плоскостных несплошностей значительно снижается с толщиной, например для изделий толщиной до 40 мм минимальное раскрытие таких дефектов — около 10 мкм, при толщине изделия 100 ÷ 150 мм минимальное раскрытие — 30 мкм;
- необходима защита от радиационного излучения для персонала, выполняющего контроль, и окружающих лиц;
- с экономической точки зрения, использование радиографических методов может оказаться намного дороже, чем применение УЗ: требуются специализированные комнаты и время на проявление пленки; необходимо использовать дорогостоящие расходные материалы. Для контроля габаритных изделий часто возникают трудности в размещении приборов для выполнения контроля, требуются специальные помещения, мощные источники рентгеновского или гамма излучения.

2. Ультразвуковой контроль

Автоматизированный ультразвуковой контроль с когерентной обработкой данных имеет **ряд преимуществ**:

- Ультразвук хорошо отражается от наиболее опасных плоскостных дефектов — типа трещин, непроваров. Это связано тем, что само распространение ультразвуковых волн происходит вследствие наличия упругих связей между эле-

ментами среды, а любая даже очень тонкая несплошность нарушает эти связи.

- Приборы ультразвукового контроля более мобильны и контроль можно выполнять практически в любых условиях.
- В дефектоскопии используется ультразвук очень малой мощности, который полностью безвреден для персонала и для окружающих лиц.
- Отсутствие расходных материалов.
- АУЗК проводится в среднем в 4 раза быстрее, чем радиография (по данным НПФ АВЭК [4]).

Вместе с тем ультразвуковой метод имеет **ряд недостатков**:

- В УЗК не существует обширного атласа изображений дефектов, по которому легко классифицировать тип дефекта. Это связано с тем, что:
 - вид изображения существенно зависит от использованных алгоритмов его построения;
 - в большинстве случаев вид изображения не совпадает с его оптическим образом (связано с большей длиной используемой звуковой волны по сравнению с оптической);
 - объемные дефекты (поры, шлаковые включения) обнаруживаются достаточно легко, но оценить параметры такого дефекта по его изображению очень непросто.
- УЗК значительно хуже выявляет и классифицирует объемные дефекты типа пор и шлаковых включений.

3. Характеристики радиографического и ультразвукового видов контроля

Информативность ультразвукового и радиографического методов.

Форма дефекта:

- при ультразвуковом контроле оценивается весьма грубо (точность определения границ несплошности не превышает λ). Вместе с тем использование специальных алгоритмов обработки данных контроля (MULTY-C-SAFT [5]) в дополнение к обычно применяемому послойному методу FT-SAFT [6] позволяет уверенно различать типы дефектов — объемные (шлаковые включения, поры) и плоскостные (трещины, непровары).
- при радиографии точнее анализ и классификация объемных дефектов. Однако для плоскостных дефектов достаточно уверенно определяется его протяженность и азимут, но не высота (особенно для плоскостных несплошностей наиболее распространенной вертикальной ориентации). Что касается измерения величины раскрытия таких несплошностей то и УЗК, и радиография таких значений не дают. Вместе с тем,

значения раскрытия, например, трещины оказывают значительное влияние на чувствительность контроля.

Чувствительность:

- радиографического контроля по проволочным и канавочным эталонам для толщин $10 \div 40$ мм составляет $0,2-0,5$ мм и для толщин от 40 мм до 120 мм — $0,6 \div 1,25$ мм [7].
- Минимальные размеры выявляемых реальных дефектов характеризуется следующими данными [8]:
 - Поры и включения могут не выявляться, если диаметр их поперечного сечения меньше удвоенной чувствительности по эталону.
 - Непровары и трещины могут не выявляться, если их глубина меньше удвоенной чувствительности контроля. В частности, для толщин до 40 мм дефекты не выявляются, если их раскрытие менее $0,1$ мм. Они также не выявляются, если плоскость раскрытия не совпадает с направлением просвечивания.
- Ультразвуковой контроль с когерентной обработкой данных, определяется двумя видами взаимодействия акустических волн с объектом: зеркальным отражением акустических волн от несплошностей (если они велики) и границ объекта контроля и дифракцией волн на несплошностях или их фрагментах. Так сферические несплошности диаметром $0,3$ мм уверенно выявляются на глубинах не менее 60 мм. Дефекты типа непроваров и вертикальных трещин хорошо выявляются, если от них принимаются зеркальные отражения УЗ. Неблагоприятно ориентированные дефекты хуже выявляются при контроле. Такие дефекты обнаруживают путем регистрации волн, дифрагированных от краев трещин. Для плоскостных дефектов уверенное выявление несплошностей соответствует уровню выявления объемных одиночных несплошностей. В том случае, когда необходимо проводить измерения геометрических размеров несплошностей, размеры последних должны превышать λ .

Оценка возможностей выявления и классификации дефектов СС приведена в табл. 1.

Измерение размеров дефектов в радиографии.

- точность определения протяженности дефектов (вдоль и поперек СС) при радиографическом контроле весьма высока и сравнима с точностью визуального метода. Вместе с тем, за счет геометрической нерезкости изображений дефектов на снимках (при расположении пленки вплотную к контролируемому объекту) составляет для толщин $10 \div 40$ мм величину $0,1 \div 0,25$ мм и для толщин от 40 мм до 120 мм — $0,3 \div 0,7$ мм. В том слу-

чае, когда дефекты расположены между источником и пленкой возможно дополнительное увеличение размеров изображений не более чем на 25% [4].

- Высоту дефектов определяют по сравнению оптической плотности изображения дефектов снимке, вызываемых дефектом и канавочным эталоном. Однако, фактически, оптическая плотность сильно зависит от формы и размеров дефекта, поэтому в нормативных документах не предусматривается определения размеров дефектов в направлении просвечивания (т.е. высоты дефекта).

Измерения размеров дефектов в ультразвуковом контроле.

Геометрические размеры несплошности определяются:

- по протяженности (вдоль и поперек СС) выбранной схемой регистрации и обработки данных и составляет величину от нескольких мм (при применении послойной регистрации и обработке данных) и длиной используемой акустической волны λ — при использовании 3D регистрации и обработке данных контроля [3].
- по высоте дефектов величиной λ и типом несплошности. Для несплошностей с размерами меньших $1 \div 2\lambda$ высоту дефектов можно определить, сопоставляя амплитуды изображения несплошности и опорного отражателя, которых должен иметь то же акустическое поведение (иметь похожую геометрическую форму). Поэтому оценка размеров несплошности основанная на амплитуде, является достаточно грубой. Для несплошностей больших размеров при определении высоты дефекта играет элемент изображения, связанный с дифракцией края дефекта и так как размеры этого элемента по уровню 6дБ , составляет величину не менее λ , то погрешность определения размеров $\pm 0,5\lambda$. Конкретные значения погрешностей при измерениях размеров дефектов методами радиографии и когерентными ультразвуковыми приведены далее в табл. 2.

Рассмотрим параметры радиографического и ультразвукового контроля с позиций использования результатов контроля для надежного определения работоспособности, периодичности контроля, прогнозирования времени дальнейшей эксплуатации контролируемого изделия, содержащего несплошности. Этими вопросами занимаются специалисты по прочности. При анализе поведения конструкции, содержащей дефекты, во время эксплуатации специалисты по прочности не могут использовать результаты определения дефектов

Табл. 1. Возможности выявляемости и классификации дефектов СС

Тип дефекта по данным КУЗК	Тип дефекта по данным радиографии	Характер дефекта	АУЗК с когерентной обработкой данных	Радиография
Плоскостной (в ряде случаев трещина)	Трещины	Трещина вдоль шва	+	±
		Трещина поперек шва	+	±
		Трещина разветвленная	+	±
	Непровары	Непровар в корне	+	±
		Непровар между валиками	+	±
		Непровар по разделке	+	±
Объемный, одиночный скопление, цепочка	Поры	Отдельная пора	+	+
		Цепочка	+	+
		Скопление	+	+
	Шлаковые включения	Отдельное включение	±	+
		Цепочка	±	+
		Скопление	±	+
Окисные включения		±	-	
Вогнутость корня шва		±	+	
Выпуклость корня шва				
	Подрез			+
Смещение кромок	-		+	-
Расслоение	-		+	-

+ — отличная, ± — посредственная

в виде условных или эквивалентных размеров, принятых традиционной дефектоскопии, так как многочисленные исследования показывают, что хотя условные размеры неплохо коррелируют с реальными размерами, высота выявленных дефектов совершенно не связана с эквивалентными размерами [9]. Так как наиболее опасными являются плоскостные дефекты, то особое внимание уделяется их существованию, локализации и размерам. Для выполнения надёжных прочностных расчетов необходимо знание реальной высоты и длины дефектов. При этом дефект представляется в виде прямоугольника, или эллипса (полуэллипса). Для построения модели дефекта особенно важна его максимальная высота (из-за особенностей развития дефекта в напряженной конструкции), которая требуется со значительной точностью. Что касается точности определения длины дефекта, то необходимость в высокой точности возникает только для объектов небольшого размера или очень большой значимости (например, ИТЭР). Для реальных объектов, например аустенитных СС трубопроводов диаметром 325 мм и толщиной 15 мм первого контура ядерного реактора, вполне достаточна

точность измерения высоты дефекта ± 1 мм и длины ± 10 мм. Это хорошо видно из диаграммы допускаемых размеров (высоты и длины) дефектов, определяющей безопасную эксплуатацию объектов контроля с дефектами в течение 1, 3 и 4 лет (см. рис. 1). Здесь же приведены параметры дефектов при значениях которых возможна эксплуатация объекта в течение всего срока его использования и предельно допустимые параметры дефектов.

Анализ табл. 2 показывает, что для объемных дефектов типа пор или включений, локализованных на глубинах до 40 мм обнаружение дефектов несколько лучше при радиографическом контроле; погрешность измерения контуров выявленных несплошностей (ширины и длины) также выше при радиографическом контроле. При большей глубине залегания несплошностей АУЗК с когерентной обработкой данных, по крайней мере, не хуже с точки зрения их обнаружения. Однако использование УЗК дает возможность оценить третье измерение несплошности — высоту с достаточно малой погрешностью (порядка λ). Что касается наиболее опасных — плоскостных дефектов типа трещин, то применение УЗК дает возможность измерять

Табл. 2. Погрешность измерения размеров дефектов в радиографии и в АУЗК с когерентной обработкой данных

Тип несплошности	Толщина объекта контроля, мм	Радиография			АУЗК с когерентной обработкой данных		
		Мин. выявляемый дефект, мм	Погрешность измерения размеров, мм		Мин. выявляемый дефект, мм	Погрешность измерения размеров, мм	
			Длина, ширина (диаметр)	Высота		Длина; ширина	Высота
Объемная	10	0,3	0,4	-	0,5	1; 10 ² ; 1 ³	1
	20	0,6	0,75	-	0,5	1; 10 ² ; 1 ³	1
	40	1	1,25	-	0,5	1; 10 ² ; 1 ³	1
	100	2	2,5	-	1	2; 10 ² ; 1 ³	2
	140	2,5	3,1	-	2	2; 10 ² ; 2 ³	2
Плоскостная	10	0,3 ¹	0,4	-	0,5	1; 10 ² ; 1 ³	2
	20	0,6	0,75	-	1	1; 10 ² ; 1 ³	2
	40	1	1,25	-	1	1; 10 ² ; 1 ³	2
	100	2	2,5	-	1	2; 10 ² ; 2 ³	2
	140	2,5	3,1	-	1	2; 10 ² ; 2 ³	2

¹ — Если плоскость раскрытия которых совпадает с направлением просвечивания; раскрытие плоскостного дефекта больше 10 мкм — для толщин до 40 мм и 30 мкм — для толщин до 150 мм.

² — При послойной регистрации и обработке данных контроля.

³ — При 3D-обработке данных контроля.

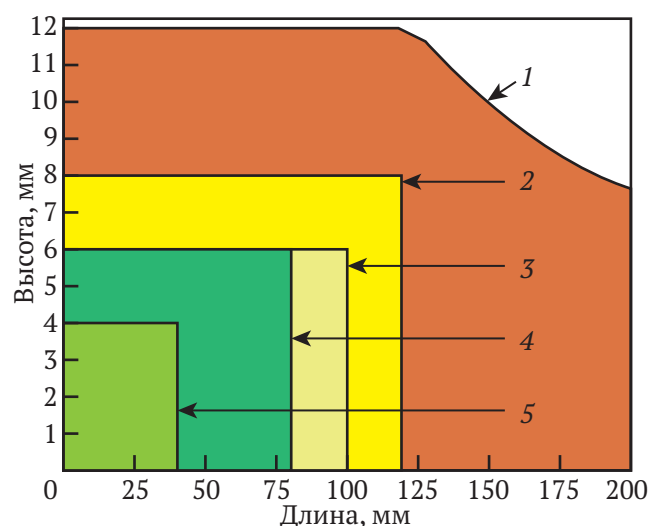


Рис. 1. Диаграмма допустимых размеров дефектов: 1 — предельно допустимые дефекты; 2 — область, безопасная на срок эксплуатации объекта; 3 — область, безопасная для эксплуатации на 1 год; 4 — область, безопасная для эксплуатации на 2 года; 5 — область, безопасная для эксплуатации 4 года

важнейший параметр трещины — ее высоту, тогда как такую информацию рентгенография не дает. Необходимо иметь в виду, что определить высоту

дефектов возможно только тогда, когда она превышает величину λ . В практике высота несплошности должна превышать 2 мм; если высота меньше, то надежно определить (без априорной информации) тип дефекта и его высоту не представляется возможным. Обнаружение несплошностей более надежное при УЗК и чем на большей глубине залегает дефект, тем надежнее. Что касается определения геометрических параметров несплошности, то погрешность определения высоты составляет на величину $(1 \div 2)\lambda$ (на практике около 2 мм); погрешность определения длины дефекта связана с применяемым способом регистрации и обработки данных — 10 мм при использовании послойной регистрации и обработки данных и до $1 \div 2$ мм — при использовании трехмерной регистрации обработки данных.

Таким образом, применение АУЗК с когерентной обработкой данных при контроле изделий толщиной от 40 мм имеет значительные информационные преимущества по сравнению с радиографией (в первую очередь, когда по априорным данным — результатам разрушающего контроля, металлографии, физико-химического и прочностного анализа — основными дефектами являют-

ся плоскостные дефекты типа трещин различной природы).

Приведем пример работы, направленной на замену радиографического контроля ультразвуковым, выполненной в 2010 г. В ней выполнялся ультразвуковой неразрушающий контроль технологических трубопроводов толстостенных аустенитных СС нефтехимического и нефтеперерабатывающего производства, изготовленных из аустенитных сталей диаметром $219 \div 600$ мм и толщинами $20 \div 45$ мм [10]. При контроле таких аустенитных сварных соединений, применение рентгенографического метода ограничивается значительным снижением чувствительности, что приводит к увеличению мощности источника ионизирующего излучения, значительному увеличению времени экспозиции и связанными с этим организационными трудностями обеспечения безопасности при работе с источниками ионизированного излучения, а также низкой производительностью контроля. Поэтому при строительстве комплекса каталитического крекинга ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» было решено заменить рентгенографический контроль АУЗК с когерентной обработкой данных. Была разработана и испытана методика АУЗК с использованием систем АВГУР-Т [11]. Особенностью методики является применение когерентных методов обработки эхо-сигналов, которые весьма эффективны при контроле аустенитных СС [3].

Результаты АУЗК сопоставлялись с данными рентгенографического контроля и было установлено, что контроль, проводимый в соответствии с разработанной методикой, обеспечивает обнаружение дефектов в СС, включая границу и околошовную зону. Дополнительные исследования образцов производственных СС технологического трубопровода $\varnothing 508 \times 35$, изготовленных из стали А312, установки вакуумного газойля продемонстрировали возможность выявления технологических и искусственных несплошностей, эквивалентная площадь которых равна или превышает 2 мм^2 , что соответствует требованиям, установленными правилами ПБ 03-585-03 [12]. Вместе с тем было отмечено, что при АУЗК, на контрольном уровне выявляются дефекты, которые не обнаруживаются рентгенографическим контролем, что свидетельствует о более высокой чувствительности АУЗК. Заметим, что при контроле, проводимом системой АВГУР-Т, выполняется сохранение исходных данных в базе данных системы без каких-либо предварительных обработок, что позволяет выполнять их просмотр в любое время после проведения контроля. Эта особенность систем АУЗК удовлетворяет

требованиям ASME CASE 2235-9 [3] для возможности замены рентгенографического метода контроля на ультразвуковой.

Таким образом, испытания методики контроля показали, что АУЗК удовлетворяет требованиям ПБ 03-585-03 к чувствительности контроля и типам выявляемых дефектов.

Возможность измерения размеров дефектов удовлетворяет требованию ASME CASE 2235-4. Методика получила разрешение Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору России на применение на объектах химических и нефтехимических взрывоопасных производств.

В соответствии методикой [7] был выполнен АУЗК аустенитных СС технологических трубопроводов установки гидроочистки вакуумного газойля комплекса каталитического крекинга нефтеперерабатывающего завода ООО «ЛукойлНижегороднефтеоргсинтез». Всего было проконтролировано 91 аустенитное СС. Для примера на рис. 2 представлены результаты контроля в виде развертки типа D (вдоль сварного соединения), на которых видны допустимые (не превышающие браковочного уровня) точечные дефекты, расположенные на границе валиков и провисание корня СС.

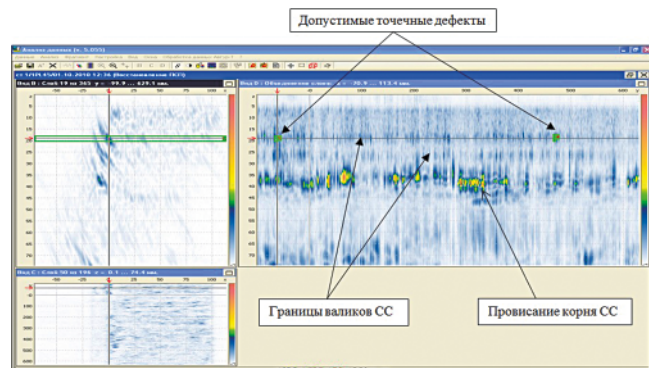


Рис. 2. Развертка типа D с индикациями дефектов

Обращает внимание четкая индикация валиков СС, которая свидетельствует о возможности достоверной локализации дефектов и достаточно высоком уровне чувствительности контроля. Установлено совпадение дефектов, выявленных по результатам ручного ультразвукового контроля, с дефектами, выявленными системой АВГУР-Т, по координатам их положения и по эквивалентным размерам с учетом погрешностей пересчета и измерения координат.

Хронометрированные работ, показало, что, выполнение АУЗК одного сварного соединения $\varnothing 508 \times 34$ не превышает 60 мин при возможности проведения других монтажных работ и обеспечении соблюдении мер безопасности для окружающих.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основное требование к системам ультразвукового контроля для обеспечения полноценной замены радиографического контроля сварных соединений ультразвуковым — автоматическая регистрация факта проверки данного сварного соединения, создание объективного документа, позволяющего установить факт и качество контроля данного сварного соединения и сохраняющего полученные результаты контроля. Оптимальное средство удовлетворения данного требования — компьютерная регистрация результатов контроля с автоматической регистрацией положения акустических преобразователей при сканировании.
 2. Не менее важное требование к системам ультразвукового контроля — повышение их информативности в тех областях, где радиационный контроль превосходит ультразвуковой, а именно:
 - 2.1. Обеспечение выявления небольших объемных дефектов типа пор и включений диаметрами не менее 1–2 мм.
 - 2.2. Повышение точности измерения размеров дефектов вдоль сварного шва и по его высоте с тем, чтобы погрешность не превосходила 1–2 мм.
 - 2.3. Повышение достоверности при определении характера дефектов по результатам контроля, более наглядное представление результатов.
 3. Перечисленным требованиям применительно к сварным соединениям толщиной более 10 мм удовлетворяют системы АУЗК с когерентной обработкой данных. При этом приборы с ФАР значительно превосходят своей мобильностью системы радиографии при контроле изделий толщиной до 40 мм. При толщинах объекта контроля более 40 мм или больших размеров характеристики и мобильность систем с обработкой данных методом SAFT имеет несомненные преимущества перед радиографией.
 4. Реальной замене радиационных методов контроля ультразвуковыми, даже после решения технических проблем, будут препятствовать такие обстоятельства, как трудности освоения компьютерных систем дефектоскопистами, привычка к использованию традиционного метода контроля.
3. ASME CASE 2235–4. Use of Ultrasonic Examination in Lieu of Radiography. December 23, 1996.
 4. <http://www.avek.ru/>
 5. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Использование волн дифракции для ультразвуковой дефектометрии в алгоритмах когерентного восстановления высококачественных изображений отражателей // В мире неразрушающего контроля, 2012, № 3 (57), с. 20–25.
 6. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. и др. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов. — М.: Машиностроение, 2008. — 368 с. 7.
 7. Контроль неразрушающий. Сварные соединения трубопроводов. Радиографический метод. ОСТ 102-51-85.
 8. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. ГОСТ 7512–82.
 9. В.Г. Щербинский. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. Тиссо, Москва, 2003. — 313 с.
 10. Вopilкин А.Х., Ромашкин С.В. Тихонов Д.С. Опыт применения автоматизированного ультразвукового контроля технологических трубопроводов из аустенитных сталей взамен радиографического контроля на примере строительства комплекса каталитического крекинга ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез». (В мире НК. Настоящий выпуск.)
 11. «Методика автоматизированного ультразвукового контроля стыковых сварных соединений технологических трубопроводов из сталей аустенитного класса с применением системы АВГУР-Т» (МА-ТД-НХ1-Т2С/26-К-10).
 12. ПБ 03-585-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов, 2003.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич А.К. Объективен ли метод радиографирования сварных соединений? В мире неразрушающего контроля 1999 № 3, с. 24.
2. Розина М.В. Ультразвук или радиография? В мире неразрушающего контроля 1999 № 3, с. 25.

Методическое обеспечение приборов ультразвукового контроля, использующих метод синтезированной апертуры

Methodological background of ultrasonic testing equipment using the method of synthetic aperture

Описаны общие принципы построения и проанализированы особенности методик автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений (СС) с использованием систем с когерентной обработкой данных серии АВГУР и приборов с фазированными антенными решетками. Рассмотрены методики контроля перлитных и аустенитных СС, разработанных ООО «НПЦ «ЭХО+». Приведены примеры практического использования методик. Даны основные характеристики методик контроля такие, как: рабочая частота, способы когерентной обработки данных, разрешающая способность и погрешность измерения реальных размеров и т.д.

Described the general principles of construction and analyzed aspects of the techniques of automated ultrasonic testing of welds using systems with coherent processing of data Augur series and devices with phased arrays. The techniques of perlitic and austenitic welds inspection, developed by "SPC "ECHO+" described. Examples of the techniques practical use are given. The main characteristics of the inspection methods: the operating frequency, the methods of coherent data processing, the resolution and the real dimensions measurement error, etc.

1. Введение

С 1990-х годов в ООО «НПЦ «ЭХО+» ведутся работы по созданию, изготовлению и эксплуатации систем автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) с когерентной обработкой данных серии АВГУР, в которых визуализация изображений несплошностей выполняется по алгоритму проекции в спектральном пространстве (ПСП), разновидностью метода синтезированной фокусированной апертуры FT-SAFT [1] (SAFT-дефектоскопы). Дальнейшим развитием систем серии АВГУР была, аттестованная в 2012 г., система АУЗК с использованием технологии антенных решеток АВГУР-АРТ [2]. В этом приборе объединены возможности когерентной визуализации с синтезированной апертурой, как при механическом, так и при электронном сканировании с применением метода C-SAFT — цифровой фокусировки антенны (ЦФА) — ЦФА-дефектоскоп. В тот же период были разработаны системы АУЗК, включающие в себя приборы с фазированными антенными решетками — ФАР-дефектоскопы.

Разработка и применение приборов АУЗК с когерентной обработкой данных требует специального методического и программного обеспечения, связанного с появляющимися дополнительными возможностями и особенностями выполнения АУЗК. Использование таких приборов дает воз-

можность перейти от традиционной ультразвуковой дефектоскопии к ультразвуковой дефектотометрии. Именно в этом случае проявляется значительная польза в их применении, хотя эти приборы значительно дороже и сложнее в использовании. При этом обеспечивается естественная связь между результатами дефектоскопии и прочностными расчетами, что приводит к увеличению надежности результатов прочностных расчетов реальных конструкций, содержащих дефекты [3].

С 1997 г. в ООО «НПЦ «ЭХО+» было разработано более 30 методик АУЗК, с использованием систем серии АВГУР. Из них 9 методик АУЗК с применением ФАР и ЦФА.

В настоящей статье приведены общие принципы построения методик контроля, проанализированы их особенности. Практически все рассматриваемые методики предназначены для УЗК различных сварных соединений.

2. Особенности SAFT-, ЦФА- и ФАР-дефектоскопов

Приборы АУЗК с когерентной обработкой данных имеют ряд характерных особенностей, которые оказывают свое влияние на содержание методик контроля как с точки зрения сбора данных, так и при их оценке. При этом надо иметь в виду, что и приборы, использующие SAFT-обработку и при-

боры с ФАР, по существу, регистрируют акустические радиосигналы в дискретных точках приемной апертуры, формирующих приемо-передающую антенную решетку. При этом у ФАР-дефектоскопов приемо-передающая антенная решетка выполнена в виде многоэлементного акустического преобразователя, а в SAFT-дефектоскопах такая решетка формируется путем механического перемещения одноэлементного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), по поверхности контролируемого объекта. В результате обработки зарегистрированных данных акустического поля, строится фокусированное акустическое изображение несплошностей и геометрических отражателей, связанных с отражением и дифракцией акустических волн. В ФАР-дефектоскопах обработка состоит в возбуждении элементов многоэлементного ПЭП (антенной решетки) выбранной амплитудой и заданными задержками, приеме и суммировании акустических сигналов с определенными задержками; в SAFT-дефектоскопах акустическое изображение строится путем расчета данных в соответствии с SAFT-алгоритмами получения изображений. В ЦФА-дефектоскопах, использующих технологию ЦФА, регистрация данных выполняется использованием антенных решеток (АР), а фокусированное изображение строится после C-SAFT обработки этих данных.

Таким образом, так как результаты контроля являются следствием обработки данных реальной или синтезированной антенной решетки, то они имеют одинаковые особенности как с точки зрения характеристик акустического изображения, так и его анализа.

Полученные акустические изображения имеют высокое разрешение как лучевом (определяется длиной используемых при контроле акустических импульсов), так и во фронтальном направлении (определяется длиной приемной апертуры антенной решетки). Разрешение составляет величину порядка длины звуковой волны. Вместе с тем, в SAFT- приборах фокусировка изображения выполняется сразу по всей области за счет использования алгоритмов SAFT (FT-SAFT, C-SAFT). При использовании ФАР-дефектоскопов обеспечивается фокусировка на заданной глубине, углу сканирования или по глубине на заданном расстоянии от ФАР. Крайне редко выполняется адаптивная фокусировка по всей области построения акустического изображения. Это связано с тем, что время получения изображения с адаптивной фокусировкой — велико.

Что касается, собственно, разрешения изображения, то наиболее высокое разрешение реализу-

ется на приборах, использующих SAFT — алгоритмы, т.к. оно определяется длиной апертуры перемещения ПЭП по поверхности контролируемого объекта. В ФАР-дефектоскопах апертура приема значительно меньше, так как определяется размером ФАР. Вместе с тем при контроле изделий толщиной до 60 мм выигрыш в разрешении для приборов с SAFT обработкой незначителен по сравнению с приборами, использующими ФАР, тогда как использование последних имеет значительные преимущества по удобству пользования и времени контроля.

Еще одна особенность изображений, полученных при использовании систем с когерентной обработкой данных, состоит в том, что за счет когерентной обработки отношение сигнал/шум существенно увеличивается [1]. В SAFT-дефектоскопах озвучивание контролируемой области изделия осуществляется широкоасимметричным акустическим пучком, а изображение строится виртуальным фокусированным пучком. При этом подавляются некоррелированные шумы, однако шумы, связанные с ложными изображениями от различных типов волн существуют, и требуется специальный анализ для их исключения из рассмотрения. Ситуация значительно улучшается когда используются ФАР. В этом случае для построения изображения используются только данные, полученные из рассматриваемой области контроля, так как только она озвучивалась и только из нее данные визуализировались. Еще лучше дела обстоят при использовании ЦФА-дефектоскопов, так как в них обеспечивает сплошная фокусировка во всей зоне контроля, учитываются различные схемы распространения УЗ волны с отражением от донной и наружной поверхностей объекта контроля, в том числе с трансформацией типа волны. Основные особенности приборов на основе технологий ФАР и ЦФА приведены, в обзоре [4].

В 1997 г. была разработана методика контроля сварных соединений (СС) трубопроводов и оборудования объектов атомной энергетики, использующая системы с когерентной обработкой данных серии «АВГУР» [5]. В ней были установлены основные положения для выбора параметров контроля, получения акустических изображений с высоким разрешением и способов оценки результатов контроля с определением реальных параметров выявленных дефектов.

Разработанные позже методики контроля СС в зависимости от особенностей контролируемых объектов целесообразно разделить на две группы, соответствующие контролю различных типов объектов: перлитных СС и СС с высоким уровнем структурных шумов (аустенитные, композитные).

3. Методики контроля перлитных сварных соединений

Для выполнения АУЗК перлитных СС с использованием приборов с когерентной обработкой данных в НИЦ «ЭХО+» было разработано и утверждено 10 методик. Из них 6 методик предполагают контроль с применением систем серии АВГУР (АВГУР 4.2, АВГУР 5.2, АВГУР-Т) и 4 методики используют приборы с ФАР (АВГУР-АРТ, Omniscan, и др.). Характеристики некоторых методик АУЗК перлитных СС приведены в табл. 1.

При контроле изделий большой толщины особое внимание обращается на обеспечение высокой разрешающей способности изображений зоны контроля, позволяющей определять реальные размеры выявленных несплошностей. Для этого требуется использовать виртуальную приемную апертуру А максимальных размеров. В частности для обеспечения средней фокусировки изображений выбранной области контроля длина фокуса виртуальной АР должны быть $0,37 \div 0,67$ размеров ближней зоны, где λ — длина УЗ волны. Этого вполне достаточно для получения акустических изображений с разрешением порядка $1 \div 2\lambda$, при использовании алгоритмов SAFT в системах серии Авгур.

В приборах АУЗК с ФАР приемная апертура определяется размерами антенной решетки и обычно невелика. Так как обеспечение акустического контакта для антенных решеток больших размеров (64 элемента и более) в практике эксплуатационного контроля весьма затруднительно, то, контроль требуемой зоны в объектах большой толщины обеспечивается за счет использования АР средних размеров (32 элемента) с рабочей частотой 5 МГц и нескольких проходов вдоль объекта контроля. В частности, при АУЗК сварного соединения приварки коллектора первого контура к патрубку Ду1200 парогенератора АЭС, для контроля всего сварного соединения требуется 19 проходов (с применением одной АР) или 10 проходов (с применением двух АР одновременно). В большинстве случаев используются призмы, позволяющие возбуждать поперечную волну в объекте контроля в диапазоне углов порядка 30° – 75° .

При значительных ограничениях на область сканирования в толстостенных объектах реализация высокого разрешения акустических изображений осуществляется за счет применения аппаратуры, использующей АР и трехмерную обработку данных ЦФА (3D-C-SAFT). Одним из таких объектов являются кольцевые СС паровых турбин, в которых необходимо выполнить поиск и определение параметров несплошностей, расположенных в СС включая его корень, по линии сплавления, в околошовной зоне

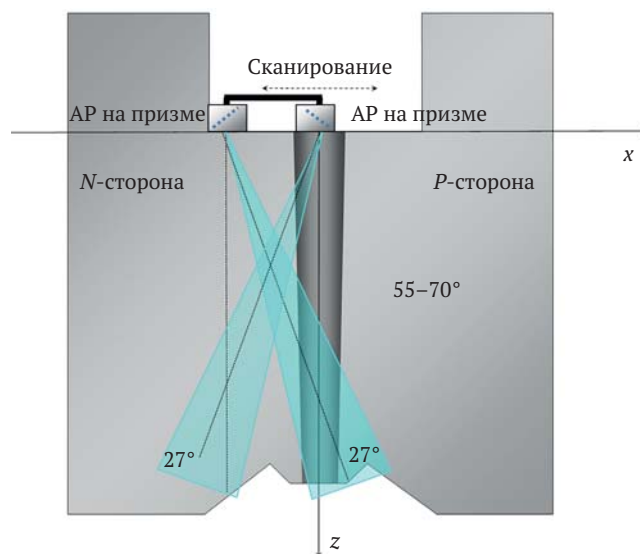


Рис. 1. Схема контроля кольцевого СС роторов паровых турбин

основного металла и в наплавке. Методика АУЗК имеет ряд особенностей, связанных с геометрией объекта контроля: большая глубина возможного залегания дефектов (до 195 мм) и небольшое место для расположения и перемещения акустических ПЭП — 120 мм (см. рис. 1). Такого свободного места слишком мало для получения качественных изображений. Учитывая эти факторы, были выбраны АР на частоту 5 МГц, установленные на призмы для возбуждения продольных волн, что дает возможность увеличить длину ближней зоны, выполнять контроль на малых углах ввода и обеспечить высокую чувствительность контроля. Чтобы получить достаточно высокое разрешение по всей области контроля, было необходимо иметь виртуальную АР максимальных размеров. Для этого в методике применяются «прореженные» 16-элементные АР, в которых расстояния между элементами составляли 1,8 мм, размещенные на призме. На рис. 1 приведена схема АУЗК СС роторов паровых турбин. В условиях ограниченной зоны доступа к СС, контроль выполняется одновременно двумя АР с углами ввода $\pm 27^\circ$. Безусловно, такие решетки не могут формировать достаточно качественные изображения в области контроля из-за малой приемной апертуры, поэтому осуществлялось одновременное перемещение призм с такими АР в направлении поперечном СС на все доступное расстояние — 40 мм. При этом формировалась виртуальная АР длиной до 70 мм, что вполне достаточно для получения акустических изображений с высоким разрешением. Данные с виртуальной АР когерентно обрабатывались в соответствии с алгоритмом 3D-C-SAFT. Кроме того для улучшения качества изображения и увеличения надежности распознавания типа дефектов используется алгоритм MULTI-C-SAFT [6],

Табл. 1. Методики АУЗК перлитных СС

№	Объект контроля	Толщина Области контроля, мм	Частота, МГц	Способ обработки данных	Размеры апертуры поперек СС/ типы волн	Прибор АУЗК	Примечания
1	СС узла приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам Ø 1200 мм парогенераторов АЭС	До 72,5 мм	2,5 ± 0,2	2D-ПСП	115 мм/ поисковый режим: <i>L</i> -волны 0°, <i>S</i> -волны 40°, 50° и 55° измерительный режим: <i>S</i> -волны 45° и 55°	Системы АВГУР 5.2	Выявление: ≥ 3,5 мм ² , условная <i>L</i> > 10 мм; Измерение: <i>L</i> > 10 мм, <i>h</i> > 2 мм
			5 ± 0,5	ЦФА, ФАР	20 мм/ 32-элементные АР с призмами на <i>S</i> -волны, углы ввода 45° и 50°, диапазон углов качания луча 15°±85°.	Системы, с ФАР: OmniScan MX, Harfang X-32, АВГУР-АРТ	Погрешность измерения: Для <i>L</i> ±10 мм и для <i>h</i> ±2 мм
2	Кольцевые СС корпусов реакторов гидрокрекинга Ø 5920 мм	70 ÷ 210 мм	2,5 ± 0,25	2D-ПСП, 3D-ПСП	135 ÷ 335 мм (в зависимости от толщины)/ <i>S</i> -волна 40°, 55°, 70°	АВГУР-Т	Выявление: ≥ 2,5 мм ² , Погрешность измерения: <i>L</i> ± 2 мм и <i>h</i> ± 2 мм
3	Кольцевые СС Ø 1020÷2482 мм роторов паровых турбин	150 ÷ 195 мм	5,0 ± 0,5	3D-C-SAFT, MULTI-C-SAFT	70 мм/ 2×16-элементные АР с призмами на <i>L</i> -волны, углы ввода 0° и 27°	АВГУР-АРТ	Выявление: ≥ 15 мм ² Разрешающая способность: Лучевая — 3 мм Фронтальная — 3 мм (не зависит от глубины)
4	Кольцевые СС Ø > 100 мм и продольные СС Ø > 100 мм газо- и нефтепроводов	5 ÷ 40 мм	2,5; 5	2D-ПСП	35 ÷ 110 мм/ <i>L</i> -волны 0°, <i>S</i> -волны 55°, 60°, 65°, 70° в зависимости от толщины изделия	Системы серии АВГУР	Выявление: ≥ 1 мм ² , Погрешность измерения: <i>L</i> ± 5 мм и <i>h</i> ± 1,5 мм, Обзорный режим: контроль прямым и однократно отраженным от донной поверхности лучом.
5	Продольные и кольцевые СС труб и обечаек Ø 426 ÷ 1420 мм	6 ÷ 40 мм	5,0 ± 0,5	ЦФА, MULTI-C-SAFT	12 мм/ 16-элементная АР с призмами на <i>S</i> -волны угол ввода 38°, диапазон углов качания луча 35° — 75°.	АВГУР-АРТ	Выявление: ≥ отражательной способности сквозного перпендикулярного цилиндрического отверстия диаметром 3 мм.
6	СС и основной металл (ОМ) сварных тройников с накладками	8 ÷ 40 мм	1,2 ± 0,12 (контроль ОМ); 2,5 ± 0,5; 5 ± 0,5 (контроль СС)	3D-ПСП	35 ÷ 110 мм/ <i>S</i> -волна 60° (контроль ОМ); <i>S</i> -волна 50°, 65°, 70°, <i>L</i> -волна 0° (контроль СС)	АВГУР-Т	Выявление 0,35 мм ² ÷ 1,75 мм ² в зависимости от толщины изделия <i>L</i> ≥ 0,5 толщины Контроль СС «патрубок-обечайка» — удаленный ввод акустического пучка (до 300 мм) эхо-методом с волноводным распространением УЗ Погрешность измерения размеров несплошностей не устанавливается

L и *h* — длина и высота несплошности, мм

L- и *S*- волны — продольные и сдвиговые акустические волны

в котором при построении изображения учитываются различные схемы распространения акустических волн с учетом преобразования волн, отражений от границ объекта.

Для ускорения регистрации данных, сканирование выполнялось в 2 режимах: обзорный — сканирование вдоль СС и, в областях предполагаемого залегания дефектов, — измерительный, со сканированием по меандру вдоль и поперек СС. Пример полученных высококачественных изображений области контроля СС толщиной 150 мм и околошовной зоны, содержащей многочисленные допустимые несплошности, представлен на рис. 2.

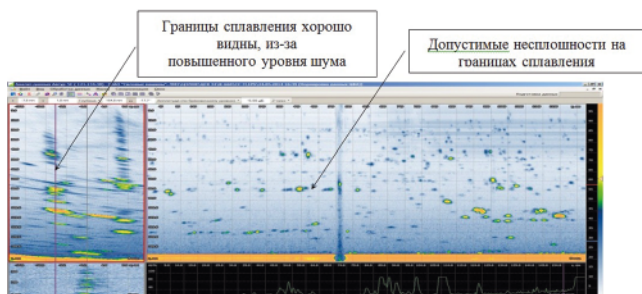


Рис. 2. Изображение области СС и околошовной области зоны ротора паровой турбины, полученное после 3D-C-SAFT обработки данных

При контроле объектов меньшей толщины достаточно просто получить высокую разрешающую способность и достаточную чувствительность контроля. Однако из-за малой толщины объекта и низкого затухания значительно большее значение приобретают эхосигналы, связанные с их отражением и преобразованием волн от геометрических особенностей объекта. В этом случае большое влияние приобретает квалификация дефектоскописта, оценивающего и интерпретирующего результаты контроля по полученным данным и акустическим изображениям. Это также относится к результатам АУЗК, полученным системами, использующими SAFT-обработку. Указанная проблема в значительной мере решается при использовании систем с ФАР. Особенно успешные результаты, получены при использовании системы АВГУР-АРТ, в которых используется ЦФА-обработка и алгоритмы MULTI-C-SAFT. Часто контроль объектов малой толщины затруднен из-за ограничений доступа к поверхности для сканирования (наличие валиков усиления, конусных переходов), что приводит к разнообразным, иногда взаимоисключающим, требованиям к сканирующим устройствам. С этой точки зрения системы с ФАР или ЦФА имеют ряд преимуществ из-за большей компактности и электронной и механических частей системы.

Значительную проблему представляет контроль изделий, в которых возможно только удаленное

введение акустических волн на большом расстоянии от зоны контроля. Примером такого объекта является внутренние СС тройников с накладками в ОАО «Газпром». В методике АУЗК [7] для таких объектов применяется эхо-метод с использованием эффекта волноводного распространения акустических волн с многократным отражением от внутренней и внешней поверхностей основного металла патрубка и обечайки тройника (до 300 мм). Обработка данных выполняется по алгоритму трехмерного ПСП (3D-ПСП) [8], что позволяет вместе с высоким разрешением изображения обеспечить высокий уровень чувствительности системы контроля. Эти функции реализованы с применением системы АВГУР-Т.

Для удовлетворения действующих норм оценки качества по эквивалентным площадям требуется выравнивать чувствительность во всем диапазоне углов и глубин контроля. Для этого может применяться встроенное в дефектоскоп выравнивание чувствительности, или же рассчитанные заранее матрицы пространственной регулировки чувствительности или двухмерные АРД диаграммы [8, 9].

Вместе с тем, сам принцип регистрации 100% исходных данных и визуализации всего сечения объекта контроля позволяет, при оценке качества объекта, рассматривать высоту и протяженность несплошности, даже если амплитуда эхосигналов не достигает уровня фиксации, определенного действующими нормативными документами. Это особенно важно при допуске в эксплуатацию объектов контроля, в которых не должны содержаться трещины.

Основные принципы анализа данных, полученных системами с синтезированной апертурой изложены в [10] и нашли свое отражение в аттестованных методиках контроля.

4. Методики контроля изделий с высоким уровнем структурных шумов

Одним из серьезных преимуществ систем с когерентной обработкой данных является их способность подавлять различные типа шумов (электронных, структурных). Поэтому особенно эффективно их использование для АУЗК объектов с высоким уровнем структурных шумов таких, как аустенитные и композитные (перлит-аустенит) сварные соединения трубопроводов и оборудования АЭС. В НПЦ «ЭХО+» разработано 12 методик АУЗК композитных и аустенитных СС с использованием систем серии Авгур и 5 методик с использованием систем с ФАР. Характеристики некоторых методик АУЗК СС приведены в табл. 2.

Основные трудности УЗК таких изделий связаны с повышенным уровнем акустических шумов в ау-

стенитных материалах, из-за «зернистой», дендритной структуры этих материалов, связанных с отражением и рассеянием акустических волн на границах зерен. Последнее приводит к увеличению уровня акустического структурного шума и затрудняет условия формирования эхосигналов. Кроме того при разработке методики необходимо учитывать частотную зависимость поглощения УЗ в аустените для различной ориентации зерен аустенита [11], что приводит к необходимости понижения используемых ультразвуковых частот, применению продоль-

ных и сдвиговых волн для обеспечения надежного выявления дефектов по всей области контроля.

Существует еще одна проблема при ультразвуковом контроле: анизотропия распространения акустических волн в этих материалах. Значительную роль в этом явлении играет столбчатая макроструктура швов, которая приводит к анизотропности механических и акустических свойств и серьезно сказывается на распространении акустических волн.

Распространение акустической волны может сильно отличаться от прямолинейного. Причем

Табл. 2. Методики АУЗК аустенитных и композитных СС

№	Объект контроля	Толщина области контроля	Частота, МГц	Способ обработки данных	Размеры апертуры поперек СС/ типы волн	Прибор АУЗК	Примечания
1	Композитные СС переходного кольца и патрубка парогенератора Ø 1225 мм	70 мм	1,8 ± 0,2	2D-ПСП	До 75 мм/ S- волна 45° L-волна 45°, 55°, 70°, 75°	Системы АВГУР 5.2	Выявление: ≥ 15 мм ² , условная L > 15 мм Погрешность измерения высоты составляет ±6 мм в 95% доверительном интервале
2	Аустенитные СС Ø 620 приварки втулки к патрубку	переменная от 32 мм до 70 мм	1,8 ± 0,2	2D-ПСП	140 мм/ S-волна 45°, 70° L-волна 45°, 70°	Системы АВГУР 5.2	Выявление: ≥ 15 мм ² , условная L > 15 мм Погрешность измерения размеров несплошностей не устанавливается
3	Аустенитные СС приварки патрубков трубопроводов Ø 585 мм к корпусам ГЗЗ	50 ÷ 85 мм	1,8 ± 0,18	2D-ПСП	115 мм, 0 мм/ Поисковый режим L-волны 20°, 30°, 45°, 55°, 75°, головная Измерительный режим L-волны 20°, 30°, 45°	Системы АВГУР 5.2	Выявление: ≥ 25 мм ² , условная L > 30 мм Погрешность измерения размеров несплошностей не устанавливается Контроль: прямым лучом — без сканирования и одно — трехкратно отраженным от свободных поверхностей лучом при сканировании.
4	Композитные СС Ø 400 мм патрубков сброса пара и впрыска с патрубками компенсатора давления	До 93 мм	1,8 ± 0,2	2D-ПСП	100 мм/ Поисковый и измерительный режим L-волны 45°, 55°, 70°, головная	Системы АВГУР 5.2	Выявление: ≥ 15 мм ² , условная L > 15 мм Погрешность измерения размеров несплошностей не устанавливается
			5 ± 0,5	ФАР, ЦФА	32 мм/ 32-элементные АР с призмой на S-волны, угол ввода 45°, диапазон углов качания луча 10° ÷ 85°	Системы, с ФАР: OmniScan MX, Harfang X-32, АВГУР — АРТ	Выявление: Несплошности ≥ по отражающей способности отв. бок. сверл. Ø 3. Погрешность измерения размеров несплошностей не устанавливается

№	Объект контроля	Толщина области контроля	Частота, МГц	Способ обработки данных	Размеры апертуры поперек СС/ типы волн	Прибор АУЗК	Примечания
5	Аустенитные кольцевые СС Ø 325 мм	12 ÷ 16 мм	2,5 ± 0,25 4 ± 0,4 5 ± 0,5	ПСП	50 мм/ поисковый режим и измерительный режим: совмещенные ПЭП S-волны 70°, L-волны 70° или 2х-элементные S-волны 70° и L-волны 70°	Системы серии АВГУР	Выявление: L > 10 мм, h > 1,5 мм Погрешность измерения: Для L ± 10 мм и для h ± 2 мм
			2,25 ± 0,2 5 ± 0,5	ЦФА, ФАР	16 ÷ 20 мм/ 16–32 элементные АР с призмами на S-волны (угол ввода 52° и 60°, диапазон углов качания луча 40° ÷ 80°).	Системы, с ФАР: OmniScan MX, Harfang X-32, АВГУР-АРТ	Выявление: Несплошности ≥ по отражающей способности паза L ≥ 25 мм и h ≥ 2 мм Измерение: L > 10 мм, h > 2 мм Ср. погрешность измерения: Для L = 10 мм и для h = +0,7 мм
6	Аустенитные СС трубопроводов Ø 560 мм	32 мм	2,5 ± 0,25	2D-ПСП	60 мм/ S- и L- волны, 45°, 60° — поисковый и измерительный режимы L-волны, 0° — поисковый режим	Системы АВГУР 5.2	Выявление: ≥ 15 мм ² , условная L > 30 мм Погрешность измерения размеров несплошностей не устанавливается
7	Аустенитные СС трубопроводов турбинного отделения АЭС Ø 159 ÷ 1220 мм	6 ÷ 12 мм	4 ± 0,4, 5 ± 0,5	2D-ПСП	65 мм/ L-волны 70°, S-волны 70°	Системы серии АВГУР	Выявление: ≥ 3,5 мм ² , условная L > 10 мм Размеры несплошностей не определяются Используется только поисковый режим
8	Композитные СС дыхательных трубопроводов компенсатора давления Ø 426 мм	40 мм	1,8 ± 0,2	2D-ПСП	75 мм/ Поисковый и измерительный режим L-волны 45°, 55°, 70°, головная	Системы АВГУР 5.2	Выявление: ≥ 15 мм ² , условная L > 10 мм Погрешность измерения размеров несплошностей не устанавливается
			5 ± 0,5	ФАР, ЦФА	32 мм/ 32-элементные АР с призмой на S-волны, угол ввода 45°, диапазон углов качания луча 10° ÷ 85°	Системы, с ФАР: OmniScan MX, Harfang X-32, АВГУР-АРТ	Выявление: Несплошности ≥ по отражающей способности отв. бок. сверл. Ø 3 мм. Погрешность измерения размеров несплошностей не устанавливается

№	Объект контроля	Толщина области контроля	Частота, МГц	Способ обработки данных	Размеры апертуры поперек СС/ типы волн	Прибор АУЗК	Примечания
9	Аустенитные СС трубопроводов впрыска и сброса компенсатора давления Ø 219÷273 мм	17 ÷ 19 мм	4 ± 0,4, 5 ± 0,5	2D-ПСП	70 мм/ Поисковый и измерительный режим S и L-волны 70°	Системы АВГУР 5.2	Выявление: L ≥ 10 мм h ≥ 1,5 мм Погрешность измерения: L ± 10 мм и h ± 2 мм
			5 ± 0,5	ФАР, ЦФА	32 мм/ 32-элементные АР с призмой на S-волны, угол ввода 45°, диапазон углов качания луча 45°÷85°	Системы, с ФАР: OmniScan MX, Harfang X-32, АВГУР-АРТ	Выявление: Несплошности ≥ по отражающей способности отв. бок. сверл. Ø 3 мм. Погрешность измерения размеров несплошностей не устанавливается
10	СС, полученные методом горячего изостатического прессования (НИР)	130 мм	5 ± 0,5	3D-ПСП с ФАР	До 300 мм (по всей доступной плоскости)/ 32-элементная АР на плоско-параллельной задержке, диапазон качания луча продольной волны ±70	Harfang Veo + двухкоординатный сканер	Выявление: Несплошности ≥ по отражающей способности плоскостному отверстию Ø 2 мм, несплошности превышающие по любому из измерений 1 мм Погрешность измерения: Длина по двум осям ±2 мм, высота — не нормируется

L и h — длина и высота несплошности, мм

L- и S- волны — продольные и сдвиговые акустические волны

степень искривления может существенно зависеть от угла и глубины ввода акустического пучка. Аналогичное явление наблюдается и вдоль СС. Экспериментальные исследования [12] показали, что в реальных СС такое отклонение значительно и может привести к ошибкам определения реальных размеров и координат дефектов. В частности, при контроле продольными волнами и длине акустического пробега около 40 мм по аустениту, возможна ошибка измерения параметров дефекта до 6 мм, а сдвиговыми — до 11 мм. Поэтому, погрешность измерения параметров, например, высоты дефектов, локализованных так, что зондирующие УЗ импульсы не проходят через аустенитный шов будет порядка $1 \div 2\lambda$ (около $\pm 2 \div 3$ мм). Тогда как, если зондирующие УЗ импульсы распространяются через аустенитный шов, погрешность возрастет до ± 6 мм и более, в зависимости от глубины.

Поэтому, в большинстве методик, разработанных для контроля аустенитных и композитных СС, погрешность измерения размеров не устанавливается (см. табл. 2). Вместе с тем, материала сопоставления

результатов УЗК и металлографии реальных объектов мало, что также не позволяет установить погрешность измерений по данным реального контроля. Исключение составляет методика АУЗК, предназначенная для контроля кольцевых аустенитных СС диаметром 325 мм для которых имеется большое число измерений длины с высоты плоскостных дефектов, полученных по результатам металлографических исследований и измерений системами серии АВГУР и системами с ФАР. Для систем серии АВГУР погрешность измерения размеров составляет ± 2 мм — для высоты дефекта и ± 10 мм — для его длины; для систем с ФАР погрешность измерения размеров составляет $+0,7$ мм — для высоты дефекта и ± 10 мм — для его длины. В том случае, если несплошность и область ввода акустического пучка расположены по разные стороны от СС, погрешность определения размеров дефектов не устанавливается.

Для контроля изделий большой толщины в системах серии АВГУР используются раздельно-совмещенные ПЭП продольной волны или двухмодовые ПЭП (продольная и поперечная волна)

частотой 1,8 МГц [13], что обеспечивает высокую чувствительность контроля и, за счет большой приемной апертуры (100 ÷ 115 мм), получение акустических изображений с высоким разрешением. Также применяются ПЭП головной волны, которые позволяют обеспечить хорошее выявление дефектов практически во всем сечении объекта контроля, однако показывают не лучшие результаты при измерении высоты [14].

Использование приборов с ФАР позволяет успешно использовать для контроля продольную волну и более высокие частоты (4–5 МГц) за счет того, что в таких приборах облучение заданной области объекта контроля выполняется фокусированным акустическим пучком и за счет короткого зондирующего импульса. Желательно применение призм и антенных решеток, позволяющих реализовать раздельно-совмещенную схему прозвучивания, использующую продольную волну (TRL — схема).

При толщинах объектов менее 30 мм в системах серии АВГУР, в основном, используются акустические волны частотой 2,5 МГц; в системах с ФАР — частоты 5 МГц, контроль ведется как на продольных так и на поперечных волнах.

Необходимо учитывать, что в разнородных сварных соединениях характерными дефектами являются трещины по границе сплавления разнородных металлов. В этом случае для более полной оценки ориентации и высоты трещины используются поперечные волны при возможности доступа со стороны перлитной части.

Для выравнивания чувствительности по всей зоне контроля используется или встроенная в дефектоскоп функция (для малых толщин до 20 мм) или, что предпочтительно, в настроечном образце изготавливаются отражатели в нескольких зонах и при анализе выявленных несплошностей их отражательная способность сравнивается с отражательной способностью эталонного отражателя в той же зоне контроля.

Особо рассмотрим случай с применением алгоритмов с синтезированной апертурой для АУЗК сварных соединений, полученных методом горячего изостатического прессования [15]. Это — пример применения ФАР-дефектоскопа с 32 элементной АР на частоту 5 МГц, имитирующего 15 одноэлементных фокусирующих ПЭП с разными углами ввода, данные с которых при двумерном сканировании обрабатываются совместно методом 3D-ПСП. Такой подход позволил обеспечить очень высокое качество изображений на глубинах более 140 мм в сварном соединении из аустенитных материалов, применяя простой 16-ти канальный ФАР-дефектоскоп. Для примера, на рис. 3 приведены результа-

ты визуализации плоскодонных отражателей диаметром 2 мм на глубинах 100 мм и 150 мм, а также заложенного на границе сплавления диска диаметром 5 мм. Можно видеть, что помимо самих отражателей прописывается геометрия отверстий для плоскодонных отражателей и стенка образца.

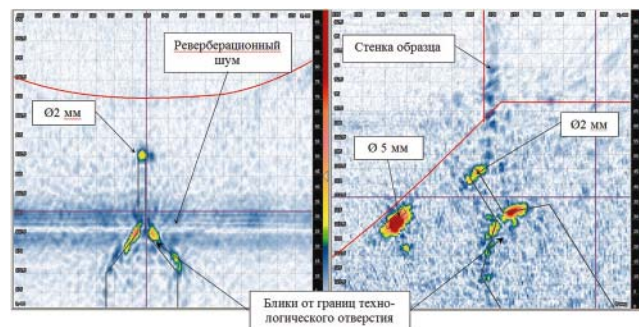


Рис. 3. Визуализация искусственных отражателей на глубинах 100–150 мм в образце из аустенитных материалов

5. Заключение

Таким образом, рассмотренные методики, основанные на применении метода синтезированной апертуры, позволяют:

- получать максимально детализованную информацию о сечении объекта контроля за счет восстановления акустических изображений с высоким разрешением,
- проводить оценку типа, размеров и координат несплошностей,
- обеспечить контроль аустенитных сварных соединений.

Краткие общие требования к аппаратуре и особенности методик можно сформулировать следующим образом:

1. Для контроля перлитных объектов:
 - Для объектов толщиной менее 70 мм целесообразно использовать ФАР- или ЦФА-дефектоскопы.
 - Для толстостенных объектов (более 70 мм) применяется двухкоординатный сканер, обеспечивающий перемещение нескольких ПЭП или АР с шагом 0,3–0,5 мм для SAFT- и ЦФА-дефектоскопов.
 - Для использования ЦФА-дефектоскопа с механическим сканированием, требуется мощный компьютер для обработки полученных данных.
 - Использование MULTI-C-SAFT для объектов толщиной менее 40 мм дает возможность учесть одно или нескольких отражений от дна; при этом желательно измерять толщину как минимум в околошовной зоне одновременно с выполнением контроля.
 - При контроле используются, в основном, сдвиговые волны.

- Применяются АР с 16–32 элементами, на частоты не менее 5 МГц.
 - Целесообразно использование функции выравнивания чувствительности по всей зоне контроля.
 - Погрешность измерения высоты несплошностей составляет $1 \div 3 \lambda$ в зависимости от глубины залегания и материала объекта контроля.
 - Погрешность изменения протяженности несплошностей при условии корректной обработки данных сопоставима с шириной пластины ПЭП (АР) вне зависимости от глубины залегания.
2. Для контроля изделий с высоким уровнем структурных шумов:
- При толщинах объектов менее 30 мм в системах серии АВГУР, в основном, используются акустические волны частотой 2,5 МГц; в системах с ФАР — частоты 5 МГц, контроль ведется как на продольных так и на поперечных волнах.
 - Подавление реверберационных шумов высокого уровня выполняется либо за счет SAFT-обработки с применением SAFT-дефектоскопов, либо за счет нескольких проходов вдоль сварного соединения для ФАР-дефектоскопов.
 - Погрешности измерения высоты несплошностей существенно зависят от положения несплошностей относительно наплавленного металла.
 - Настройка чувствительности выполняется на настроечных образцах, сваренных по соответствующей технологии, желателен вырезанный из реального объекта контроля.
 - Рекомендуются применение слабо направленных отражателей (боковые отверстия) или отражателей, имитирующих наиболее опасные несплошности — пазы и сегментные отражатели.
 - Необходимо выполнить предварительную оценку контролепригодности изделия по результатам выявления эталонных отражателей в настроечных образцах и в контролируемых объектах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. и др. Ультразвуковая дефектometрия металлов с применением голографических методов/под. ред. А.Х. Вopilкина. М.: Машиностроение, 2008–368 с.
2. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Коколев С.А., Кузнецов К.А., Козлов В.Л., Тихонов Д.С., Штерн А.М. Система автоматизированного контроля АВГУР-АРТ — от искусства новых возможностей к практической диагностике. /Статья в этом номере/.
3. Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х. 25-ти летний опыт диагностики сварных соединений объектов повышенной опасности системами Авгур. /Статья в этом номере/.
4. Базулин Е.Г. Сравнение изображений, восстановленных ФАР- и ЦФА-дефектоскопами. /Статья в этом номере/.
5. Ультразвуковой экспертный контроль сварных соединений трубопроводов и оборудования АЭС с применением компьютерных голографических систем серии «АВГУР». Общие методические положения. (МЭ-ОМП-98).
6. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Использование волн дифракции для ультразвуковой дефектometрии в алгоритмах когерентного восстановления высококачественных изображений отражателей // В мире неразрушающего контроля, 2012, № 3 (57), с. 20–25.
7. Ромашкин С.В., Тихонов Д.С. Опыт применения системы АВГУР-Т на объектах нефтегазовой отрасли промышленности // В мире неразрушающего контроля, 2010, № 1 (47), с. 30–34.
8. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. и др. Применение трехмерной когерентной обработки в ультразвуковом контроле. — Дефектоскопия, 2014, № 2, с. 46–64
9. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Оценка несплошностей металла ультразвуковым дефектоскопом с цифровой фокусировкой антенной решетки. В мире НК. № 2, 2013, с. 8–13.
10. Бадалян В.Г. Оценка результатов контроля по акустическим изображениям. — Дефектоскопия, 2007, № 4, с. 39–58.
11. M.-A. Ploix, Philippe Guy, R. El Guerjouma et al, Attenuation Assessment for NDT of Austenitic Stainless Steel Welds. // Proc. 9 ECNDT 2006 — Tu.2.2., Berlin
12. Алешин Н.П., Вадковский Н.Н., Волкова Н.Н. Ультразвуковой контроль аустенитных сварных швов: анализ способов и рекомендации по повышению надежности // Дефектоскопия. 1988. № 2. С. 43–59
13. Бадалян В.Г., Самарин П.Ф., Тихонов Д.С. АУЗК сварных соединений оборудования АЭС с применением систем «Авгур 5.2» // В мире неразрушающего контроля, 2010, № 1 (47), с. 24–27.
14. Базулин Е.Г., Базулин А.Е., Коваль Д.А., Тихонов Д.С. Ультразвуковой контроль толстостенных аустенитных сварных соединений с узкой разделкой в рамках проекта ИТЕР. В мире НК, 2009, № 4 (46), с. 30–35.
15. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Гурьева Т.М., Коколев С.А., Использование ультразвуковых дефектоскопов с фазированной антенной решёткой для регистрации эхосигналов с целью восстановления изображения отражателей методом проекции в спектральном пространстве. — Дефектоскопия, 2014, № 6, с. 3–15.

Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решётками

Improved reliability of ultrasonic inspection.

Part 1: Determine the type of discontinuity flaws during ultrasonic testing using antenna arrays

Статья посвящена вопросам практического применения метода цифровой фокусировки антенной решётки. При восстановлении изображения отражателей метод позволяет учесть физические свойства объекта контроля — его геометрию, анизотропию упругих свойств и особенности отражения ультразвуковых волн на отражателях для получения множества парциальных изображений. Рассмотрены примеры применения методов обработки позволяющих получить эффект сверхразрешения. Анализ множества парциальных изображений повышает информативность и достоверность ультразвукового контроля.

The article is devoted to the practical application of the method of digital focusing antenna array. Method in image reconstruction reflectors, allows to take into account the physical properties of a control object — its geometry, the anisotropy of the elastic properties and peculiarities the reflection of ultrasonic waves on the reflector to produce the set of partial images. Application txamples of methods for provide a superresolution effect. Analysis of the set of partial images improves informativity and reliability of ultrasonic testing.

Введение

Одной из ключевых проблем ультразвукового контроля остаётся проблема классификации обнаруженных несплошностей. Известные попытки решить эту проблему подбором какой-либо конфигурации излучения и приёма, учитывающей отражения и преобразования типов волн, в лучшем случае дают возможность решить задачу для специальных случаев. В статье вкратце рассмотрена модификация алгоритма Combined Synthetic Aperture Focusing Technique (C-SAFT), позволяющая получать множество парциальных изображений одной области объекта контроля сформированные различными конфигурациями излучения-приёма элементов двух встречно направленных антенных решёток. Описан алгоритм максимальной энтропии (ММЭ), который может использоваться как для обработки отдельных эхосигналов с целью достижения сверхразрешения, так и для обработки набора эхосигнала для получения изображения отражателей. Чаще всего априорно известная информация о физических свойствах объекта, таких как его внутренняя геометрия (например, толщина, конусные переходы), различные упругие свойства двух соединённых материа-

лов (например, разнородные сварные соединения) или анизотропия этих свойств в области контроля, может быть корректно учтена при восстановлении изображения отражателей. При этом его информативность существенно повышается, так как удаётся получить изображения с более высокой разрешающей способностью с низким уровнем шума и с ложными бликами, имеющих малую амплитуду. Предлагаемый подход открывает целый ряд новых возможностей в решении различных задач контроля, в том числе задачи определения типа несплошности. Приведены примеры применения данных алгоритмов с анализом восстановленных изображений.

Первая часть статьи посвящена проблеме получения высококачественного изображения несплошностей при учёте геометрии объекта контроля и его анизотропных свойств. Вторая часть статьи посвящена проблеме повышения отношения сигнал/шум изображения отражателей, в том числе и при контроле объектов с высоким уровнем структурного шума.

Рассмотренные технологии контроля реализованы в новом многоканальном дефектоскопе с цифровой фокусировкой АВГУР-АРТ, с помощью

которого и получены приведённые в данной статье примеры изображений.

Корреляционный метод восстановления изображения отражателей

Решение обратной задачи рассеивания заключается в том, чтобы по известным источникам поля $q(r_t, t)$, расположенным в области S_t , и по измеренному в области S_r рассеянному полю $p(r_r, t)$, найти функцию $\varepsilon(r)$, описывающую отражающие свойства неоднородности в области S . Один из методов оценки функции $\varepsilon(r)$ заключается в корреляционной обработке измеренного поля $p(r_r, t)$. Запишем формально решение прямой задачи, то есть расчёт рассеянного поля $p(r_r, t) = p(r_r, t; r_t)$ по известным функциям $q(r_t, t)$ и $\varepsilon(r)$, в следующем виде:

$$p(r_r, t) = P(r_r, \varepsilon(r), q(r_t, t)). \quad (1)$$

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

$$\hat{\varepsilon}(r_i) = \iint_{S_t} \iint_{S_r} p(r_r, t) G(r_r, r_i, r_t) dr_r dr_t dt, \quad (2)$$

$$G(r_r, r_i, r_t) = P(r_r, \delta(r - r_i), q(r_t, t)).$$

Функция $G(r_r, r_i, r_t)$ зависит от формы излучённого импульса $s(t)$ и должна учитывать эффекты отражения, преломления и трансформации типов волн, анизотропии акустических свойства материалов, затухания звука, наличия нескольких областей с разными акустическими свойствами. Чем точнее удастся решить прямую задачу (1) на основе выбранного варианта описания процесса излучения, распространения и рассеивания ультразвуковой волны, тем больше объектов контроля, в которых можно восстанавливать высококачественные изображения отражателей. Смысл функции $\varepsilon(r)$, которую иногда называют рассеивающим потенциалом, зависит от типа решаемой задачи.

При проведении ультразвукового контроля с использованием антенных решёток можно регистрируются эхосигналы, излученные и принятые всеми парами элементов антенной решётки. Такой режим регистрации эхосигналов будем называть режимом двойного сканирования.

Под акустической схемой, которую обозначим как as , будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса при отражении его от границ объекта контроля с учётом трансформации типа волны. Для описания акустических схем будем пользоваться следующими обозначениями: буквой **T** будем обозначать такое событие, как преломление на поверхности или отражение от поверхности, а буквой **B** будем обозначать отражение от дна; тип волны после события

будем обозначать буквами L (продольная), S (поперечная) и R (Рэлеевская). Запись T(S)–T(L) обозначает обычный прямой луч на поперечной волне при излучении и с приёмом на прямом луче, но уже продольной волны. Схема TB(LL)–TB(T(SSS)) описывает ситуацию, когда при излучении анализируются лучи однократно отраженные на продольной волне, а при приёме — двукратно отраженные на поперечной волне. Схема TT(LS)–TB(SS) описывает ситуацию, когда при излучении вдоль поверхности распространяется головная волна, которая порождает боковую волну, а при приёме рассматривается только однократно отраженная поперечная волна. Обычно функцию $s(t)$ заменяют на $\delta(t - t_{\max})$, где t_{\max} — время нарастания импульса, и выбирают одну акустическую схему. В этом случае выражение (2) трансформируется в формулу описывающую метод C-SAFT [1]:

$$\hat{\varepsilon}(r_i; as) = \int_{S_t} \int_{S_r} p(r_r, t - t_{\text{del}}(r_r, r_i, r_t, as) + t_{\max}) dr_r dr_t, \quad (3)$$

где $t_{\text{del}}(r_r, r_i, r_t; as)$ — время пробега импульса от излучателя до точки r_i и к приёмнику для заданной акустической схемы as . Для расчёта времени пробега импульса по лучевой траектории можно воспользоваться вариационным принципом Ферма [2].

Если антенная решётка перемещается N_w раз по поверхности объекта контроля, то добавив когерентное суммирование изображений, восстановленных для каждого положения антенной решётки, можно получить объединённое (итоговое) изображение отражателей с ещё более высокой фронтальной разрешающей способностью по формуле:

$$I(r_i; as) = \left| \sum_{w=1}^{N_w} \hat{\varepsilon}(r_i, r_w; as) \right|, \quad (4)$$

где r_w — вектор определяющий положение антенной решётки. Режим регистрации эхосигналов в режиме двойного сканирования при перемещении антенной решётки назовём режимом тройного сканирования. Поэтому метод (4) сокращённо можно обозначить как TS-C-SAFT (аббревиатура TS означает режим тройного сканирования).

Метод формирования изображения по списку акустических схем $L_{as} = \{as\}_{N_{as}}$ рассмотрен в статье [3] и назван в ней методом M-C-SAFT (аббревиатура M указывает на использование многих акустических схем). Он представляет собой упрощённый вариант корреляционной обработки (4), когда формируются множество парциальных изображений $\varepsilon(r_i, r_w; as_n)$ для антенной решётки в точке определяемой вектором r_w . В работах [4, 5] также рассматривается проблема получения изображения по нескольким акустическим схемам. Опыт работы с алгоритмом M-C-SAFT показывает, что итоговое

изображение отражателя лучше получать как сумма модулей парциальных изображений:

$$I(r_i; r_w) = \sum_{n=1}^{N_m} \left| \hat{\varepsilon}(r_i, r_w; as_n) \right|. \quad (5)$$

И, наконец, если измерения проведены в режиме тройного сканирования, то итоговое изображение отражателя можно восстановить с учётом формулы и следующим образом:

$$I(r_i) = \sum_{n=1}^{N_{as}} \left| \sum_{w=1}^{N_w} \hat{\varepsilon}(r_i, r_w; as_n) \right| = \sum_{n=1}^{N_{as}} I(r_i; as_n). \quad (6)$$

Этот метод можно обозначить как TS-M-C-SAFT. Он позволяет получать высококачественные изображения отражателей, обладающие низким уровнем шума и высокой фронтальной разрешающей способностью. Для объединения парциальных изображений можно воспользоваться не только когерентным сложением и сложением модулей, но и такими операциями как нахождение среднего значения, медианы парциальных изображений в точке r_i .

Для получения более качественного изображения целесообразно работать с комплексными эхосигналами, которые можно получить с помощью преобразования Гильберта из реально измеренных эхосигналов. Далее везде будем предполагать, что для восстановления изображения отражателей корреляционным методом используются комплексные сигналы.

Под акустическим каналом будем подразумевать настройку аппаратуры для проведения ультразвукового контроля, описывающую порядок работы в режиме двойного сканирования пьезоэлементов одной или двух антенных решёток, положение антенной или двух антенных решёток, значение коэффициента усиления приёмника, параметры зондирующего импульса, временную апертуру регистрации эхосигналов и прочее.

Для описания пар излучатель-приёмник при электронном сканировании методом двойного сканирования введём понятие коммутационной матрицы \mathbf{C} размерами $N_x \times N_x$, где N_x — количество элементов АР. По-видимому, такое описание работы антенной решётки послужило основанием для создания термина Full Matrix Capture (FMC) [5]. Если $C_{nm} = 1$, то это означает, что элемент антенной решётки с номером n излучает импульс, а элемент с номером m принимает эхосигнал. Так как эхосигналы, измеренные при $C_{nm} = 1$ и $C_{mn} = 1$, совпадают с точностью до шумовой составляющей, то можно заполнять единицами только верхний (или нижний) треугольник матрицы $C_{nm} = 1$, $m \geq n$. Регистрация эхосигналов по всем комбинациям пар ($C_{nm} = 1$ для всех n и m) позволяет получить максимальное

отношение сигнал/шум. Для повышения скорости контроля можно случайным образом заполнить матрицу \mathbf{C} так чтобы число измеренных эхосигналов было много меньше $N_x \times N_x$. Это приводит к повышению уровня шума изображения, который можно принципиально уменьшить при использовании метода тройного сканирования.

Рассмотренные корреляционные методы позволяют восстанавливать изображения при совместной обработке эхосигналов измеренных для разных координат u . Для подчёркивания этого факта в название метода восстановления будем добавлять аббревиатуру 3D, например, запись 3D-TS-C-SAFT означает совместную обработку эхосигналов для разных координат u при регистрации эхосигналов в режиме тройного сканирования. Такая обработка эхосигналов приводит к тому, что в восстановленном изображении фронтальная разрешающая способность в дополнительной плоскости, то есть вдоль оси u , не будет зависеть от глубины и будет равна примерно размерам пьезопластины антенной решётки вдоль оси u .

Метод максимальной энтропии

Обратную задачу, записанную в форме (1), можно свести к системе линейных алгебраических уравнений:

$$p = G\varepsilon + n. \quad (7)$$

Для решения этой классической задачи с точки зрения решения системы линейных алгебраических выражений существует множество способов. Так как матрица G , как правило, плохо обусловлена, то кроме простого обращения матрицы существуют иные варианты решения. Один из них заключается в нахождении оценки $\hat{\varepsilon}$, как решение задачи безусловной оптимизации, когда в качестве критерия качества восстановленного изображения выбирается квадрат невязки решения:

$$\chi^2(\hat{\varepsilon}) = \|G\hat{\varepsilon} - p\|^2 = (G\hat{\varepsilon} - p)^T(G\hat{\varepsilon} - p), \quad (8)$$

где символ T означает операцию транспонирования. Восстановленную оценку $\hat{\varepsilon}$ можно записать в виде:

$$\hat{\varepsilon} = \arg \min_{\varepsilon \in R^{N_{i,x}; N_{i,z}}} (\chi^2(\hat{\varepsilon})), \quad (9)$$

где $N_{i,x}$ и $N_{i,z}$ размеры изображения в отсчётах. Решение обратной задачи в форме называют методом наименьших квадратов (МНК). В терминологии [6] решение вырожденной системы линейных алгебраических уравнений (7) относительно ε , обеспечивающее минимум невязки $\chi^2(\hat{\varepsilon})$, называется псевдорешением. Псевдорешений может существовать бесконечно много и такие их параметры, как разрешающая способность, уровень спеклового шума и прочее, в общем случае, могут

оказаться далеки от идеальных. Задача (7) может быть некорректной и для её решения А.Н. Тихоновым [6] был разработан метод регуляризации, обосновывающий замену задачи в форме (9) на задачу оптимизации устойчивой к малым изменениям входных данных s :

$$\hat{\varepsilon}_\alpha = \arg \min_{\varepsilon \in R^{N_x \times N_x}} (\chi^2(\hat{\varepsilon}) + \alpha \Omega(\hat{\varepsilon})). \quad (10)$$

Смысл использования стабилизирующих функционалов состоит в том, чтобы при решении некорректной задачи учесть априорную информацию о свойствах решения и за счет этого сузить область поиска решений. В качестве стабилизирующего функционала $\Omega(\hat{\varepsilon})$ можно использовать кросс-энтропию функции p [7] и переписать формулу (10) в виде:

$$\hat{\varepsilon}_\alpha = \arg \min_{\hat{\varepsilon} \in R^{N_x}} (\chi^2(\hat{\varepsilon}) - \alpha H(\hat{\varepsilon})), \quad H(\hat{\varepsilon}) = -\sum_{i=1}^{N_x} \hat{\varepsilon}_i \ln \frac{\hat{\varepsilon}_i}{m_i}, \quad (11)$$

где m — априорная модель или оценка вида решения $\hat{\varepsilon}$. Метод описываемой формулой (11) будет называться методом максимальной энтропии (ММЭ). В простейшем случае можно использовать постоянную величину μ , где μ — понимается как оценка среднего значения $\hat{\varepsilon}$. В данной работе кросс-энтропия знакопеременной функции $\hat{\varepsilon}$ рассчитывалась по формуле, приведённой в статье [8]:

$$z_i = \sqrt{\hat{\varepsilon}_\alpha^2 - 4\mu^2} \quad (12)$$

$$H^\pm(\hat{\varepsilon}) = -\sum_{i=1}^{N_x} \left(z_i - 2\mu - \hat{\varepsilon}_i \ln \frac{z_i + \hat{\varepsilon}_i}{2\mu} \right).$$

Для эффективного поиска минимума функции многих переменных методами второго порядка градиент и Гессиан выражения выражаются следующим образом:

$$\frac{\partial H_\pm(\hat{\varepsilon})}{\partial \hat{\varepsilon}_i} = -\ln \left(\frac{z_i + \hat{\varepsilon}_i}{2\mu} \right), \quad \frac{\partial^2 H_\pm(\hat{\varepsilon})}{\partial (\hat{\varepsilon}_i)^2} = -\frac{1}{z_i}. \quad (13)$$

Как видно в формуле Гессиан имеет вид диагональной матрицы, что может ускорить работу оптимизирующих алгоритмов и уменьшить требования к размерам оперативной памяти компьютера.

Подобный подход можно использовать для проведения деконволюции простых или сложных эхосигналов $s(t)$. Такой способ декодирования должен привести к восстановлению оценки сигнала со сверхразрешением.

Озвучивание отражателя с разных направлений

Сканирование по окружности или её части

Если объект контроля позволяет зарегистрировать эхосигналы по всей своей поверхности, то

отражатели можно будет озвучить со всех сторон, что позволит получить подробную информацию о форме несплошности. В работах [9, 10] приведены результаты восстановления всей границы отражателей различных типов. Для этого в алгоритмах, рассмотренных в разделе **Корреляционный метод восстановления изображения отражателей**, нужно было учесть то обстоятельство, что призма движется по окружности или её части, а преломление и отражение ультразвука происходят на цилиндрических поверхностях [11].

Проверка эффективности предложенного способа восстановления изображения отражателей проводилась на эхосигналах, рассчитанных в численном эксперименте с помощью программы CIVA [12], которая позволяет моделировать результаты различных способов контроля, в том числе и ультразвукового контроля. На рис. 2 ниже показана модель в виде трубы внешним радиусом 170 мм и с толщиной стенки 20 мм, использующая антенную решётку (рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, размер элементов 0,76 мм, зазор между 0,04 мм) установленную на притёртую рексолитовую призму с углом наклона 35 градусов. «Измерения» эхосигналов проводились по поверхности образца в 16 позициях с шагом 6,4 мм. Расчёты проводились в двумерном варианте для модели трещины высотой 6 мм выходящей на дно.

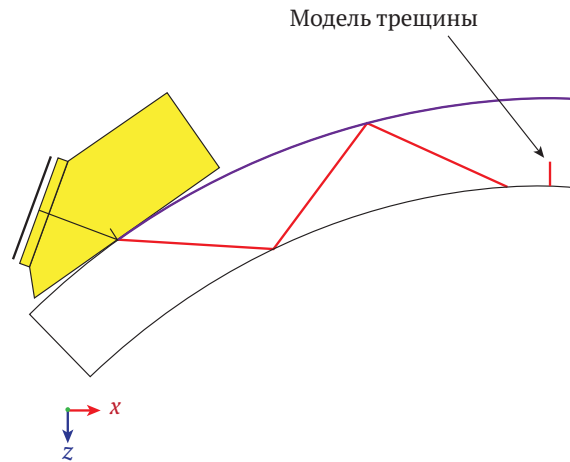


Рис. 1. Схема проведения численного эксперимента. Призма показана в начальной точке сканирования

На рис. 2 слева показано парциальное изображение для одного положения антенной решётки, когда координаты передней грани призмы равен 19 мм, а справа изображение полученное методом TS-C-SAFT по формуле (4). Использовалась акустическая схема T(S)–T(S). Парциальное изображение трещины имеет типичный вид: один блик сформированный сигналами, отражёнными от корня трещины, и сигналами отражениями от дна и от поверхности трещины с учётом трансформации

типа волн, имеет большую амплитуду. Блик малой амплитуды, соответствующий вершине трещины, сформирован эхосигналом дифрагированным на вершине. Разница в амплитудах этих бликов может быть больше 20 дБ. Однако малый радиус объекта контроля и большая апертура сканирования антенной решёткой позволяют зарегистрировать эхосигналы, отражённые от поверхности модели трещины на прямом луче и восстановить форму её границы. Такое изображение отражателя показано на рис. 2 справа. По нему можно определить тип отражателя в отличие от парциального изображения на рис. 2, слева.

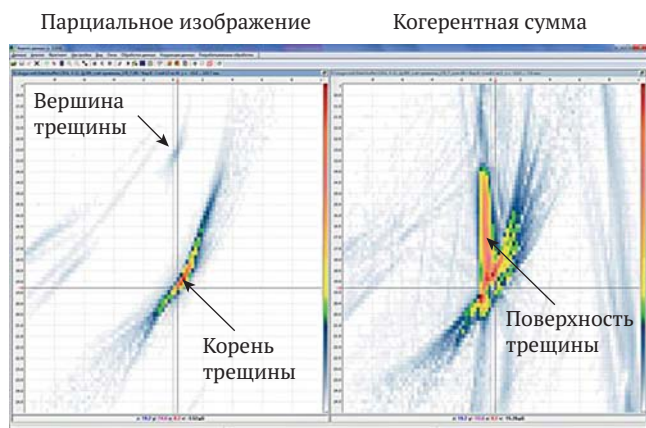


Рис. 2. Восстановленное изображение модели трещины по акустической схеме Т (S)–Т (S)

На рис. 3 представлены изображения, подобные показанным рис. 2, но восстановленные с использованием акустической схемы Т (L)–Т (L) по тем же эхосигналам. Это важный момент — измерения эхосигналов поводится один раз, а далее по нему может быть восстановлено множество парциальных изображений по заданному списку акустических схем $L_{as} = \{as\}_{N_{as}}$. Большие размеры апертуры сканирования позволили так же, как и для акустической схемы Т (S)–Т (S) восстановить всю поверх-

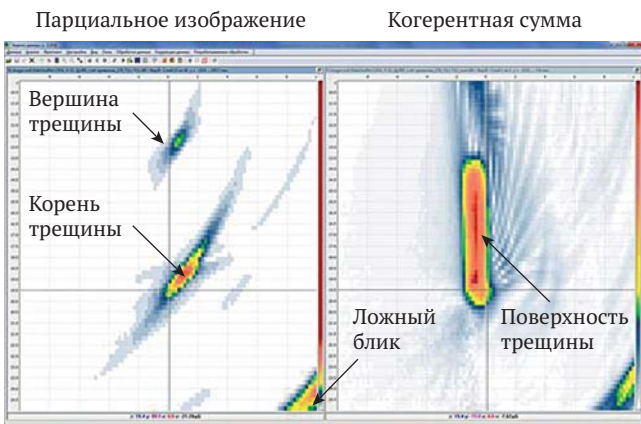


Рис. 3. Восстановленное изображение модели трещины по акустической схеме Т (L)–Т (L)

ность трещины, что позволяет определить тип отражателя.

Использование множества акустических схем и акустических каналов

Если геометрия объекта контроля не позволяет использовать подход, рассмотренный в предыдущем разделе, то можно воспользоваться следующим приемом. Если при восстановлении изображения отражателя сформировать множество парциальных изображений $I(r_i, as)$ по заданному списку акустических схем $L_{as} = \{as\}_{N_{as}}$ с учётом отражения от границ объекта контроля и объединить их в одно итоговое изображение согласно формуле (6), то можно восстановить форму отражателя [13]. Это объясняется тем, что многократные отражения от неровных границ объекта контроля ультразвукового импульса позволяет «осветить» отражатель с разных сторон.

Рассмотрим в качестве примера, результаты восстановления изображения отверстий бокового сверления диаметром 6 и 3 мм в образце с неровным дном, фотография которого показана на рис. 4. На этом же рисунке схематически показаны две антенные решетки, работающие по трем акустическим каналам. Цикл измерений заключался в излучении и приеме антенной решёткой с *N*-стороны (голубая стрелка, *N*-канал) и с *P*-стороны (зеленая стрелка, *P*-канал) в излучении импульсов антенной решёткой с *N*-стороны и приеме АР с *P*-стороны (две желтые стрелки, *NP*-канал). Эхосигналы по акустическим каналам записываются в три файла, по ним восстанавливаются парциальные изображения по списку L_{as} и, на конечном этапе, формируется итоговое изображение отражателей.

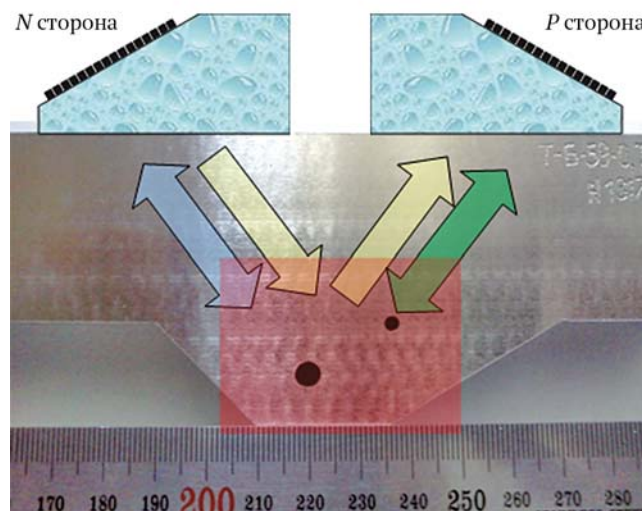


Рис. 4. Фотография образца и схема проведения измерений

Так как по каждому акустическому каналу изображения отражателей восстанавливаются в одной и той же пространственной области, то формулу (4) можно обобщить на случай регистрации эхосигналов несколькими и, в частности, двумя антенными решетками. Для этого просто нужно добавить суммирование парциальных изображений по разным акустическим каналам. Если через обозначить парциальное изображение для акустической схемы канала номер, то формулу (4) или (6) для трех акустических каналов восстановления изображения можно записать в виде:

$$I(r_i) = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^{N_{as}} \left| \sum_{w=1}^{N_w} \hat{\varepsilon}_m(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; as_n) \right| = \sum_{m=1}^3 I_m(r_i). \quad (14)$$

При проведении модельного эксперимента эхосигналы измерялись в режиме двойного сканирования двумя антенными решетками (рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, размер элементов 0,9 мм, зазор между 0.1 мм). Антенные решетки были установлены на призмы из рексолита с углом наклона 35 градусов.

На рис. 5 показано изображение отражателей соответствующее области отмеченной на рис. 4 полупрозрачным прямоугольником красного цвета. На левой части рисунка показано изображение, полученное как сумма модулей парциальных изображений по всем трём каналам и одной акустической схеме $T(L) - T(L)$, то есть на прямом луче. Хорошо видна верхняя граница отверстий и граница дна образца, на которой видны две тени от отверстия наиболее близкого к дну. На рис. 5 справа показано изображение, полученное как максимум парциальных изображений по акустическим схемам с отражением от неровного дна и поверхности объекта контроля. По нему можно сделать вывод, что обнаруженные отражатели — это отверстия бокового сверления, оценить диаметр которых можно простым измерением расстояний между

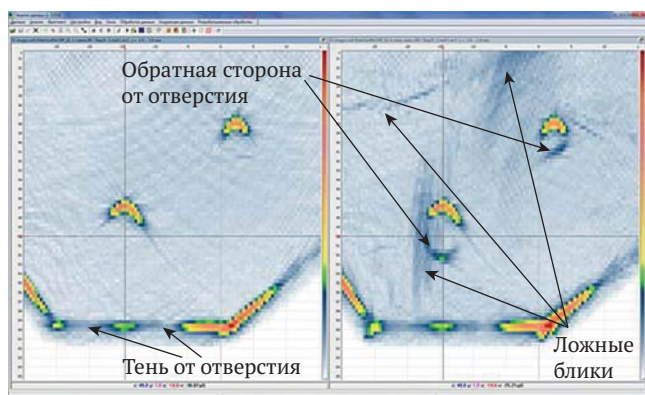


Рис. 5. Результат восстановления изображений границы и отверстий бокового сверления в образце

бликами. Диаметры отверстий можно оценить как 5,6 мм и 3,2 мм, что менее чем на 10% отличается от истинного значения.

Одна из проблем применения данного подхода к распознаванию типа отражателей заключается в автоматическом выборе набора акустических схем L_{as} , которые нужно учитывать при формировании итогового изображения по формуле (14).

Учёт разных скоростей звука в объекте контроля

Качество восстановленного изображения отражателей корреляционным методом (3), то есть решение обратной задачи, зависит от точности решения прямой задачи. Понятно, что если ультразвук распространяется в объекте контроля, состоящим из нескольких областей с разными акустическими свойствами, а лучевые траектории рассчитываются для однородной среды, то восстановленное изображение будет искажено. Искажено тем сильнее, чем больше различаются скорости звука в разных областях объекта контроля. Как упоминалось ранее с помощью принципа Ферма можно рассчитывать лучевые траектории для однородных и неоднородных объектов с неровными границами с учётом трансформации типов волн при преломлении и отражении [10, 14]. Однако итерационный способ определения траектории с минимальным временем пробега требует значительных вычислительных ресурсов. А при расчёте траекторий в объекте, состоящим из нескольких областей с разными акустическими свойствами, проявляется существенный недостаток программной реализации вычислений по принципу Ферма. Дело в том, что в процессе решения задачи минимизации траектория может менять количество точек пересечений границ областей с разными акустическими свойствами. Это означает, что нужно разработать метод минимизации функции многих переменных, число которых может меняться в процессе решения. Такой итерационный метод также потребует больших вычислительных мощностей. Есть ещё одна особенность расчёта задержек — в точку расположения отражателя импульс может попасть по нескольким траекториям. Для выхода из этой ситуации при использовании принципа Ферма потребуется решение нескольких задач поиска минимума с разными начальными траекториями, что увеличит время восстановления изображения отражателей.

Поэтому для расчёта лучевых траекторий в объектах, состоящих из нескольких областей с разными акустическими свойствами, можно использовать алгоритм, основанный не на принципе Фер-

ма, а использующий принцип трассировки [15, 12], то есть построение множества лучей из заданной точки излучения в некотором диапазоне углов с учётом многочисленных отражений и преломлений, в частности, с учётом трансформации типа волны. Трассировка лучей должна позволить рассчитать задержки распространения эхо-сигналов при решении прямой задачи. Алгоритм расчёта ультразвукового поля, основанный на лучевом подходе, в силу своей параллельности, идеально подходит для реализации с помощью технологии NVIDIA CUDA™ [16]. Это позволит ускорить работу алгоритма восстановления изображений отражателей в объектах с множеством областей с разными акустическими свойствами.

Основные этапы алгоритма восстановления изображения отражателей при решении прямой задачи методом трассировки следующие [17]:

1. Задание геометрических и акустических свойств объекта контроля и призмы в виде списка областей $\{s\}_N$;
2. Задание размеров апертуры сканирования: начало $x_{w, start}$, шаг Δx_w и количество шагов;
3. Задание угловых параметров расчёта траекторий: начальный угол α_{start} , конечный угол α_{finish} и шаг между углами $\Delta\alpha$;
4. Задание конца временной апертуры t_{end} и временного интервала $\Delta t_{ОВИ}$ для расчёта координат в точках кратных;
5. Трассировка лучей для всех положений антенной решётки или преобразователя на временной апертуре $[0, t_{end}]$ для всего углового диапазона;
6. Определение всех опорных точек $(x(t_{ОВИ}), z(t_{ОВИ}))$, которые по каждому лучу при произвольных отражениях от границ объекта контроля окажутся в ОВИ;
7. Селекция множества всех точек по акустическим схемам и проведение аппроксимации задержек из точек $(x(t_{ОВИ}), z(t_{ОВИ}))$ на сетку ОВИ $(x_{ОВИ}, z_{ОВИ})$, что позволяет найти для каждой точки ОВИ задержки для любой акустической схемы;
8. Восстановление изображения отражателей по списку акустических схем L_{as} . Это может быть и методы семейства C-SAFT, рассмотренные в разделе **Корреляционный метод восстановления изображения отражателей**, или метод максимальной энтропии (см. раздел **Метод максимальной энтропии**).

Изготовление образцов с границами заданной формы для проведения модельных экспериментов не представляет существенных проблем. Но изготовление образцов, состоящих из нескольких областей с известной границей с заданными акустическими свойствами, весьма непростая технологиче-

ская и достаточно дорогостоящая задача. Поэтому проверка предложенного метода восстановления изображения отражателей проводилась на эхосигналах, рассчитанных в численном эксперименте с помощью программы CIVA [12].

Образец, изображённый на рис. 6, состоял из трёх областей. Области s_1 и s_3 «заполнены» материалом со скоростями звука c_1 и c_3 равными 5,9 и 3,23 мм/мкс и плотностью ρ равной 0,0078 г/мм³, а область s_2 «заполнена» материалом со скоростями звука равными 5,4 и 2,8 мм/мкс и плотностью 0,0077 г/мм³. Такая заметная разница между скоростями волн объясняется тем, что по этим эхосигналам проводилась проверка правильной работы алгоритма. Линии, формирующие акустические схемы, на эскизе помечены символами l с нижними индексами. На глубине 12 мм на расстоянии 10 мм друг от друга были расположены отражатели в виде трёх отверстий бокового сверления диаметром 2 мм. Для излучения и приёма эмулировалась регистрация эхосигналов антенной решёткой (рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, размер элементов 0,76 мм, зазор между 0,04 мм) на рексолитовой призме с углом наклона 35 градусов, стрелой a_w равной 27,84 мм и расстоянием пробега в призме p_w равным 17,5 мм. «Измерения» эхосигналов в режиме тройного сканирования проводились в 7 точках с шагом 10 мм, начиная с точки $x_{w, start} = -25,62$ мм. На рис. 6 призма и антенная решётка показаны в крайнем левом (голубая заливка призмы) и правом положениях (чёрно-белая заливка).

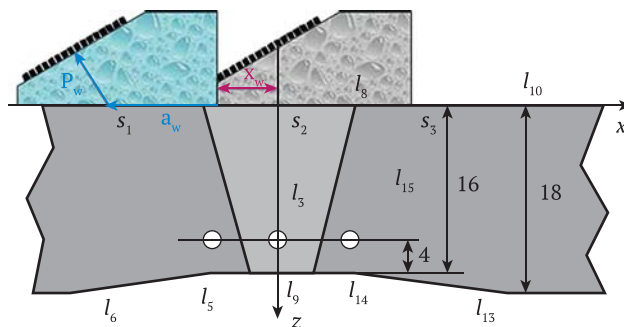


Рис. 6. Эскиз образца с неровным дном и тремя отверстиями бокового сверления диаметром 2 мм

На рис. 7 показаны изображения границ отверстий при расчёте задержек по принципу Ферма без учёта разных скоростей звука (вверху) и при трассировке лучей только для поперечных волн с учётом разных скоростей звука (внизу). Для получения итогового изображения комплексные парциальные изображения, каждое из которых восстановлено по эхосигналам в одном положении антенной решётки, складывались согласно формуле (4). На изображения линиями чёрного цвета наброшена маска образца. Существенное

отличие значений поперечной скорости в области s_2 привело к тому, что на изображении отражателей, восстановленном в предположении, что образец однородный, только левая часть границы отверстия в точке -10 мм по оси x восстановились в правильных местах. А для отверстий в точках 0 и 10 мм по оси блики сместились от своих правильных положений более чем на 1 мм, что сделало невозможным не только определить тип отражателя, но и указать их число. Учёт разных скоростей звука при расчёте задержек при трассировке лучей привело к тому, что левая часть границы всех трёх отверстий восстановились в правильных местах. Таким образом, предложенный алгоритм расчёта задержек импульсов позволяет восстанавливать изображения отражателей в объектах, состоящим из нескольких областей с разными акустическими свойствами.

3,23; 5,9 мм/мкс, 2,8; 5,4 мм/мкс, 3,23; 5,9 мм/мкс,
0,0078 г/мм³ 0,0078 г/мм³ 0,0078 г/мм³

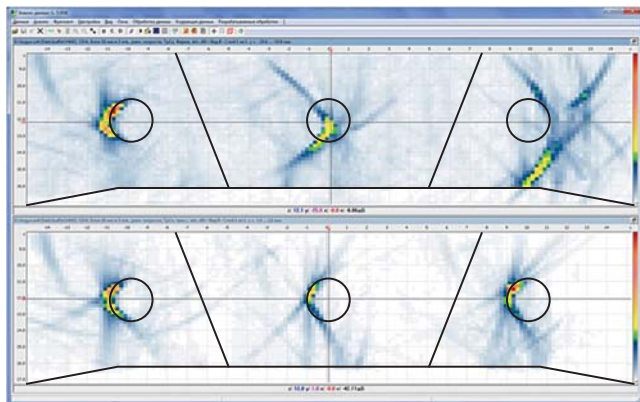


Рис. 7. Изображения границ отверстий при расчёте задержек по принципу Ферма (вверху) без учёта разных скоростей звука и при трассировке лучей (внизу) с учётом разных скоростей звука

Учёт анизотропии звука в объекте контроля

В практике ультразвукового контроля встречаются объекты, обладающие анизотропными свойствами. И если при расчёте лучевых траекторий не учитывать зависимость скорости звука от направления, то восстановленные изображения могут сильно исказить форму отражателей. Теория распространения упругих волн в кристаллах в целом была разработана к середине 1960-х годов [18, 19], что позволило создать программы для расчёта акустических полей в твёрдых телах. Для построения лучевых траекторий нужно рассчитать фазовые скорости для всех типов волн в зависимости от направления распространения плоской волны m . Это позволит рассчитать углы отражения и преломления по закону Снеллиуса для заданной кристаллической симметрии. Для построения лучей,

вдоль которых распространяется энергия ультразвуковой волны, нужно воспользоваться зависимостью групповой скорости от вектора m , которая определяется из уравнения Кристоффеля.

Эффективность работы метода восстановления изображения отражателей с учётом анизотропии проводилась на образце толщиной 36 мм с ремонтной заваркой и пятью отверстиями бокового сверления диаметром $2,2$ мм (рис. 8). Антенная решётка (рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, ширина пьезоэлемента $0,9$ мм, зазор $0,1$ мм) на плексигласовой 20 -и градусной призме перемещалась 13 раз с шагом $2,5$ мм вдоль оси. На рис. 8 призма и антенная решётка показаны в крайнем левом (голубая заливка призмы) и правом положениях (чёрно-белая заливка). При такой геометрии регистрации импульсы проходят через анизотропную ремонтную заварку.

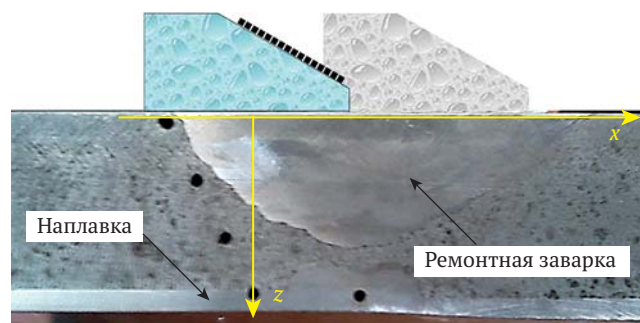


Рис. 8. Фотография торца образца с ремонтной заваркой и пятью отверстиями бокового сверления диаметром $2,2$ мм

Восстановление изображения отверстий бокового сверления по формуле (4) по акустической схеме для прямого луча без учёта анизотропных свойств ремонтной заварки не позволило получить сфокусированные изображения (рис. 9, слева). Видно, что дно образца восстановилось не на нужной глубине, а блик границы отверстия на глубине 20 мм распался на два блика. Хорошо сфокусировался блик самого верхнего отверстия по причине того, что импульс распространяется в заварке по самому короткому пути. На рис. 9 справа показано изображение, восстановленное в предположении, что ремонтная заварка обладает кубической анизотропией (плотность $\rho = 7800$ кг/м³, упругие константы ($c_{11} = 2,4; c_{12} = 1,45; c_{44} = 0,83$) $\times 10^{11}$ Н/м², угол поворота кристаллических осей $\theta = 15$ градусов). На рисунке линиями чёрного цвета наброшены контуры заварки и отверстий бокового сверления. Видно, что благодаря учёту анизотропии в заварке фокусировка бликов заметно улучшилась и блики стали точнее соответствовать реальному положению границ отверстий и дна образца.

Следует отметить, что параметры материала заварки (плотность, коэффициенты упругости, угол

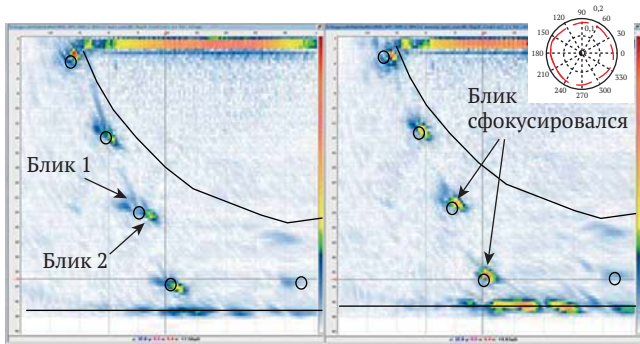


Рис. 9. Изображения отверстий бокового сверления полученное в предположении, что среда однородна (слева), и с учётом анизотропии (справа). В правом верхнем углу показан график фазовой медленности продольной волны

поворота θ) неизвестны и были просто подобраны в результате нескольких вариантов восстановления изображения. Кроме того, тип кристаллической симметрии заварки может быть не кубический, а угол наклона кристаллических осей, скорее всего, меняется в разных областях заварки, как это происходит в аустенитных сварных соединениях [20, 21]. Однако получение точной информации об этих параметрах требует дополнительных металлографических исследований. Так что при более точном знании акустических свойств заварки качество изображения отверстий бокового сверления будет ещё выше.

Повышение разрешающей способности изображения с использованием ММЭ

Для определения типа отражателя немаловажную роль играет разрешающая способность изображения. Высокая разрешающая способность позволяет точнее определять количество отражателей и их форму. Такие методы, как правило, не линейны и сложнее различных модификаций корреляционного метода.

Восстановление изображений отражателей по эхосигналам с помощью метода максимальной энтропии, предложено в работах [22, 23]. Так как ММЭ является нелинейным методом, то его применение позволяет получать изображения со сверхразрешением, то есть превышающим Рэлеевский критерий разрешения. Кроме того, ММЭ позволяет работать с прореженной коммутационной матрицей C , что приведёт к уменьшению объёма измеренных эхосигналов и увеличит скорость регистрации. Ниже приведены примеры восстановления изображения отражателей ММЭ.

Модель придонной трещины с вершиной на глубине 12 мм в образце с неровным дном

На рис. 10 приведена фотография образца толщиной $h=18$ мм с моделью придонной трещины

в виде паза шириной 0,6 мм с вершиной на глубине 12 мм. Стальной образец имел неровное дно для имитации конусной проточки в сварном соединении трубопровода. Для регистрации эхосигналов использовалась антенная решётка (рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, ширина пьезоэлемента 0,76 мм, зазор 0,04 мм) на рексолитовой 35-градусной призме.

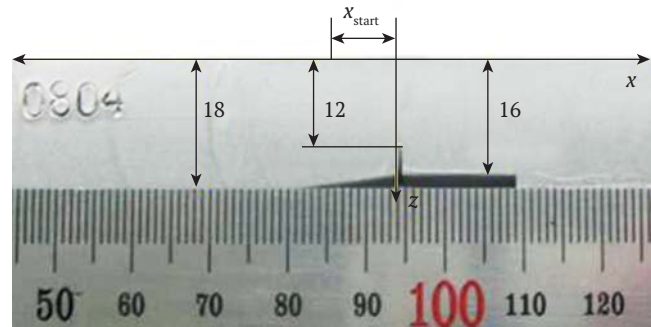


Рис. 10. Фотография образца с моделью трещины в виде паза шириной 0,6 мм с вершиной на глубине 12 мм

На рис. 11 показаны изображения границы модели вертикальной трещины, восстановленные корреляционным методом по формуле (5) и ММЭ по формуле (11). При восстановлении изображений использовались акустические схемы $L_{as} = \{T(S) - T(S), T(S) - TB(SS), TB(SS) - T(S), TB(SS) - TB(SS)\}$. Коммутационная матрица C была случайным образом прорежена, так что регистрировалось 32 эхосигнала, что составляет 3,1% от полного набора из 1024 эхосигналов. Изображение, восстановленное ММЭ, имеет значительно меньший уровень шума, связанный с поражённостью матрицы C , в сравнении с изображением, восстановленным корреляционным методом. Однако амплитуда ложных бликов даже на изображение, восстановленное ММЭ, слишком большая, что затрудняет определение типа отражателя. На изображения линиями чёрного цвета наброшена маска образца.

На рис. 12 показаны изображения границы модели вертикальной трещины, восстановленные корреляционным методом по формуле (5) и ММЭ по формуле (11) по эхосигналам, измеренным в 4 положениях с шагом 2 мм. При восстановлении изображений использовались акустические схемы $L_{as} = \{T(S) - T(S), T(S) - TB(SS), TB(SS) - T(S)\}$. Коммутационная матрица C была случайным образом прорежена, так что регистрировалось 140 эхосигнала, что составляет 13,7% от полного набора из 1024 эхосигналов. Изображение, восстановленное ММЭ, имеет практически нулевой уровень шума и более высокую разрешающую способность, в сравнении с изображением, восстановленным корреляционным методом, что позволяет

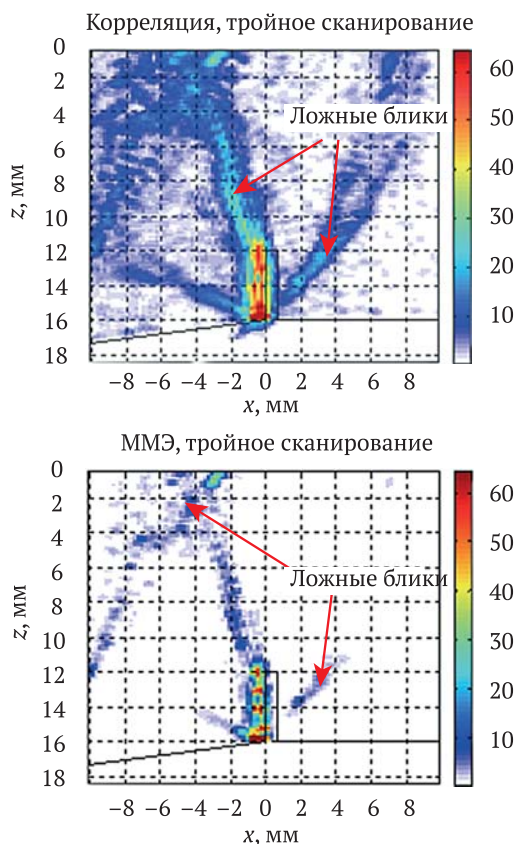


Рис. 11. Изображения границы модели вертикальной трещины, восстановленные корреляционным методом (слева) и ММЭ (справа) по 32 эхосигналам

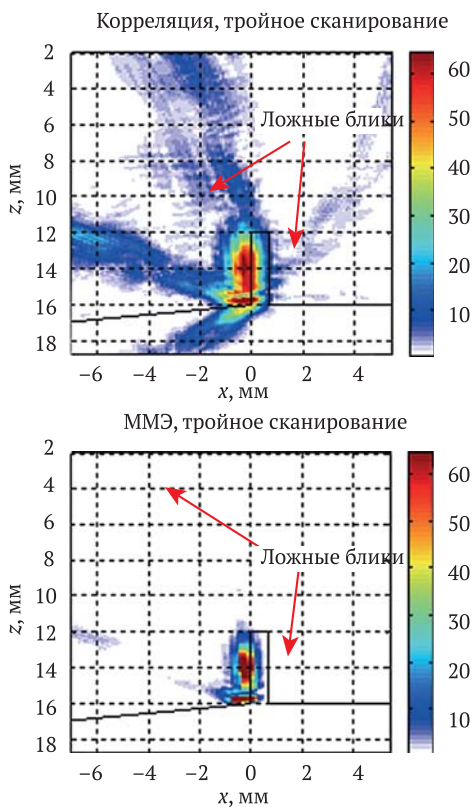


Рис. 12. Изображения границы модели вертикальной трещины, восстановленные корреляционным методом и ММЭ по 140 эхосигналам

определить тип отражателя. На изображениях линиями чёрного цвета наброшена маска образца.

Тест перерасеивания

Рассмотрим ещё один пример демонстрирующий эффективность применения ММЭ. На рис. 13 показана фотография образца с отверстиями бокового сверления диаметром 0,5 мм. Для регистрации эхосигналов использовалась антенная решётка (рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, ширина пьезоэлемента 0,76 мм, зазор 0,04 мм) на рексолитовой 35-градусной призме. Восстанавливались изображения отверстий на глубине 38 мм с расстоянием друг от друга около 2 мм, которые на рис. 13 показаны на выноске.

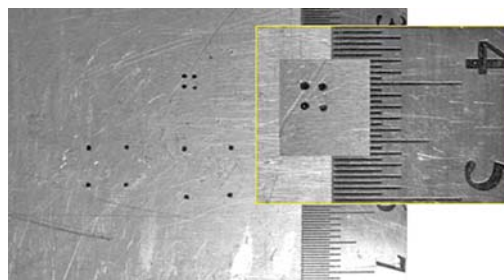


Рис. 13. Фотография образца с отверстиями бокового сверления 0,5 мм (тест перерасеивания)

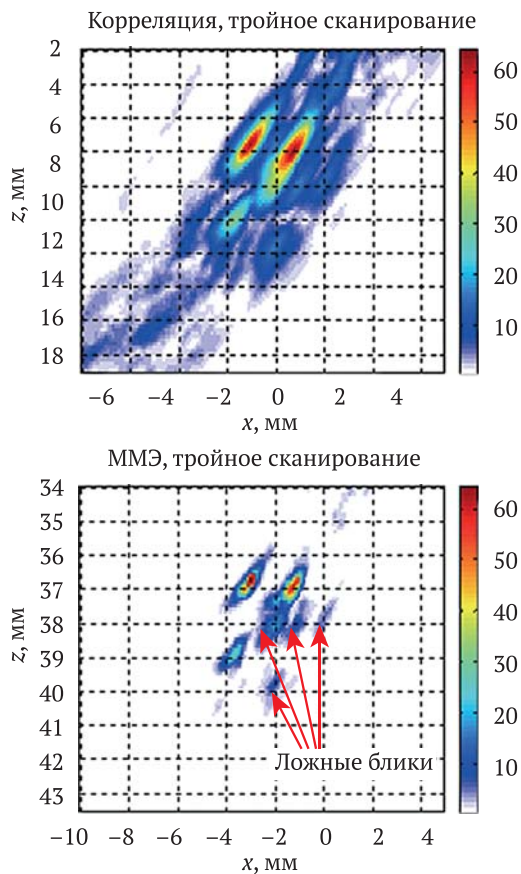


Рис. 14. Изображения границы модели вертикальной трещины, восстановленные корреляционным методом и ММЭ

На рис. 14 показаны изображения отверстий бокового сверления, восстановленные корреляционным методом по формуле (5) и ММЭ по формуле (11) по эхосигналам, измеренным в режиме тройного сканирования для 4 положений с шагом 2 мм. При восстановлении изображений использовалась одна акустическая схема $T(S) - T(S)$. Коммутационная матрица была случайным образом прожжена, так что регистрировалось 98 эхосигнала, что составляет 3,4% от полного набора из 4×1024 эхосигналов. Изображение, восстановленное ММЭ, имеет практически нулевой уровень шума и более высокую разрешающую способность, в сравнении с изображением, восстановленным корреляционным методом. Однако более высокое качество ММЭ-изображения не позволяет сделать однозначный вывод не только о типе дефектов, но и об их количестве, так как на изображении есть четыре блика, сформированные эхосигналами перерассеянными между отверстиями.

Использование особенностей отражения ультразвука

К сожалению, в практике ультразвукового контроля не всегда удаётся работать с отражёнными от границ объекта контроля импульсами, как было описано в разделе **Использование множества акустических схем и акустических каналов**. Так случается при контроле толстостенных изделий или в случае, когда дно объекта контроля поражено язвенной коррозией и отражение импульсов от него происходит диффузным образом. Наличие наплавки в области дна так же затрудняет работу с отражёнными импульсами.

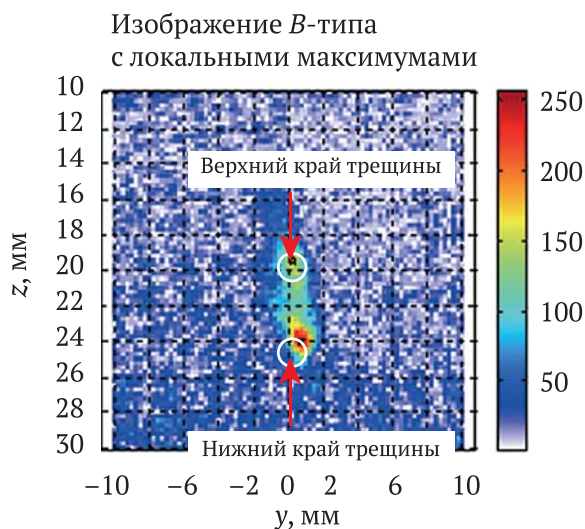
Разные фазы эхосигналов отражённых от краёв трещин

Знание особенностей отражения ультразвуковых импульсов от различных несплошностей позволит получить дополнительную информацию о типе отражателя. Так импульсы, отражённые от краёв трещин, имеют разные знаки [24], а импульс обегания противофазен импульсу, отражённому от границы отверстия бокового сверления [24]. Так как корреляционные методы сохраняют фазовые соотношения в восстановленном комплексном изображении, то анализ фаз бликов позволит получить дополнительную информацию о типе отражателя. Алгоритм анализа фаз состоит в следующем:

- Проводится сглаживание модуля комплексного изображения $I(r; as)$ по квадрату 3×3 ;
- Находится список локальных максимумов с учётом уровня отсечки;

- Находится нормированная функция корреляции области 3×3 вокруг первого или выбранного оператором локального максимума с областью 3×3 всех остальных локальных максимумов;
- Значение функции корреляции больше 0,5 можно рассматривать как признак совпадения фаз бликов, а если меньше $-0,5$, то — как признак противофазы.

Проверка данного способа проводилась при восстановлении изображения модели вертикальной трещины высотой 5 мм на глубине 20 мм не выходящей на поверхность объекта. Для её создания в стальном блоке были просверлены сквозные отверстия, он был нагрет до 1000 градусов и был сжат до полного схлопывания отверстий. Измерения проводились антенной решёткой (рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, ширина пьезоэлемента 0,76 мм, зазор 0,04 мм) установленной на рексолиговую призму с углом наклона 35 градусов. Антенная решётка перемещалась 25 раз по поверхности с шагом 2,37 мм ($N_w = 25, x_w = 2,37$).



Анализ фаз бликов (размер сгл. фильтра 3; отсечка 0,6; область коррел. 3)

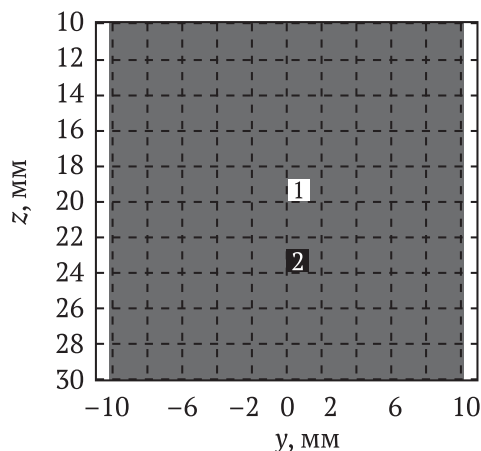


Рис. 15. Изображения трещины высотой 5 мм, восстановленные по акустической схеме $T(L) - T(L)$

На рис. 15 слева показано изображение, восстановленное по акустической схеме $T(L)-T(L)$ по формуле (4). На правой части рисунка показана функция корреляции в точках локального максимума, которые показаны звёздочками. Видно, что блики имеют противоположные фазы и это может служить указанием на то, что два восстановленных блика соответствуют краям вертикальной трещины.

На рис. 16 показано изображение (слева) и нормированная функция корреляции (справа), восстановленные по акустической схеме $T(L)-T(S)$ по формуле (4). Видно, что блики краёв трещины так же имеют противоположные фазы.

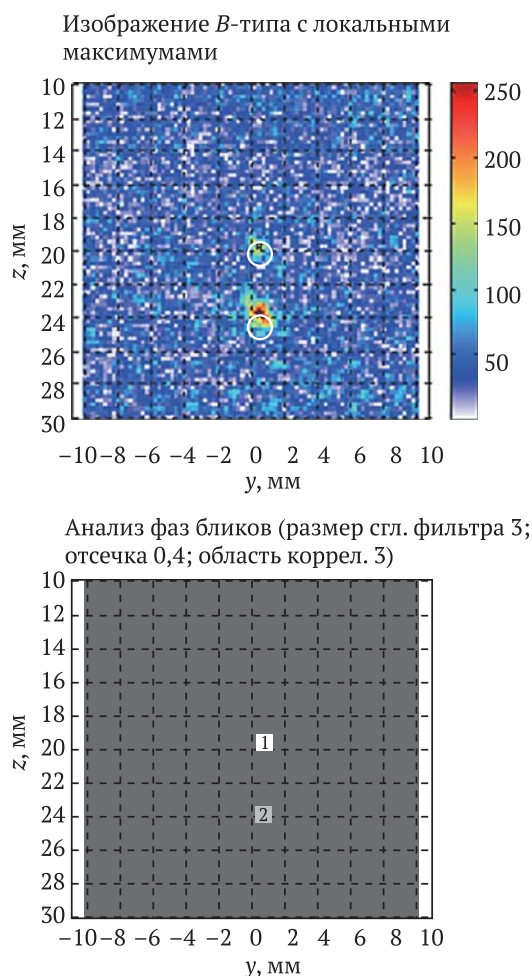


Рис. 16. Изображения трещины высотой 5 мм, восстановленные по акустической схеме $T(L)-T(S)$

На рис. 17 показано изображение (слева) и нормированная функция корреляции (справа), восстановленные для акустической схемы $T(S)-T(S)$. Блик, соответствующий верхнему краю трещины, имеет номер 1, номер 2 имеет блик, сформированный трансформированными на трещине эхосигналами [25], а блик, соответствующий нижнему краю трещины, — номер 3. Нормированная корреляция между областями локального максимума 1 и 3, то есть между бликами краёв трещины, отрицатель-

ная, а между областями локального максимума 1 и 2 она положительна. Наличие блика номер 2 не позволяет уверенно сказать, что обнаружена трещина. Однако совместный анализ изображений полученных по трём акустическим схемам позволяет идентифицировать обнаруженный отражатель как трещину.

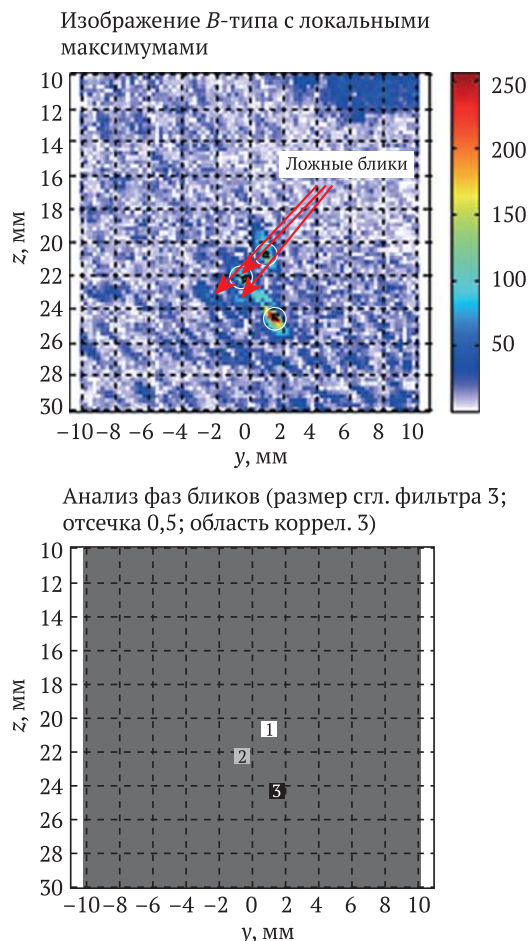


Рис. 17. Изображения трещины высотой 5 мм, восстановленные по акустической схеме $T(S)-T(S)$

Особенности трансформации типов волны при отражении от объемного отражателя

При разработке системы контроля сварных соединений колец роторов турбин на глубинах до 175 мм требовалось обеспечить минимальную фиксируемую площадь одиночных несплошностей от 3 мм^2 , иметь лучевую и фронтальную разрешающую способность 3 мм. Было показано, что для выполнения условий технического задания нужно проводить измерения 32-ух элементной антенной решёткой апертурой не менее 30 мм установленной на рексолитовую призму с углом наклона около от 12 до 18 градусов. Для получения требуемого фронтального разрешения в основной и дополнительной плоскостях, измерения эхосигналов должны проводиться в режиме тройного сканирования

на пространственной апертуре не меньше 30 мм, а изображения должны восстанавливаться методом 3D-TS-M-C-SAFT.

Однако большая толщина объекта контроля не позволила использовать подходы, рассмотренные в разделе Озвучивание отражателя с разных направлений. Поэтому для получения дополнительной информации о типе несплошности использовался следующий приём. Так как коэффициент отражения ультразвуковой волны от объемных несплошностей с трансформацией типа волны значительно меньше, чем без трансформации, то надо восстановить изображения по акустическим схемам $T(S)-T(S)$, $T(L)-(S)$ и $T(L)-T(L)$. На изображении, полученном по акустической схеме $T(L)-T(S)$, останутся блики потенциально опасных несплошностей типа трещин. На рис. 18 показаны изображения полученные методом 3D-C-SAFT по акустическим схемам $T(S)-T(S)$, $T(S)-T(L)$ и $T(L)-T(L)$, амплитуды которых приведены к максимуму изображения на продольных волнах. Изображения представлены в режиме показа всех слоёв по максимуму. Видно, что на изображении $T(S)-T(L)$ на глубине около 90 мм нет бликов заметной амплитуды, что служит указанием на отсутствие трещиноподобных несплошностей в контролируемом объеме сварного соединения.

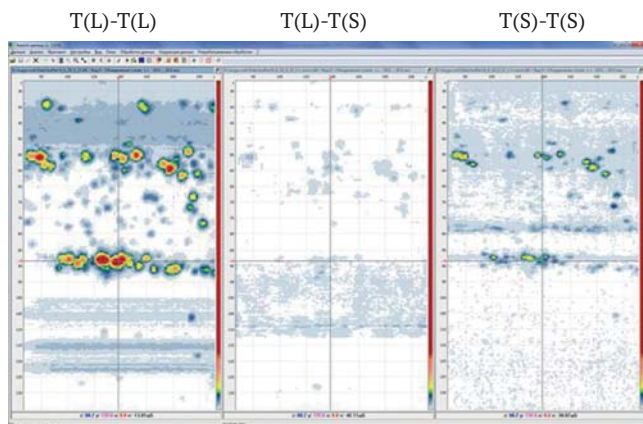


Рис. 18. Определение подозрительных несплошностей с использованием акустических схем $T(S)-T(S)$, $T(L)-T(S)$ и $T(L)-T(L)$

Выводы

В статье рассмотрены и продемонстрированы возможности нескольких алгоритмов получения изображения отражателей.

- Использование метода 3D-TS-M-C-SAFT учитывающего многократные отражения импульсов от границ объекта контроля с неровными границами, состоящего из областей с разными акустическими свойствами и анизотропией сварного

соединения, позволяет получать высококачественные изображения отражателей.

- Две антенные решётки, работающие по трём акустическим каналам (N -каналу, P -каналу и NP -каналу), при наличии информации о форме дна объекта контроля позволяют восстановить изображение всей границы отражателя. Это позволит надёжнее определять тип отражателя.
- Метод максимальной энтропии позволяет по прореженной коммутационной матрице восстанавливать изображения отражателей с эффектом сверхразрешения и низким уровнем шума.
- Предложены методические приёмы, учитывающие особенности отражения волн от отражателей, позволяющие получить дополнительную информацию о типе обнаруженной несплошности.
- Используя разработанные алгоритмы можно восстанавливать более точные образы несплошностей, что позволяет повысить достоверность ультразвукового контроля.

Опубликовано в журнале
Контроль. Диагностика № 6, 2015

Список литературы:

1. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия, 1990. № 2. С. 29–41.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
3. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для повышения разрешающей способности изображения по эхосигналам // Акуст. журн.. 2013. № 2. С. 235–254. DOI: 10.1134/S1063771013020024.
4. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решетки // Контроль. Диагностика. 2011. № 10. С. 63–70.
5. Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models/S. Chatillon [et al.] // NDT in Canada 2009 National Conference. 25–27 August, 2009. URL: <http://www.ndt.net/article/aspnde2009/papers/10.pdf> (дата обращения: 20.06.2014).
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. (изд. 3-е, исправл.) // М.: Наука, 1986. — 288 с.
7. Kullback S. Information Theory and Statistics // New York. 1968. — 416 p.

8. Maisinger K., Hobson M.P., Lasenby A.N. Maximum entropy image reconstruction using wavelets // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2003, № 3. — P. 1–21.
9. Базулин Е.Г., Применение методов сверхразрешения при экспертном контроле цилиндрических объектов // *Дефектоскопия*. 2005. № 6. С. 47–64.
10. Marklein R., Langenberg K.J., Mayer K., Miao J., Shlivinski A., Zimmer A., Müller W., Schmitz V., Kohl C., Mletzko U. Recent Applications and Advances of Numerical Modeling and Wavefield Inversion in Nondestructive Testing // *Advances in Radio Science*. 2005. № 3. P. 167–174.
11. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT при многократном отражении эхосигналов от границ цилиндрического объекта контроля // *Дефектоскопия*. 2013. № 2. С. 23–42. DOI: 10.1134/S1061830913020022
12. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/civa-2> (дата обращения: 16.06.2014).
13. Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решётками // *Дефектоскопия*. 2014. № 4. С. 50–63. DOI: 10.1134/S1061830914040020
14. Базулин Е.Г. Получение изображения дефектов методом SAFT с учётом переменной скорости звука в объекте контроля // *Дефектоскопия*. 2011. № 11. С. 3–13.
15. Connolly G.D. Modelling of the propagation of ultrasound through austenitic steel welds // UK Research Centre in NDE (RCNDE), Department of Mechanical Engineering Imperial College, London. SW7 2AZ. August 2009. 206 p.
16. Технология NVIDIA CUDA™. URL: <http://www.nvidia.ru/object/cuda-parallel-computing-ru.html> (дата обращения: 16.06.2014).
17. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей корреляционным методом в образце с областями с разными скоростями звука при произвольном количестве отражений от границ // *Дефектоскопия*. 2014. № 9. с. 22–40. Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1965. 388 с.
18. Петрашень Г.И. Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л.: Наука, 1980. 280 с.
19. Moysan J., Gueudre C., Ploix M.-A., Corneloup G., Guy P., Chassignole B. Advances in ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds. Towards a 3-d description of the material including attenuation and optimisation by inversion // *Ultrasonic Wave Propagation in Non Homogeneous Media. Series: Springer Proceedings in Physics*. 2009. Vol. 128. P.016015–24. DOI 10.1007/978-3-540-89105-5.
20. Connolly G., Lowe M., Roklin S., Temple A. Imaging of defects in austenitic steel welds using an ultrasonic array // *Ultrasonic Wave Propagation in Non Homogeneous Media Series: Springer Proceedings in Physics*. 2009. Vol. 128. P. 25–38. DOI 10.1007/978-3-540-89105-5.
21. 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. DOI: 10.1134/S1063771013020024
22. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей по ультразвуковым эхосигналам методом максимальной энтропии // *Дефектоскопия*. 2013. № 1. С. 33–60. DOI: 10.1134/S1061830913010038
23. Вopilкин А.Х. Развитие теории и создание дифракционных методов и систем ультразвукового контроля объектов машиностроения: дис. доктора технических наук. М., 1987. 417 с.
24. Базулин Е.Г., Применение методов сверхразрешения для анализа «тонкой» структуры вертикально ориентированных подповерхностных трещин // *Дефектоскопия*. 1995. № 10. С. 9–13.

Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 2. Повышение отношения сигнал/шум

Improved reliability of ultrasonic inspection.

Part 2. Improving the signal/noise ratio

В статье рассмотрены способы повышения отношения сигнал/шум при когерентном восстановлении изображения отражателей, основанные на когерентном накоплении полезного сигнала. Продемонстрирована эффективность применения сложных сигналов для повышения отношения сигнал шум при малом уровне полезного сигнала. Для уменьшения уровня структурного шума предложено использовать методы обработки эхосигналов с целью достижения эффекта сверхразрешения. К таким методам относятся метод максимальной энтропии (ММЭ), метод построения AR-модели спектра эхосигналов и метод расщепления спектра. Продемонстрирована эффективность примирения ММЭ для восстановления изображения отражателей по набору эхосигналов в объекте со структурным шумом. Приведены примеры применения данных алгоритмов с анализом восстановленных изображений.

The article discusses methods of improve the signal/noise ratio in coherent image reconstruction reflectors based on coherent accumulation of the useful signal. Demonstrated the effectiveness of complex signals to improve the signal-noise ratio at a low level of the useful signal. To reduce the level of structural noise is proposed to use the echo processing techniques to achieve the superresolution effect. Demonstrated the effectiveness of reconciliation MEM to restore the image of reflectors on a set of echoes in the object with structural noise. Provides application examples of these algorithms with the analysis of the reconstructed images.

Введение

Если метод ультразвукового контроля основан на восстановлении изображения отражателей, то идеальным изображением можно считать изображение оптического качества позволяющее рассмотреть со всех сторон всю поверхность отражателя. Это позволит определить тип отражателя и измерить его размеры. Решению этой задачи посвящена первая часть статьи [1]. Не менее важной задачей является создание алгоритмов, которые позволили бы восстанавливать изображения несплошностей с минимальным уровнем шумов, так как это определяет чувствительность контроля, которая определяется минимальным размером выявляемого отражателя, в качестве которого обычно выбирают плоскодонное отверстие. Если амплитуда блика отражателя превышает уровень шума более чем на 6дБ, то можно считать что обнаружена несплошность. В традиционной дефектоскопии считается, что дефект обнаружен, если амплитуда эхосигнала отражённого от него превышает браковочный уровень, определяемый по методике контроля.

Уровень шума определяется множеством причин: уровнем шума в электронных схемах при высоком уровне усиления, реверберационным шумом в призме, ложными бликами, формируемыми по акустическим схемам, которые не учитывает метод визуализации несплошностей. Задача повышения отношения сигнал/шум изображения отражателей в объектах контроля с высоким уровнем структурного шума так же является актуальной задачей. Вторая часть статьи посвящена методам уровня помех разной природы.

Высокое затухание ультразвука в объекте контроля

Основные параметры, которые определяют величину отношения сигнал/шум изображения отражателя это: коэффициент затухания δ контролируемого материала, A амплитуда, длина τ и f частота зондирующего импульса, площадь элементов антенной решётки и способ формирования изображения отражателей. Коэффициент затухания $\delta = \delta_d + \delta_s$ определяется поглощением, когда механическая энергия переходит в тепловую энергию,

и рассеиванием на кристаллических зёрнах материала объекта контроля, когда диссипации энергии не происходит, но возникает эффект рассеивания. Коэффициент затухания δ сильно зависит от типа волны и от частоты зондирующего сигнала. Для металлов обычно полагают $\delta_d \sim f$, а для пластмасс — $\delta_d \sim f^2$. Для материалов со средним размером зерна $\langle D \rangle \leq \lambda$ справедливо соотношение $\delta_s \sim \langle D \rangle^3 f^4$ (Релеевское рассеивание) [2]. Для таких мелкозернистых материалов можно считать что $\delta \approx \delta_d$. Для повышения отношения сигнал/шум в таких материалах традиционно применяются следующие способы:

- уменьшение частоты зондирующего импульса f , что, к сожалению, приводит к уменьшению амплитуды отражённого импульса от отражателей малых размеров и ухудшению разрешающей способности;
- увеличение амплитуды A зондирующего импульса, величина которой ограничена напряжением пробоя пьезокерамики;
- увеличение длины τ зондирующего сигнала, что, однако, уменьшает продольную разрешающую способность, если не использовать сложные сигналы;
- увеличение размеров антенной за счёт аппаратного или программного фазирования, измеренных эхосигналов, позволяет увеличить чувствительность без уменьшения фронтальной разрешающей способности;
- усреднение эхосигналов по N выборкам, что для случая белого шума и неподвижных «целей», позволяет повысить отношение сигнал/шум в \sqrt{N} раз [3], то есть за счёт увеличения времени проведения контроля можно неограниченно уменьшать уровень шума;

Повышение отношения сигнал/шум за счёт когерентного накопления

Корреляционные методы, рассмотренные в первой части статьи [1], позволяют за счёт математической фокусировки эхосигналов измеренных в режиме двойного сканирования, повысить отношение сигнал/шум. Причём в случае белого шума повышение эффект подавления шума будет максимальным [4]. Если когерентно сложить множество парциальных изображений полученных для разных положений антенной решётки — режим тройного сканирования регистрации эхосигналов, — то эффект накопления будет ещё более заметен.

Эффективность такого подхода продемонстрируем следующим примером. На рис. 1 представлен эскиз образца с плоскодонным отверстием диаметром 2,5 мм (5 мм^2) просверленным под углом 55 градусов на глубине 195 мм. Эхосигналы изме-

рялись в режиме тройного сканирования, при перемещении антенной решётки (рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, ширина пьезоэлемента 0,76 мм, зазор 0,04 мм) установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 градусов по сорока положениям с шагом 2,5 мм из точки $x_{w, \text{start}} = -300$ мм по передней грани призмы. Вдоль оси y , которая направлена перпендикулярно плоскости рисунка, были проведены измерения эхосигналов в 29 слоях с шагом 1,5 мм.

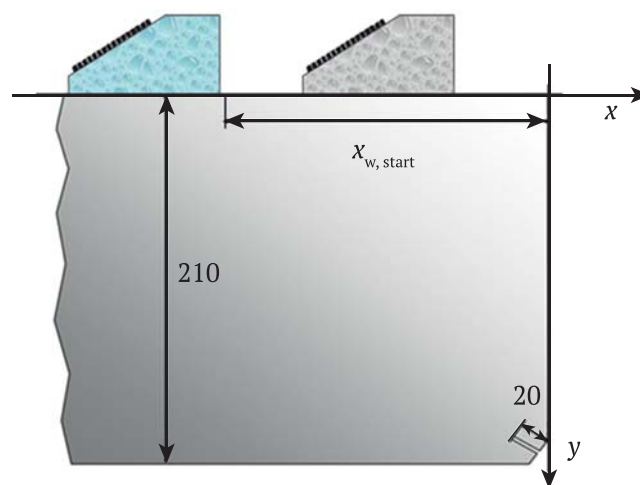


Рис. 1. Эскиз образца с плоскодонным отверстием диаметром 2,5 мм (5 мм^2) под углом 55 градусов на глубине 195 мм. Призма и антенная решётка показаны в крайнем левом (голубая заливка призмы) и правом положениях (чёрно-белая заливка)

На рис. 2 показаны изображения B -типа плоскодонного отверстия диаметром 2,5 мм, объединённые по максимуму. На левой панели показано изображение, восстановленное для одного положения антенной решётки методом C-SAFT [1], расположенной в точке ($x = -247,5$ мм) в плоскости, проходящей через плоскодонное отверстие. Обнаружить блик плоскодонного отверстия невозможно. На рисунки линиями чёрного цвета наброшена маска образца. Если восстановить изображение методом TS-C-SAFT в плоскости, проходящей через плоскодонное отверстие, то блик дна отверстия становится вполне различимым. Более того, благодаря диффузному рассеиванию, становится видно дно и стенка образца. Изображение, восстановленное методом 3D-TS-C-SAFT, дополнительно повышает уровень амплитуды блика над уровнем шума ещё примерно на 6 дБ. Если судить по блику заходной грани, то фронтальная разрешающая способность для режима тройного сканирования возросла более чем в четыре раза, а отношение сигнал/шум возросло более чем на 12 дБ.

На рис. 3 показаны изображения D -типа плоскодонного отверстия диаметром 2,5 мм объе-

Парциальное изображение, 21 слой, 2D-C-SAFT	Тройное сканирование, 2D-TS-C-SAFT	Тройное сканирование, 3D-TS-C-SAFT
---	--	--

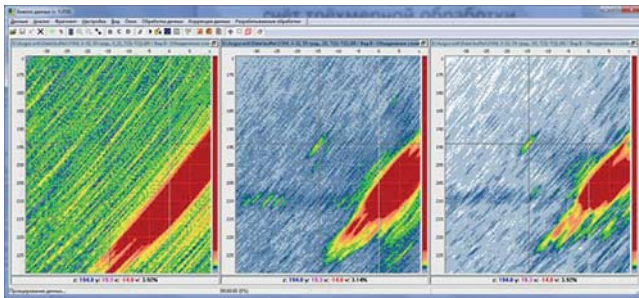


Рис. 2. Изображения B-типа плоскодонного отверстия площадью 5 мм², восстановленные разными алгоритмами

динённые по максимуму. Хорошо видно, что только изображение, восстановленное методом 3D-TS-C-SAFT, позволяет уверенно, то есть с отношением сигнал/шум более 12 дБ, обнаружить плоскодонное отверстие, изображение которого наброшено линиями чёрного цвета. Следует отметить, что фронтальное разрешение в дополнительной плоскости равно примерно 12 мм, что совпадает с шириной пьезоэлемента антенной решётки.

Парциальное изображение, 21 слой, 2D-C-SAFT	Тройное сканирование, 2D-TS-C-SAFT	Тройное сканирование, 3D-TS-C-SAFT
---	--	--

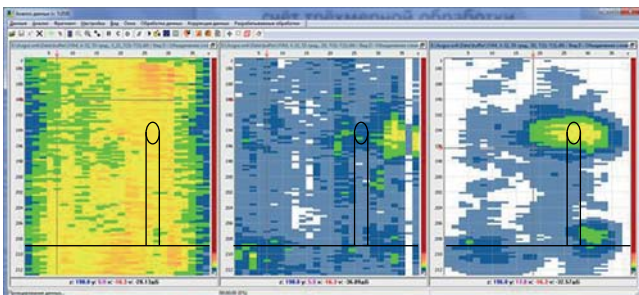


Рис. 3. Изображения D-типа плоскодонного отверстия площадью 5 мм², восстановленные разными алгоритмами

Использование сложных сигналов

Для материалов со значительным коэффициентом затухания ($\delta \approx \delta_0$) высокая чувствительность контроля и качество изображения рассеивателей могут быть достигнуты за счёт увеличения энергии вводимой в объект контроля. Для этих целей кроме простого повышения амплитуды зондирующего сигнала можно применять сложные зондирующие сигналы, представляющие собой, например, фазоманипулированные псевдослучайные последовательности [5, 6, 7]. Задача сжатия полученных сложных сигналов может решаться применением согласованной, инверсной или Винеровской фильтрации. Если для сбора данных используется сложный зондирующий сигнал $s(t)$, то можно сначала сжать измеренные эхосигналы $p(r_r, r_t, t)$ и затем по-

лучить изображение отражателей $I(r_i; as)$ по заданной акустической схеме as , так же как это делается в случае излучения простых сигналов. В работе [8] для проведения УЗК в материалах с аномально большим затуханием предложена технология сплит-сигналов. С её помощью удалось провести контроль бронзовых стенок Кремлёвского Царьколокола толщиной около 200 мм. Использование сложных сигналов позволяет значительно повысить отношение сигнал/шум для материалов с высоким уровнем затухания ультразвука.

Сжатие эхосигналов при использовании частотной фильтрации может привести к появлению «боковых лепестков». Продольная разрешающая способность изображения существенно не меняется. В статье [9] для сжатия сложных эхосигналов с достижением эффекта сверхразрешения метод максимальной энтропии (ММЭ) Практическое применение ММЭ для сжатия эхосигналов невозможно без демонстрации его устойчивости к влиянию шума. В модельном эксперименте регистрировались эхосигналы, отражённые от плоскодонного отверстия диаметром 1,0 мм на глубине 40,0 мм с наклоном 45 градусов. Измерения проводились пьезоэлектрическим преобразователем с резонансной частотой 4,0 МГц, углом ввода 40 градусов и половиной угла раскрытия 20 градусов, определяемой по уровню 10%. В качестве сложного сигнала использовалась фазоманипулированная последовательность согласно коду Баркера длиной 13.

На рис. 4 слева в верхнем ряду показан результат простой визуализации изображения плоскодонного отверстия при излучении простого импульса. На рисунок линиями чёрного цвета наброшены границы отверстия и образца. Видно, что блик отверстия, на центр которого указывает крестообразный маркер, из-за соизмеримого с ним по амплитуде уровня шума едва обнаруживается. На рис. 4 справа представлен результат восстановления по этим эхосигналам изображения методом ПСП [10]. Отношение сигнал/шум изображения полученного методом ПСП возросло более чем на 12 дБ в сравнении с простой визуализацией, а фронтальное разрешение уменьшилось с 15 мм до 1 мм. В нижнем ряду рис. 4 показаны изображения дна отверстия, восстановленные методом ПСП по эхосигналам сжатым согласованной фильтрацией (слева) и по эхосигналам сжатым ММЭ (справа). Использование сложного сигнала привело к дополнительному повышению отношения сигнал/шум более чем на 12 дБ. После сжатия сложного сигнала ММЭ уровень шума уменьшился не менее чем на 20 дБ, а лучевое разрешение уменьшилось с 0,7 мм до 0,2 мм. Так как использовался код Баркера, то после сжа-

тия эхосигнала согласованной фильтрацией уровень «боковых лепестков» незначителен. Из-за эффекта «зашкаливания» эхосигналов отражённых от наклонной границы образца, её изображение при использовании сложного сигнала, расширилось.

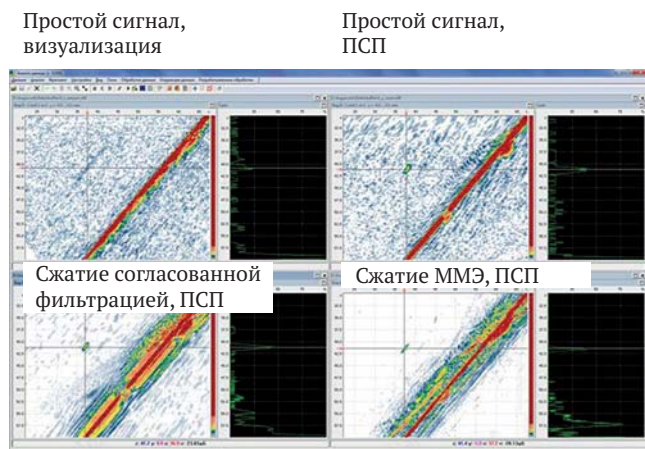


Рис. 4. Изображения, восстановленные по исходным эхосигналам, и после их сжатия согласованной фильтрацией и ММЭ

Таким образом, применение сложных сигналов и сжатие их ММЭ может повысить отношение сигнал/шум более чем на 40 дБ. Это очень большой запас чувствительности при проведении ультразвукового контроля.

Высокий уровень структурного шума

Для материалов со средним размером зерна $\lambda/10 < \langle D \rangle < \lambda/4$ справедливо соотношение $\delta_s \sim \langle D \rangle f^2$ [2], и затухание будет определяться в основном эффектом рассеивания ультразвука на зёрнах, то есть $\delta \approx \delta_s \langle D \rangle f^2$. Для таких материалов повысить отношение сигнал/шум за счёт увеличения энергии вводимой в материал не удаётся, так как одновременно с увеличением амплитуды импульса отражённого от дефекта увеличивается амплитуда импульсов отражённых от кристаллических зёрен. В крупнозернистых материалах основным фактором, влияющим на размер минимально обнаруживаемого отражателя является не недостаточная чувствительность, а высокий уровень структурного шума.

Когерентное накопление информации методом TS-C-SAFT

Как упоминалось в разделе Повышение отношения сигнал/шум за счёт когерентного накопления, когерентное сложение парциальных изображений восстановленных для разных положений антенной решётки повышает отношение сигнал/шум. продемонстрируем это на примере контроля аустенитного сварного соединения со стороны сварного

шва. Образец, на котором проводились измерения, представлял собой фрагмент трубопровода толщиной h равной 69 мм с аустенитным сварным соединением (рис. 5). С одного края на границе «сварной шов-основной металл (перлит)» на глубинах 8, 33 и 58 мм были изготовлены три отверстия бокового сверления диаметром 3 мм, обозначенные цифрами 4, 5 и 6 на рис. 5. Область сварного шва отмечена полупрозрачным многоугольником красного цвета. Скорость продольной волны в сварном соединении задавалась равной 5,6 мм/мкс. Измерения проводились в режиме тройного сканирования при сканировании по 150 точкам с шагом 0,93 мм. При восстановлении изображений отражателей методом TS-C-SAFT использовалась одна акустическая схема T(L)–T(L).

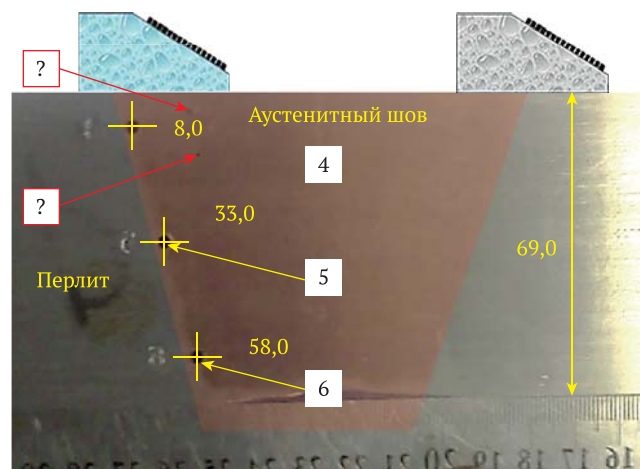


Рис. 5. Схема образца трубопровода толщиной 69 мм с тремя отверстиями бокового сверления диаметром 3,0 мм. Призма и антенная решётка показаны в крайнем левом (голубая заливка призмы) и правом положениях (чёрно-белая заливка)

На рис. 6 показано изображение границ отверстий бокового сверления и дна образца, восстановленное методом TS-C-SAFT. На левой панели показано парциальное изображение для одного положения антенной решётки, а на правом при когерентном сложении всех 150 парциальных изображений. Для увеличения амплитуды блика отверстия 6 контрастность изображения была увеличена. Хорошо видно, что после когерентного суммирования парциальных изображений отношение сигнал/шум возрос примерно на 6 дБ, что позволило через аустенитный шов обнаружить блик самого глубокого отверстия номер 6 с отношением сигнал/шум более 12 дБ. Уменьшение реверберационного шума после когерентного сложения позволило обнаружить два незаложенных отражателя, отмеченные на рис. 6 выносками «?». Эти два межваликовых несплавления видны на боковой поверхности образца, показанного на рис. 5. Линиями чёрного

Реверберационный шум в призме

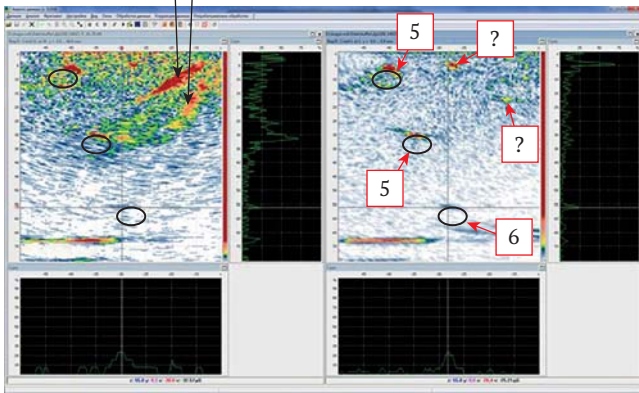


Рис. 6. Изображения границ отверстий бокового сверления и дна образца, восстановленные методом TS-C-SAFT. Слева — парциальное изображение для одного положения антенной решётки, а справа — изображение при когерентном сложении всех парциальных изображений

цвета на рисунки наброшена маска границ отверстий бокового сверления.

Оптимальная пространственная обработка

Как показано в работах [4, 11, 12], минимальный уровень структурного шума при формировании изображения отражателей можно получить с помощью многоканальной пространственно-временной обработки эхосигналов при регистрации эхосигналов в режиме двойного сканирования. В общем случае, метод оптимальной обработки основывается на принципе максимального правдоподобия и сводится к выполнению следующих действий:

- регистрация эхосигналов $p_{tr}(t)$ в режиме двойного сканирования, при излучении и приёме двумя любыми каналами;
- оценка корреляционной функции $R_{tr}(t)$ структурного шума данного объекта контроля между всеми элементами;
- расчёт весовых функций $R_{tr}^{-1}(t)$, зависящих от вида корреляционной функции $R_{tr}(t)$, для каждой пары излучатель-приёмник;
- обработка эхосигналов $p_{tr}(t)$ с учётом $R_{tr}^{-1}(t)$ для «выбеливания» структурного шума;
- восстановление изображения отражателей по «выбеленным» эхосигналам, что позволяет получить максимальное отношение сигнал/шум.

Метод TS-C-SAFT можно рассматривать как частный случай оптимального алгоритма, но в предположении, что структурный шум имеет характеристики белого пространственно-временного шума. Это, конечно, не позволяет достичь максимального отношения сигнал/шум, но, тем не менее, уменьшает уровень структурного шума, что и было продемонстрировано в разделе **Когерентное накопление информации методом TS-C-SAFT.**

Уменьшение длительности импульсов

Для уменьшения уровня структурного шума можно воспользоваться следующим способом, давно применяемым при проведении неразрушающего контроля. Известно, что отношение сигнал/структурный шум для дискового отражателя в ближней зоне определяется формулой [13]:

$$S/N \sim \frac{s}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{\delta_p c \tau S_{pl}}} \quad (1)$$

где S/N — оцениваемое отношение сигнал/шум, s — площадь дискового отражателя, S_{pl} — площадь пластины ПЭП, δ_p — коэффициент затухания, c — скорость звука в объекте контроля, τ — длительность импульса. Для случая дальней зоны и для других типов отражателей длительность импульса τ также находится в знаменателе приведенного выше выражения. Из формулы следует, что уменьшение длительности импульса позволяет повысить отношение сигнал/шум при контроле крупнозернистых материалов. Уменьшение длительности импульса за счет аппаратных решений имеет свои ограничения, связанные в первую очередь с демпфированием пьезоэлементов [2], поэтому создание «виртуального» ПЭП с очень коротким импульсом за счет применения методов достижения сверхразрешения является актуальной задачей.

Уменьшение длительности импульса τ можно рассматривать как вариант «выбеливания» структурного шума во времени, но не в пространстве, что в соответствии с соображениями, изложенными в разделе Оптимальная пространственная обработка, должно дополнительно уменьшить уровень структурного шума при восстановлении изображения отражателей методом TS-C-SAFT.

Так как уменьшение длины импульса должно привести к повышению отношения сигнал/шум, то применение алгоритмов экстраполяции спектров эхосигналов может дать интересный результат. Один из методов экстраполяции основан на построении AR-модели спектра эхосигнала [14], с помощью которой можно рассчитать спектр эхосигнала [15] за пределами полосы пропускания преобразователя. Увеличение в μ раз полосы пропускания (f_{min}, f_{max}) приводит к уменьшению в μ раз длительности импульса.

Для повышения отношения сигнал/шум при контроле материалов со структурным шумом применяется метод расщепления спектра [16, 17]. Предположим, что измерен эхосигнал:

$$s_n(t) = s(t) + n(t),$$

где $s(t)$ эхосигнал от несплошности, а $n(t)$ шум. Спектр $S(f)$ эхосигнала $s(t)$ в основном сосредоточен в частотной области шириной $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ определяемой в первую очередь резонансными свойствами преобразователя. Если исходный диапазон частот разбить на M поддиапазонов, меньших размеров $\Delta f^m = f_{\max}^m - f_{\min}^m = \Delta f / M$, то в каждом из них будет присутствовать, как часть спектра полезного сигнала $S_m(f)$, так и часть спектра шума $N_m(f)$. В методе расщепления спектра обработанный сигнал формируется при суммировании с коэффициентом w_m парциальных сигналов $s_n^m(t) = s^m(t) + n^m(t)$, полученных по каждому фрагменту спектра по формуле

$$s_n^M(t) = \sum_{m=0}^M w_m s_n^m(t) = \sum_{m=0}^M w_m \mathcal{F}^{-1}(S_n^m(f)) \quad (2)$$

где \mathcal{F}^{-1} — оператор обратного преобразования Фурье. Каждый парциальный сигнал $s_n^m(t)$ содержит в себе часть спектра полезного сигнала и тем самым дает постоянный вклад в итоговый сигнал, в то время как $n_n^m(t)$ дает случайный вклад. Это повышает отношение сигнал/шум обработанного сигнала $s_n^M(t)$ в сравнении с исходным сигналом $s_n(t)$. Максимальный эффект достигается тогда, когда все $n_n^m(t)$ статистически независимы [3]. Оценить повышение отношения сигнал/шум можно следующим образом. При сложении независимых шумовых сигналов $n_n^m(t)$ амплитуда суммарного сигнала возрастает пропорционально корню квадратному из количества измерений \sqrt{M} , а при сложении полезного сигнала результирующая амплитуда возрастает в M раз. То есть можно ожидать предельного повышения отношения сигнал/шум в \sqrt{M} раз. Широкого применения этот метод не получил, скорее всего, из-за недостаточной его эффективности, которая кроется в том, что спектр структурного шума очень близок спектру отражённого от несплошности импульса [18].

Однако, метод расщепления спектров может быть развит следующим образом. Пусть каждый из парциальных спектров $S_n^m(f)$ перед выполнением обратного преобразования Фурье, экстраполируется с интервала (f_{\min}^m, f_{\max}^m) на интервал (f_{\min}^e, f_{\max}^e) , где $f_{\min}^e < f_{\min}^m$ и $f_{\max}^e > f_{\max}^m$. 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. То, что спектры сигналов проэкстраполированы 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 полезного сигнала будет более заметен.

Ещё один способ уменьшения длительности импульсов заключается в деконволюции эхосигналов с использованием ММЭ [9]. Эффективность такого подхода для сжатия сложных сигналов с достижением эффекта сверхразрешения была продемонстрирована в разделе **Использование сложных сигналов**.

Для проверки возможности уменьшения уровня структурного шума при уменьшении длительности импульсов были обработаны эхосигналы, полученные в модельном эксперименте и описанные в разделе **Когерентное накопление информации методом TS-C-SAFT**. Из исходного набора эхосигналов были выделены эхосигналы только для четырёх положений антенной решётки с шагом перемещения 0,93 мм. Для уменьшения реверберационного шума из эхосигналов был вычтен медианный шаблон B -типа.

На рис. 7 показаны огибающие одного эхосигнала из залпа (график красного цвета) и результат его деконволюции ММЭ (график чёрного цвета). Разрешающая способность, если оценивать её по импульсу, отражённому от отверстия 5, возросла более чем в три раза, амплитуда импульсов структурного шума осталась примерно такая же, а вот его матожидание уменьшилось более чем на 6дБ. Можно утверждать, что произошло «выбеливание» шума. Идентифицировать импульс от отверстия 6 невозможно!

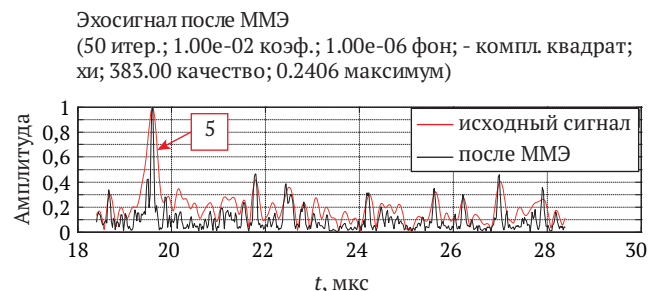


Рис. 7. Огибающие одного эхосигнала из залпа (график красного цвета) и результат его деконволюции ММЭ (график чёрного цвета)

На рис. 8 слева показано изображение методом TS-C-SAFT по исходным сигналам для четырёх положений антенной решётки, а справа по эхосигналам обработанным ММЭ. Для увеличения амплитуды блика отверстия 6 контрастность изображения была увеличена. Видно, что пиковый уровень шума уменьшился незначительно, но изменилась его структура подобно тому, как изменилась форма ММЭ-эхосигнала на рис. 7.

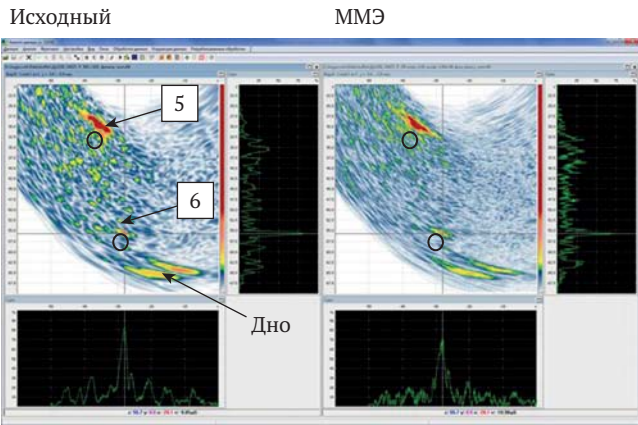


Рис. 8. Изображения границы отверстий 5 и 6, восстановленные методом TS-C-SAFT. Слева — по исходным эхосигналам, а справа — по эхосигналам после деконволюции ММЭ

Следует отметить важное обстоятельство. Как видно по форме ММЭ-эхосигнала на рис. 7 продольная разрешающая способность изображения должна возрасти более чем в три раза, но на восстановленном изображении на рис. 8 справа повышения продольного разрешения не наблюдается. По-видимому, дело в том, что аустенитный шов в образце (рис. 5) обладает анизотропными свойствами, пусть и слабо выраженными. Это приводит к тому, что расчёт времён в обычном методе C-SAFT для изотропной однородной среды задержек может происходить с ошибкой порядка длины сжатого сигнала, и в результате эффективность когерентного накопления значительно уменьшается. Поэтому в восстановленном изображении на рис. 8 справа не удалось получить ни принципиального уменьшения уровня структурного шума, ни заметного повышения лучевой разрешающей способности.

Однако то обстоятельство, что шум изображения, восстановленного по ММЭ-эхосигналам, стал состоять из большего количества бликов с более высоким продольным разрешением, позволяет провести следующую обработку изображения. Для каждого парциального изображения выполняется отсечка по уровню медианы модуля изображения, реальная и мнимая части каждого парциального изображения подвергается двумерной медианной фильтрации, что позволяет подавить «выбеленный» шум, и только после этого для получения итогового изображения все парциальные изображения когерентно складываются. На рис. 9 слева показано обработанное таким образом изображение, восстановленное по исходным сигналам, а справа восстановленное по ММЭ-эхосигналам. Для увеличения амплитуды блика отверстия 6 контрастность изображения была увеличена. На этот раз уменьшение уровня структурного шума принципиально замет-

нее, чем на рис. 8. Количественная оценка повышения качества изображения приведена в Таблица 1. На рис. 9 справа хорошо видны блики, отмеченные выносками со знаком «?», которые связаны с межваликовыми несплавлениями. На наличие бликов межваликовых несплавлений указано и на Рис. 6.

Исходный, обраб.

ММЭ, обраб.

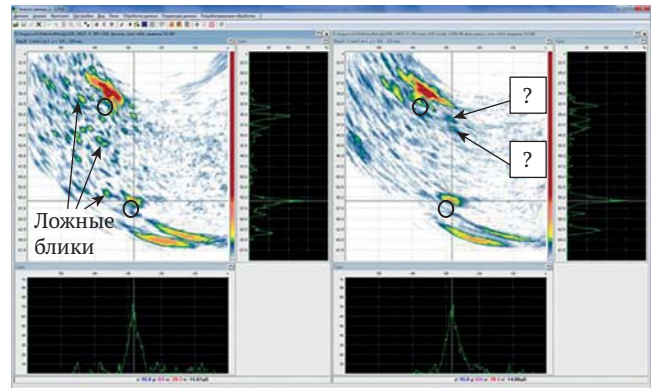


Рис. 9. Изображения границы отверстий 5 и 6, восстановленные методом TS-C-SAFT с дополнительной обработкой парциальных изображений. Слева — по исходным эхосигналам, а справа — по ММЭ-эхосигналам

На рис. 10 показаны огибающие одного эхосигнала из залпа (график красного цвета) и результат его обработки при построении AR-модели спектра совместно с методом расщепления спектра (график чёрного цвета). Разрешающая способность, если оценивать её по импульсу, отражённому от отверстия 6, возросла более чем в три раза, амплитуда импульсов структурного шума осталась примерно такая же, а вот его матожидание уменьшилось более чем на 6дБ. Можно утверждать, что произошло «выбеление» шума, так же как это произошло при деконволюции с помощью ММЭ (см. рис. 7).

Огибающая эхосигналов после построения AR-модели (номер 660, (0.10, 1.00, 7.50, 15.00) МГц, порядок 52, оценка b, (6, 0.80))

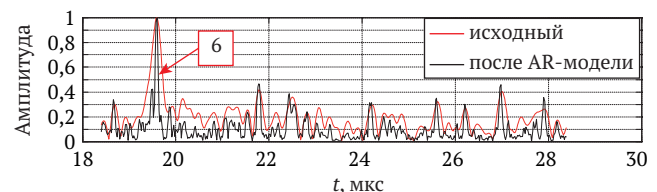


Рис. 10. Огибающие одного эхосигнала из залпа (график красного цвета) и результат его обработки при построении AR-модели спектра совместно с методом расщепления спектра (график чёрного цвета)

На рис. 11 слева показано обработанное, так же как и на рис. 9, изображение, восстановленное по эхосигналам после их AR-обработки, а справа восстановленное по эхосигналам при построении AR-модели спектра совместно с методом расщепления спектра. Для увеличения амплитуды блика отвер-

стия 6 контрастность изображения была увеличена. Блики, отмеченные выносками со знаком «?», уверенно видны только на Рис. 11 справа. Количественная оценка повышения качества изображения приведена в Таблица 1.

AR-модель, обраб. AR-модель и расщепление, обраб.

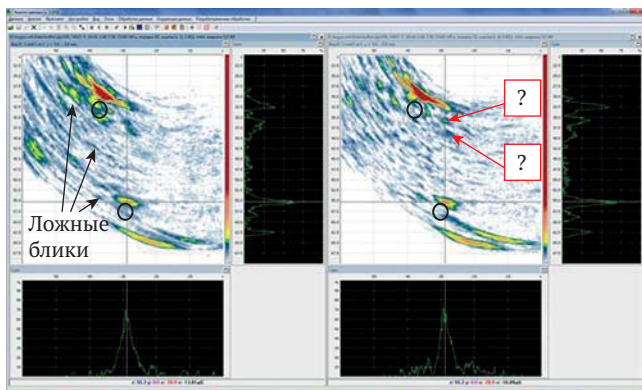


Рис. 11. Изображения границы отверстий 5 и 6, восстановленные методом TS-C-SAFT с дополнительной обработкой парциальных изображений. Слева — по эхосигналам после их AR-обработки, а справа — по эхосигналам после совместного применения AR-обработки и расщепления спектра

Восстановление изображения с помощью ММЭ по набору эхосигналов

В статье [19] было предложено восстанавливать изображения отражателей по набору эхосигналов, измеренных в режиме двойного или тройного сканирования, с помощью ММЭ. Такой подход позволяет получать изображения отражателей с лучевым и поперечным сверхразрешением, а в работе [20] была продемонстрирована эффективность его применения при восстановлении изображения в объекте с повышенным уровнем структурного шума.

Для демонстрации эффективности применения ММЭ для подавления структурного шума обрабатывались те же эхосигналы, что и в разделе Уменьшение длительности импульсов. Только для уменьшения объема данных, эхосигналы были проселектированы так, чтобы остались эхосигналы от отверстия 6. Парциальные изображения восстанавливались корреляционным методом по формуле (4) [1] и ММЭ по формулам (11) [1] для каждого положения антенной решётки, которые когерентно складывались для получения результирующего изображения. Объем памяти персонального компьютера позволял восстанавливать изображение на сетке 150 на 200 точек, что сделало возможным использовать коммутационный матрицу C [1], использующую 300 эхосигналов, что составляет примерно 30% из 1024 измеренных. Каждый эхосигнал состоял из 100 отсчётов. Было восстановлено

по пять комплектов изображений со случайной матрицей C для каждого из четырёх положения антенной решётки. Так как комплект изображений был получен для восьми значений коэффициента Лагранжа, то для формирования итогового изображения имелось 160 парциальных изображений. Для определения качества фокусировки каждого изображения анализировалась его гистограмма, что позволило выбрать самые сфокусированные изображения, которые складывались для получения итогового изображения, как корреляционным методом, так и ММЭ по набору эхосигналов.

На рис. 12 слева показано изображение границ отверстия 6, восстановленные корреляционным методом. Более высокий уровень шума в сравнении с рис. 8 слева объясняется использованием 300 эхосигналов, а не 1024. На рис. 12 справа показаны результаты обработки тех же эхосигналов ММЭ после выполнения 15 итераций при фоновом коэффициенте $\mu = 10^{-6}$ [22]. В сравнении с изображением, полученным корреляционным методом, лучевая разрешающая способность изображения, полученного ММЭ, возросла примерно в три раза, а отношение сигнал/шум, увеличилось более чем на 30дБ (см. рис. 9, слева). И это изображение отверстия 6 имеет самое высокое качество (см. Таблица 1).

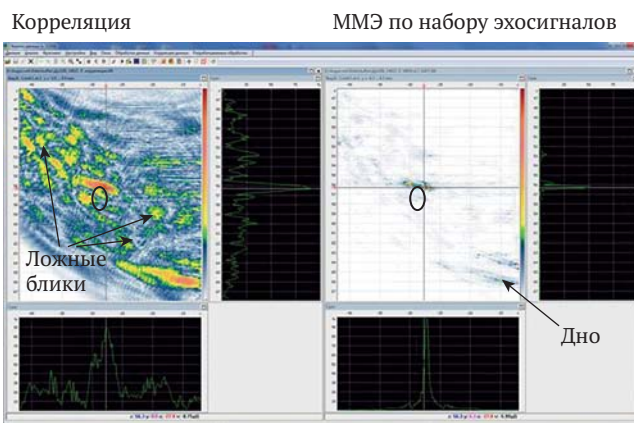


Рис. 12. Изображения границ отверстия 6, восстановленные корреляционным методом (слева) и ММЭ (справа)

Если восстанавливать изображения не на персональном компьютере, а на компьютере с оперативной памятью более 1 Тбайт, то, обработав одновременно эхосигналы для всех четырёх положений антенной решётки, итоговое изображение должно получиться ещё более высокого качества, чем на рис. 12 справа.

Ещё раз следует обратить внимание и на то, что блик границы отверстия 6 распался на два блика, что свидетельствует о том, что сварной шов обладает анизотропными свойствами. По этой же причине на рис. 6 блик отверстия 5 плохо сфокусировался. Поэтому получение качественных изобра-

жений в таких объектах контроля невозможно без использования алгоритмов, учитывающих неоднородность и анизотропию акустических свойств.

Для сравнения изображений отверстия 6, восстановленных разными способами, использовались два критерия. Первый — это отношение сигнал/шум изображения, определяемое как отношение максимального значения изображения к среднему уровню фона, и второе — отношение максимальной амплитуды ложного блика к амплитуде блика, соответствующего границе отверстия. Как следует из Таблица 1 лучшее изображение получается с использованием ММЭ при обработке набора эхосигналов (рис. 12, справа). Второе по качеству изображения восстановлено методом TS-C-SAFT по эхосигналам после деконволюции ММЭ (рис. 9, справа).

Таблица 1. Сравнение изображений отверстия 6, восстановленных разными способами

	Способ восстановления	Сигнал/шум, дБ	Амплитуда ложного блика, дБ	Рисунок
1	Исходный	16	– 4	Рис. 6, слева
2	Исходный, обраб.	25	– 5	Рис. 9, слева
3	AR-модель, обраб.	24	– 6	Рис. 11, слева
4	AR-модель и расщепление, обраб.	25	– 8	Рис. 11, справа
5	ММЭ, обраб.	27	– 9	Рис. 8, справа
6	ММЭ для набора эхосигналов	32	– 18	Рис. 12, справа

Подавление ложных бликов в изображении отражателей

Появление ложных бликов в изображении отражателей связано со сложностью полноценного учёта всех эффектов при распространении и отражении от несплошностей ультразвуковой волны. На качество изображения влияет и методика регистрации эхосигналов, то есть количество преобразователей или антенных решёток, способ их сканирования и режим регистрации.

Использование режима двойного сканирования на как можно большей апертуре

Наиболее широко распространённые схемы регистрации эхосигналов при проведении ультразву-

кового контроля совмещённая схема регистрации сканирующим одноэлементным преобразователем, и режим двойного сканирования, он же FMC, при использовании антенной решётки, которая также может перемещаться по поверхности объекта контроля.

Для демонстрации особенностей восстановления изображения отражателей были проведены численные эксперименты с использованием программы CIVA (версия 11), в которой моделировался случай регистрации эхосигналов от отверстия бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 13 мм в образце толщиной 18 мм с использованием сканирующего одноэлементного преобразователя с пластиной шириной 2 мм. Моделировались ситуации регистрации эхосигналов в том же образце, но тремя антенными решётками с шагом 1 мм, шириной элемента 0,75 мм с количеством элементов 16, 32 и 64 элементов с рабочей частотой 5 МГц. Преобразователь и антенные решётки были установлены на рексолитовую призму с углом наклона 20 градусов. При расчёте эхосигналов учитывать распространение продольной и поперечной волны, их трансформация при отражении от границ образца и отверстия бокового сверления и возникновение импульса обегания.

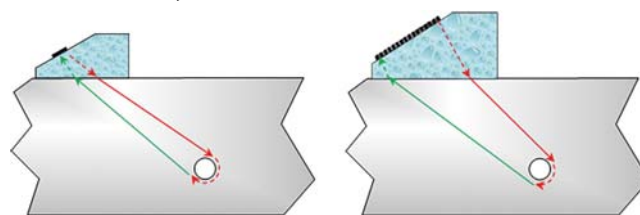


Рис. 13. Образец толщиной 18 мм с отверстием бокового сверления диаметром 2 мм. Стрелками красного цвета показаны пути распространения ультразвука при излучении, а зелёными при приёме. Сплошные линии соответствуют поперечной волне, а пунктирные продольной

На рис. 14 приведены изображения отверстия бокового сверления, полученные как одноэлементным преобразователем, так и тремя антенными решётками с разным количеством элементов. Рассмотрим особенности восстановленных изображений. Так как в совмещённом режиме для любого положения преобразователя импульса обегания распространяется по половине длины окружности (рис. 13, слева), то этот импульс формирует ложных блик амплитудой –11 дБ по отношению к блику границы отверстия. При использовании режима двойного сканирования время пробега импульса обегания будет отличаться для разных пар элементов антенной решётки: самым маленьким будет время при излучении первым элементом и приёмом последним (рис. 13, справа). Строго говоря, эта

пара породит ещё один, путь с самым большим временем пробега, когда импульс обегания будет распространяться по часовой стрелке. Чем больше размеры антенной решётки и чем больше диаметр отверстия, тем больше будут измерения времён задержки и тем меньше будет амплитуда блика в восстановленном изображении. Это приводит к тому, что для антенной решётки из 16 элементов амплитуда блика обегания будет -20 дБ, для 32 элементов -22 дБ, для 64 элементов -28 дБ (Рис. 14).

Важной особенностью формирования изображения при регистрации эхосигналов в совмещённом режиме состоит в том, что время пробега импульса по схеме $T(S)-TB(SS)$, практически совпадает со временем пробега импульса по схеме $T(S)-T(S)$, но от отражателя расположенном на глубине равной толщине образца. Это приведёт к появлению ложного блика в области дна образца амплитудой равной -3 дБ (рис. 14). При регистрации эхосигналов в режиме двойного сканирования, такое совпадение будет справедливым только, когда элемент антенной решётки излучает и сам принимает эхосигнал. В результате на изображении полученном методом C-SAFT для антенной решётки из 16 элементов амплитуда этого блика будет равна -28 дБ, для 32 элементов -38 дБ, для 64 элементов меньше -40 дБ.

Так как призма имеет угол наклона 20 градусов, то эффективно излучались как продольная, так и поперечная волна. Восстановление методом SAFT по акустической схеме $T(S)-T(S)$ изображения отражателей измеренных по эхосигналам в совмещённом режиме имеет блик амплитудой -3 дБ, сформированный импульсами продольных волн (на рис. 14 отмечен выноской $T(L)-T(L)$). Использование антенных решёток позволяет существенно уменьшить уровень этого блика до -14 дБ для 16 элементов, до -21 дБ для 32 элементов и до -26 дБ для 64 элементов. Угол наклона призмы в 20 градусов приводит к тому, что блик отверстия, восстановленный методом SAFT по эхосигналам, измеренным преобразователем в совмещённом режиме, разбивается на два блика, так как в районе первого критического угла коэффициент прохождения уменьшается до нуля. Использование антенной решётки, с помощью которой можно зарегистрировать лучи с углами отличными от первого критического, приводит к тому, что блик отверстия не раздваивается.

Так шаг перемещения преобразователя был равен $0,2$ мм, то на изображении, полученном методом SAFT, отсутствует шум грубого шага измерения. Так как шаг размещения элементов антенной решётки равен 1 мм, то на изображениях восста-

Совмещённый режим, SAFT 16 элементов, C-SAFT

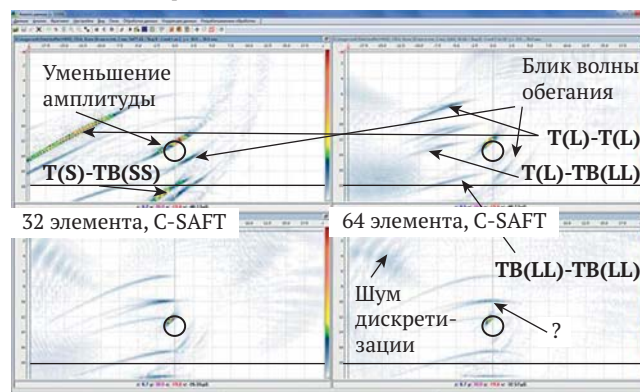


Рис. 14. Восстановление изображения отверстия бокового сверления диаметром 2 мм по акустической схеме $T(S)-T(S)$

новленных методом C-SAFT появился шум порядка -24 дБ.

Таким образом, можно утверждать, что регистрация эхосигналов в режиме двойного сканирования и восстановление изображения методом C-SAFT, позволяет значительно уменьшить амплитуды ложных бликов, особенно, при количестве элементов больше чем 30 .

Восстановление изображения отражателей по многим акустическим схемам

Как отмечалось в предыдущем разделе, на изображении, восстановленном по одной схеме, могут быть ложные блики, которые могут значительно исказить результаты оценки количества и типа отражателей. Анализ множества парциальных изображения восстановленных на разных акустических схемах может позволить отличить ложный блик от блика, соответствующего несплошности.

Ответить на вопрос: «Ложный или истинный блик присутствует на изображении, например, по акустической схеме $T(S)-TBT(SSS)$?», — можно установив на анализируемый блик крестообразный маркер в синхронном режиме анализа нескольких парциальных изображений. Если на изображениях по иным акустическим схемам в этой точке нет блика, то такой блик можно считать ложным. Однако такую ручную работу можно исключить, если анализировать объединённое изображение, полученное как медиана парциальных изображений.

Продemonстрируем возможности такого подхода, обрабатывая эхосигналы, рассчитанные в численном эксперименте и описанном в предыдущем разделе. Было восстановлено 12 парциальных изображений полученных с использованием антенной решётки из 64 элементов: шесть парциальных изображений на продольных волнах с учётом двукратного отражения от границ объекта контр-

оля при излучении и приёме и шесть аналогичных, но для поперечных волн. На рис. 15 показано три парциальных изображения: два на прямом луче для продольной и поперечной волны и для акустической схемы на поперечных волнах на прямом луче при излучении и двукратном отражении при приёме (Т(S)–ТВТ(SSS)). Объединённое изображение показано на рис. 15, на котором амплитуда ложных бликов уменьшилась более чем на 12дБ и на котором угадывается контуры отверстия с левой стороны.

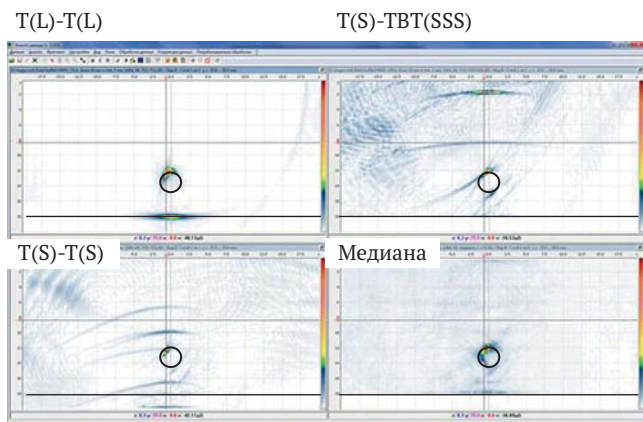


Рис. 15. Парциальные изображения отверстия бокового сверления для трёх акустических схем и объединённое как модуль медианы при использовании антенной решётки из 64 элементов

Восстановление изображения с учётом эффекта перерассеивания ультразвуковых импульсов между отражателями

Обычный метод С–САFT не учитывает эффекта перерассеивания импульсов между отражателями. Такой подход справедлив в так называемом Борновском приближении, когда рассеянное отражателями поле много меньше амплитуды падающего поля. При ультразвуковом контроле металлов характерным является ситуация, когда рассеянное трещиной или порами поле имеет амплитуду соизмеримую амплитудой падающей волны. Эффект перерассеивания приводит к тому, что в восстановленном изображении появятся ложные блики, наличие которых может существенно осложнить оценку типа отражателя и их количества.

Для решения прямой задачи рассеивания в частотной области использовался расчёт поля с разложением рассеянного поля в ряд Борна [21]. Умение рассчитывать рассеянное поле позволяет решить обратную задачу рассеивания методом наименьших квадратов. Такой подход с добавлением регуляризирующего функционала в виде максимальной энтропии для решения обратной задачи применялся в работе [22]. Проиллюстрируем эф-

фективность применения данного подхода в численном эксперименте для одномерного варианта, который в практике ультразвукового контроля подобен контролю прямым преобразователем материалов, состоящих из слоёв толщиной в несколько длин волн. На рис. 16 линиями красного цвета показаны отражатели в виде восьми точек с разной амплитудой. Эффект пятикратного отражения приводит к тому, что в эхосигнале появляется множество ложных эхосигналов. Зондирующий сигнал имел вид δ -функции. Если эхосигналы разместить вдоль пространственной оси, то есть восстановить изображение простейшим способом без учёта перерассеивания, то из-за большого количества ложных бликов невозможно определить ни правильное количество отражателей, ни их амплитуду (см. линию чёрного цвета на рис. 16).

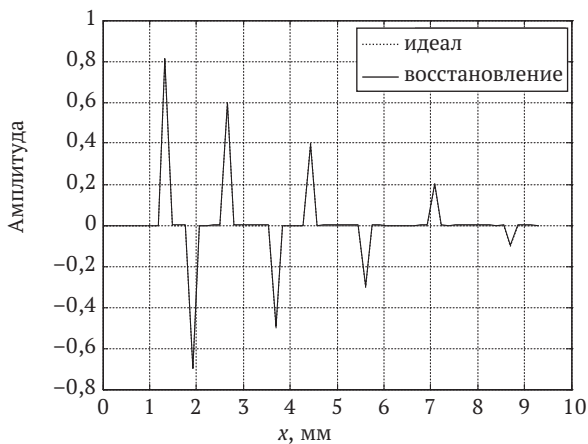


Рис. 16. Вид отражателей и их восстановленное изображение без учёта эффекта переотражения

Используя алгоритм, предложенный в статье [22], можно восстановить изображения отражателей практически без ложных бликов при отсутствии шума. Как видно на рис. 17 слева амплитуды отражателей можно измерить с точностью менее 1 процента, уровень шума менее 1 процента и количество отражателей определяется точно. Однако добавление в эхосигнал белого шума амплитудой 0,1, привело к тому, что амплитуды трёх отражателей малой рассеивающей силы, можно определить с ошибкой около 30%, а отражатель амплитудой 0,1 уже сложно обнаружить (рис. 17, справа).

В практике ультразвукового контроля не удаётся регистрировать δ -подобные импульсы. Обычно удаётся работать с импульсами длиной 2–4 периода. В этом случае даже в отсутствии шума не удаётся восстановить идеальное изображение отражателей, но применение ММЭ позволяет получить практически идеальное изображение. Большой интерес представляет поведение алгоритма при наличии шума. На рис. 18 показан идеальное изображение четырёх точечных отражателей с разной амплитудой.

Восстановленное изображение рассеивателей (5 перерасеивания; 50 итер.; $1.00e-11$ коэф.; $1.00e-10$ фон; 56.00 качество)



Восстановленное изображение рассеивателей (5 перерасеивания; 50 итер.; $1.00e-08$ коэф.; $1.00e-10$ фон; 47.00 качество)

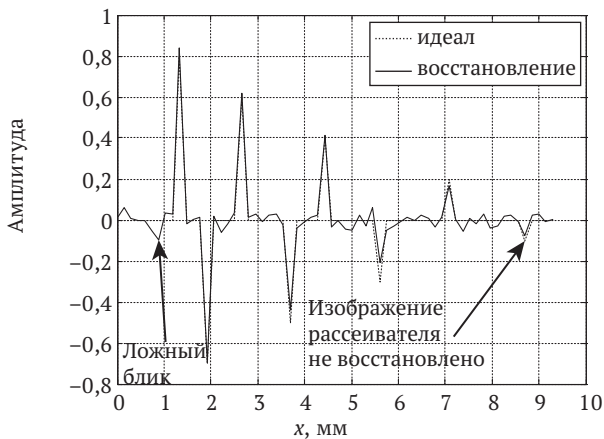


Рис. 17. Восстановленное изображение отражателей (чёрная сплошная линия) и их заданный вид (чёрная пунктирная линия). Слева с нулевым уровнем шума, справа с уровнем шума 0,1

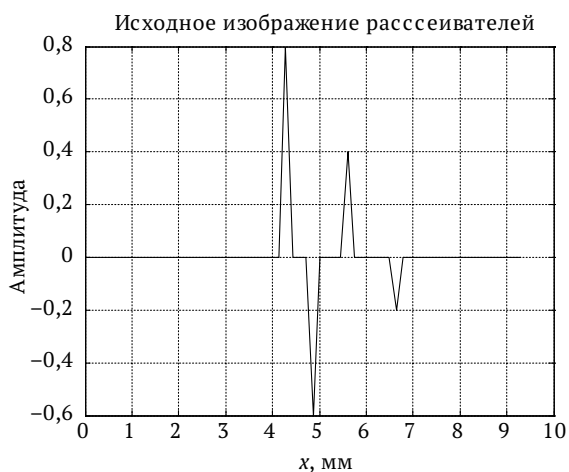
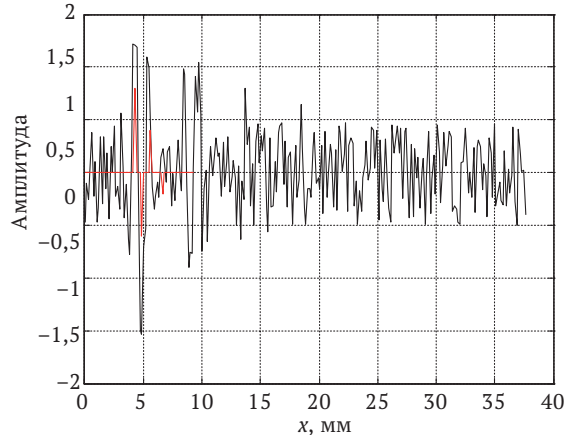


Рис. 18. Идеальное изображение отражателей

На рис. 19 слева линиями красного цвета показано идеальное изображение отражателей, а линиями чёрного цвета восстановленное изображение

при наличии белого шума амплитудой 0,5. В качестве зондирующего сигнала использовался Гауссоподобный сигнал длиной 4 периода с несущей частотой 2,5 МГц. На рис. 19 справа показано восстановленное изображение отражателей с учётом перерасеивания. Форма и амплитуда трёх первых отражателей восстановилась с точностью до 20%, а информации о четвертом отражателе не получено совсем, кроме того появилось пять ложных бликов со средней амплитудой около 0,1.

Изображение отражателей (5 перерасеиваний, (1.00, 5.00) МГц, 0.50 шум)



Восстановленное изображение рассеивателей (5 перерасеивания; 227 итер.; $1.00e-01$ коэф.; $1.00e-05$ фон; 56.00 качество)

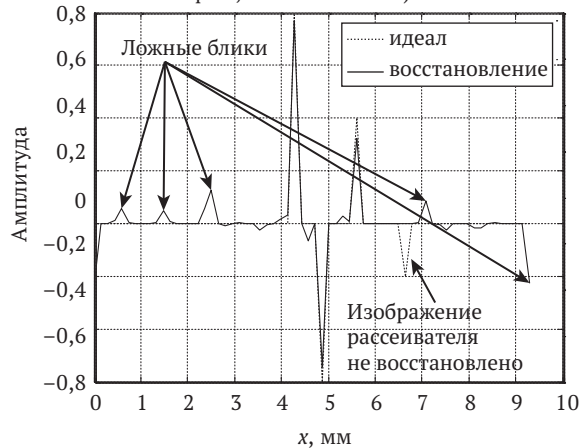


Рис. 19. Простое восстановление изображения отражателей (слева) и с учётом эффекта перерасеивания (справа) для импульса длиной 4 периода

Если увеличить энергию излучённого импульса, сделав его длину равной 8 периодам, то можно получить более качественное изображение. На рис. 20 слева линиями красного цвета показано идеальное изображение отражателей, а линиями чёрного цвета восстановленное изображение при наличии белого шума амплитудой 0,5. На рис. 20 справа показано восстановленное изображение отражателей с учётом перерасеивания. Форма и амплитуда трёх первых отражателей восстанови-

лась с точностью до 10%, а информации о четвертом отражателе так же не удалось получить. Число ложных бликов уменьшилось до трёх со средней амплитудой около 0,05.

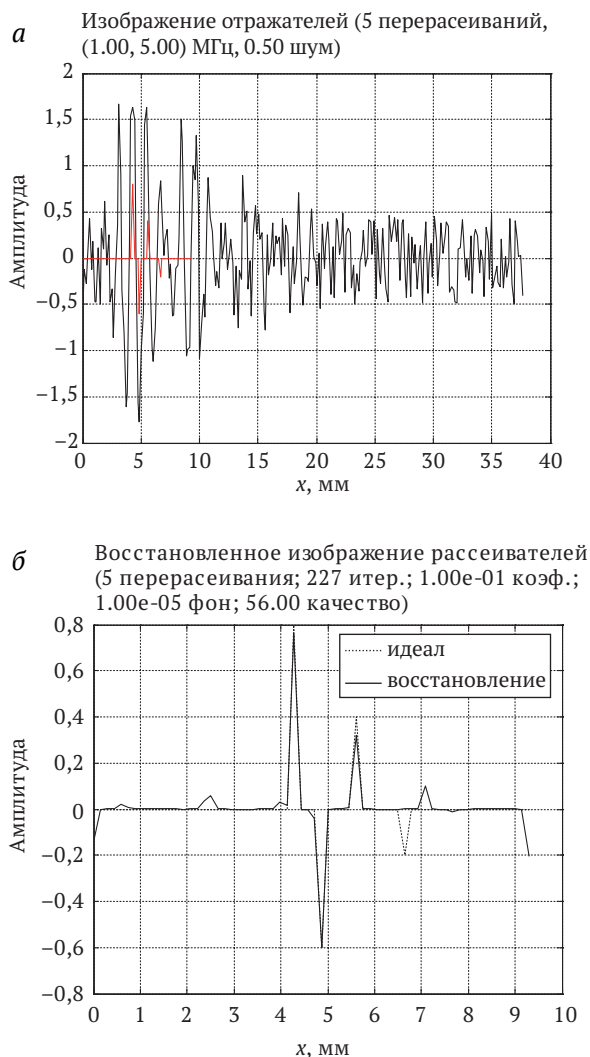


Рис. 20. Простое восстановление изображения отражателей (а) и с учётом эффекта перерасеивания (б) для импульса длиной 8 периодов

Следует упомянуть очень перспективное направление решения обратных задач, развиваемое для медицинской ультразвуковой диагностики, которое по мере роста вычислительных мощностей будет всё более и более востребовано. Для решения обратной коэффициентной задачи для скалярного волнового уравнения минимизируется невязка между измеренными эхосигналами и оценкой эхосигналов, рассчитанных для заданного распределения скорости звука в объекте контроля [5]. Распределение скорости, при котором невязка будет минимальна, и будет решением. Но в статье [23] предложен способ прямого вычисления градиента функционала невязки с помощью решения, так называемой, сопряжённой задачи для волнового уравнения, решаемого методом конечных раз-

стей. Знание градиента позволяет принципиально повысить скорость решения задачи минимизации.

Выводы

Материал, изложенный в статье, позволяет сделать следующие выводы.

- Применение метода 3D-TS-C-SAFT очень эффективно повышает отношение сигнал/шум. Использование сложных сигналов так же позволяет значительно увеличить отношение сигнал/шум.
- Метод TS-C-SAFT позволяет за счёт когерентного накопления сигналов уменьшить уровень структурного шума. Еще большего уменьшения его уровня можно достичь, уменьшая длительность эхосигналов за счёт построения AR-модели их спектров и деконволюции эхосигналов ММЭ.
- Наибольшего снижения уровня структурного шума удалось достичь, восстанавливая изображение отражателей по набору эхосигналов ММЭ.
- Получение качественных изображений в объектах контроля с аустенитами сварными соединениями невозможно без использования алгоритмов, учитывающих неоднородность и анизотропию акустических свойств.
- Регистрация эхосигналов в режиме двойного сканирования и восстановление изображения методом C-SAFT, позволяет значительно уменьшить амплитуды ложных бликов, в сравнении с использованием одноэлементного преобразователя.
- Для восстановления изображения отражателей без ложных бликов можно использовать ММЭ при расчёте рассеянного поля с помощью ряда Борна.

Опубликовано в журнале
Контроль. Диагностика № 6, 2015

Список литературы

1. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решётками.
2. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля // М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
3. Левин Б.Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике // М.: Сов. радио, 1960. 664 с.
4. Пространственно-временная обработка сигналов/И.Я. Кремер [и др.]; Под ред. И.Я. Кремера. М.: Радио и связь, 1984. 223 с.
5. Вакман Д.Е. Сложные сигналы и принцип неопределенности в радиолокации // М.: Советское радио, 1965. 303 с.

6. Качанов В.К., Раппопорт Д.А., Мозговой А.В. Разработка новых методов ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов на основе использования радио-локационных сигналов // Дефектоскопия. 1990. № 9. С. 9–20.
7. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Применение псевдослучайных последовательностей в цифровой акустической голографии // Акуст. журн.. 1989. № 5. С. 784–790.
8. Соколов И.В. Разработка помехоустойчивых методов и средств многофункциональной ультразвуковой дефектоскопии сложноструктурных изделий: дис. ... доктора технических наук. М., 2007. 275 с.
9. Базулин А.Е., Базулин Е.Г. Деконволюция сложных эхосигналов методом максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле // Акустический журнал. 2009. № 6. С. 772–783. DOI: 10.1134/S1063771009060189
10. 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. 46–65. DOI: 10.1134/S1061830914020028
11. Фалькович С.Е. Прием радиолокационных сигналов на фоне флюктуационных помех // М.: Советское радио. 1961. 312 с.
12. Карташев В.Г., Качанов В.К., Шалимова Е.В. Основные положения теории пространственно-временной обработки сигналов применительно к задачам ультразвуковой дефектоскопии изделий из сложноструктурных материалов // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 19–29.
13. Ермолов И.Н. К вопросу о выборе оптимальных параметров эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. 1965. № 6. С. 51–61.
14. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ // М.: Мир, 1990. 584 с.
15. 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.
16. Split-Spectrum Processing: Analysis of Polarity Thresholding Algorithm for Improvement of Signal-to-Noise Ratio and Detectability in ultrasonic signals/P.M. Shankar [et al.] // Ultrasonic Signals. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1989. Vol. 36, № 1. P. 101–108.
17. Gustafsson M.G. Towards adaptive split spectrum processing // Ultrasonics symposium proceedings. IEEE. 1995. Vol. 1. P. 729–732.
18. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Туркин М.В. Проблемы выделения УЗ сигналов из структурного шума при контроле изделий из сложноструктурных материалов // Дефектоскопия. 2007. № 9. С. 71–86.
19. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для получения изображения рассеивателей по набору эхосигналов // Акустический журнал. 2013. № 2. С. 235–254. DOI: 10.1134/S1063771013020024
20. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей по ультразвуковым эхосигналам методом максимальной энтропии // Дефектоскопия. 2013. № 1. С. 33–60. DOI: 10.1134/S1061830913010038
21. Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи в акустике // М: Издательство МГУ, 1989. 152 с.
22. Базулин Е.Г., Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле для получения изображений рассеивателей с учетом эффекта перерассеивания в одномерном случае // Акуст. журн.. 2010. № 1. С. 103–112.
23. Гончарский А.В., Романов С.Ю. О двух подходах к решению коэффициентных обратных задач для волновых уравнений // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 2012. № 2. С. 263–269.

Применение метода фронтальной проекции в спектральном пространстве для ультразвукового контроля трубопроводов

Application of the frontal projection in the spectral space method for ultrasonic inspection of pipelines

При контроле трубопроводов широко применяется схема, когда ультразвуковой преобразователь, развёрнутый на ± 90 градусов, перемещается вдоль образующей трубы. Контроль при многократном отражении ультразвукового импульса от поверхностей стенок приводит к значительному росту уровня шума и уменьшению фронтальной разрешающей способности изображения отражателей. Применение модификации метода проекции в спектральном пространстве для когерентного получения изображения отражателей позволяет повысить отношение сигнал/шум и добиться того, что фронтальное разрешение не зависит от расстояния и примерно равно размерам пьезоэлемента вдоль линии сканирования. Приведены результаты применения предложенного метода, демонстрирующие его эффективность.

When the control circuit pipes are widely used as an ultrasonic transducer skewed ± 90 degrees, moves along the forming pipe. Control, using multiple reflection of the ultrasonic pulse from the wall surface, leading to a significant increase noise level and decrease frontal resolution of image reflector. The use of modified projection method in spectral space for coherent imaging reflectors can improve the signal/noise ratio and can lead to the frontal resolution does not depend on the distance and equal about the size of the piezoelectric element along the scan line. The results of applying the proposed method to demonstrate its effectiveness.

1. Введение

Своевременное выявление дефектов, образующихся в процессе эксплуатации в основном металле и сварных соединениях труб нефте- и газопроводов, является очень актуальной задачей. Одним из наиболее эффективных методов решения этой задачи является интегральный ультразвуковой контроль (УЗК), когда вдоль образующей трубы перемещают преобразователь, ориентированный перпендикулярно линии сканирования [1, 2]. Такой подход позволяет обеспечить контроль всего металла трубы и даже продольных сварных соединений всего лишь за один или несколько проходов группы преобразователей вдоль оси трубы. Это даёт возможность существенно уменьшить время проведения контроля и упростить конструкцию системы сканирования. Однако проблема выявления опасных дефектов типа стресс-коррозионных трещин малого размера, особенно удалённых от линии сканирования остаётся. Многократные отражения ультразвуковых волн от внешней и внутренней поверхностей трубы, их расхождение, затухание и перераспределение являются основными причинами снижения чувствительности такого вида контроля. Влияние этих факторов приводит к тому, что полученные изображения отражателей

имеют низкое фронтальное разрешение, а отношение сигнал/шум в этих изображениях может оказаться недостаточным для выявления дефектов на требуемом уровне чувствительности.

Для повышения разрешающей способности можно применять когерентную обработку измеренных эхосигналов. В 80-х годах прошлого века появились системы УЗК [3, 4, 5] формирующие изображения отражателей по эхосигналам, измеренным одноэлементным преобразователем, работающим в совмещённом режиме и сканирующим вдоль прямой линии (вдоль оси x , на рис. 1 слева). В них для получения изображения дефектов используются алгоритмы, основанные на решении обратной скалярной задачи рассеивания в Борновском приближении [6, 7]. К алгоритмам такого класса относится метод **проекции в спектральном пространстве** (ПСП), который в зарубежной литературе называется **Fourier Transformation Synthetic Aperture Focusing Technique (FT-SAFT)** [8, 9, 10]. Особенность изображения отражателей восстановленных этим методом состоит в том, что в силу большой пространственной апертуры, на которой регистрируются эхосигналы, фронтальное разрешение в плоскости xz примерно равно размеру мнимого излучателя и приёмника и пра-

ктически не зависит от глубины z . Реализовав подобный подход для получения изображений в системах с интегральным УЗК металла труб можно ожидать существенного улучшения качества изображений — повышения фронтальной разрешающей способности в плоскости xu и уменьшения уровня шумов. Отметим, что режим сбора данных в таких системах УЗК подобен режиму работы радиолокационной станции бокового обзора [11, 12]. Когерентную обработку эхосигналов измеренных преобразователем, развёрнутым на девяносто градусов, будем называть методом фронтальной ПСП (Ф-ПСП).

2. Метод фронтальной проекции в спектральном пространстве

Обратная задача рассеивания [7] заключается в том, чтобы по известным источникам поля $q(r_p, f)$ в области S_p , измеряя принятое поле $p(r_p, f)$ в области S_r , найти функцию $\varepsilon(r)$, описывающую отражающие свойства неоднородности в области S . В практике ультразвукового контроля обычно используется Борновское приближение, когда амплитуда рассеянного поля полагается много меньше амплитуды падающего поля $p_i(r, f)$, то есть $p(r, f) \ll p_i(r, f)$. При регистрации эхосигналов в совмещённом режиме функция Грина $G(r_r, f)$, измеренное поле $p(r_p, f)$ и искомая функция $\varepsilon(r)$ при работе на частоте f связаны формулой свёртки:

$$p(r_p, f) = \int_S G(r-r_p, f) \varepsilon(r) p_i(r-r_p, f) dr = \int_S G(r-r_p, f)^2 \varepsilon(r) dr.$$

Искомую функцию $\varepsilon(r)$ называют рассеивающим потенциалом. Решение этого уравнения для работы в совмещённом режиме основано на обобщенной теореме о проекциях [13] и рассмотрено в статье [14] для случая двумерного и трёхмерного варианта. На рис. 1 слева показана схема регистрации эхосигналов в обычном режиме, когда для восстановления изображения отражателей в плоскости $x_r z_r$ преобразователь, поле которого схематически изображено на рисунке, перемещается вдоль оси x_r . Направление движения преобразователя указано стрелкой красного цвета. Область восстановления изображения (ОВИ) отмечена прямоугольником красного цвета. На рис. 1 справа показано размещение преобразователя и направления его движение для обработки эхосигналов методом фронтальной ПСП. Преобразователь в этом случае перемещается вдоль оси y_r , по отношению к которой он развёрнут на 90 градусов. Легко заметить, что переход в систему координат $y_r^{90} z_r^{90}$, определяемую центральным углом ввода преобразователя, приводит задачу к обычному двумерному варианту метода ПСП при контроле

как будто бы прямым преобразователем. Поэтому для восстановления изображения отражателей $\varepsilon(r, f)$ можно воспользоваться формулами метода 2D-ПСП приведёнными в статье [14], но с учётом того, что в системе координат $y_r^{90} z_r^{90}$ используется «прямой» преобразователь с координатами центра пьезоэлемента $(0, p_w)$, где p_w — расстояние пробега центрального луча в призме реального преобразователя.

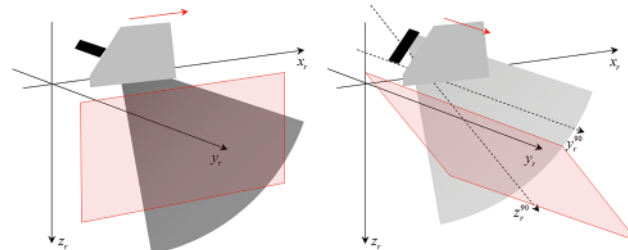


Рис. 1 Регистрация эхосигналов для обработки методом 2D-ПСП и методом фронтальной ПСП. Направление движения преобразователя указано стрелкой красного цвета. Область восстановления изображения (ОВИ) отмечена прямоугольником красного цвета

Для получения изображения отражателей с высоким продольным разрешением обычно используется многочастотный режим, когда суммируются изображения, восстановленные на N_t частотах в некотором диапазоне частот $\Delta f = (f_{\min}, f_{\max})$

$$\varepsilon(r, \Delta f) = \sum_{n=1}^{N_t} \varepsilon(r, f_n).$$

Как правило, анализируется модуль комплексной функции $\varepsilon(r, \Delta f)$, который в дальнейшем и будет называться изображением отражателей $I(r) = |\varepsilon(r, \Delta f)|$.

Восстанавливая изображения дефектов по эхосигналам, измеренным реальным контактным преобразователем, нужно обязательно учесть то обстоятельство, что звук распространяется в призме, на которую наклеен пьезоэлемент, координата которого относительно переднего ребра призмы равна $(0, p_w)$. В статье [14] показано, как с помощью метода угловых спектров можно пересчитать спектр поля с глубины p_w на поверхность объекта контроля.

Для эффективного применения метода Ф-ПСП рекомендуется использовать пьезоэлементы размерами 4 на 12мм, которые на частоте 2,5 МГц имеют ширину диаграммы направленности около 30 градусов. Ориентация пьезоэлемента на призме должна быть такой, как это показано на рис. 1 справа.

3. Настройка чувствительности

Применение Ф-ПСП для проведения автоматизированного ультразвукового контроля потребо-

вало решения задачи настройки чувствительности при изменении расстояния до несплошности. Эта процедура должна проводиться на СОП по эталонному отражателю, размеры которого соответствуют максимально допустимому дефекту в объекте контроля. Для автоматизированного ультразвукового контроля газопроводов был взят отражатель в виде паза малой ширины, имеющий глубину 10% от номинальной толщины стенки трубы и длину 25 мм. Ширина паза должна быть много меньше длины излучаемой волны. Предложенный способ настройки чувствительности включает с себя следующие шаги:

- настройка ВРЧ для регистрируемых эхосигналов выполняется путем установки таких ее значений, при которых амплитуда, зарегистрированных отраженных от отражателя в СОП эхосигналов, достигает одного и того же значения при различных расстояниях между излучающим преобразователем и отражателем;
- определяются амплитуды изображений отражателей, расположенных на различном расстоянии от излучающего преобразователя и по ним строится корректирующая зависимость, выравнивающая чувствительность по расстоянию до дефекта;
- браковочный уровень чувствительности соответствует получившейся амплитуде изображения.

4. Опыт практического контроля

В «Научно-производственном центре «ЭХО+» для проведения контроля с восстановлением изображения отражателей методом Ф-ПСП по измеренным эхосигналам была разработана специальная модификация системы автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) АВГУР-Т. В её состав входило сканирующее устройство, обеспечившее перемещение наклонного ПЭП с эффективной частотой 2,5 МГц по оси у с шагом 0,3 мм.

4.1 Контроль основного металла образца трубопровода ДУ1200

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма был проведен контроль основного металла образца трубопровода Ду1200, эскиз которого представлен на рис. 2. В образце выполнены несколько одиночных пропилов (А, Б, Д, Ж) и несколько групп пропилов, имитирующих стресс-коррозию (В, Г, Е).

На рис. 3 представлены изображения, полученные с помощью обычной визуализации (внизу) и метода Ф-ПСП (вверху). При проведении контроля ПЭП с углом ввода поперечной волны равным

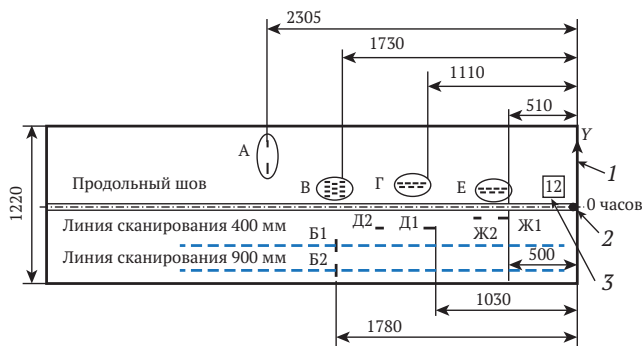


Рис. 2. Эскиз образца изготовленного из трубы Ду1200 с искусственными дефектами

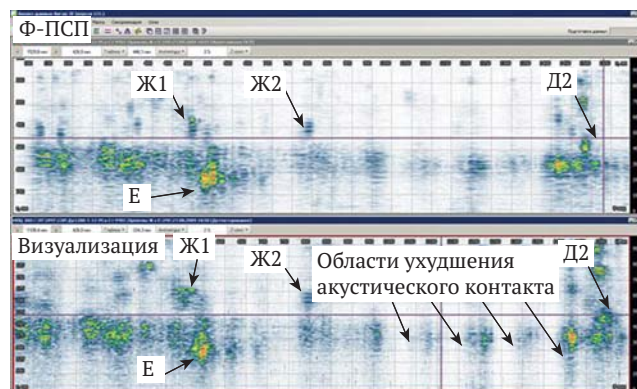


Рис. 3. Изображения одного участка трубы, полученные путём визуализации (внизу) и методом Ф-ПСП (вверху). От линии сканирования до продольного шва — 400 мм

60 градусов находился на расстоянии 400 мм от продольного шва (см. рис. 2). Изображения, полученные разными методами, не сильно различаются из-за небольшого расстояния от ПЭП до несплошностей (порядка 400 мм). Тем не менее, после обработки уровень фонового шума уменьшился примерно на 3дБ, а фронтальная разрешающая способность увеличилась не меньше чем в три раза.

На рис. 4 представлены изображения отражателей, восстановленные с помощью обычной визуализации (внизу) и метода Ф-ПСП (вверху). При проведении контроля ПЭП находился на расстоянии 900 мм от продольного шва (см. рис. 2). Разница между изображениями более существенная, чем между изображениями, представленными на рис. 3. Это объясняется тем, что расстояние от ПЭП до продольного сварного соединения было увеличено с 400 до 900 мм. Естественно, что из-за расхождения ультразвукового пучка фронтальная разрешающая способность простой визуализации ухудшилась, а фронтальная разрешающая способность изображения, полученное методом Ф-ПСП, не изменилась. На изображении, полученном методом Ф-ПСП, блики отражателей Ж2, Д2, Е и Г по-прежнему отчётливо видны. Отметим важное обстоятельство, что после применения метода Ф-ПСП, из-за увеличившейся пространственной

пертуры регистрации эхосигналов, стала практически не заметна область ухудшения акустического контакта, которая отчётливо видна при обычной визуализации.

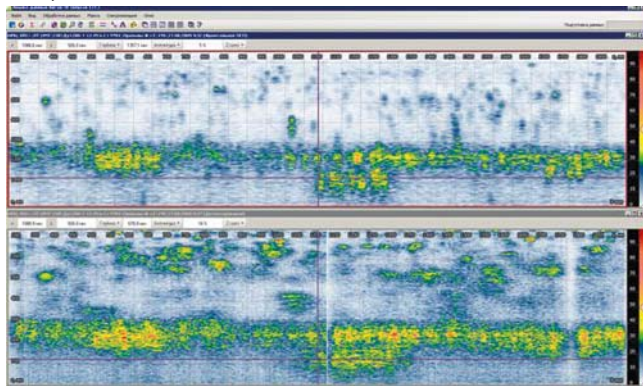


Рис. 4. Изображения одного участка трубы, полученные путём визуализации (внизу) и методом Ф-ПСП (вверху). От линии сканирования до продольного шва — 900 мм

На рис. 5 представлены увеличенные изображения несплошности Д1, полученные с помощью визуализации (внизу) и методом Ф-ПСП (вверху). По изображениям видно, что фронтальная разрешающая способность возросла в пять раз (с 80 до 15 мм).

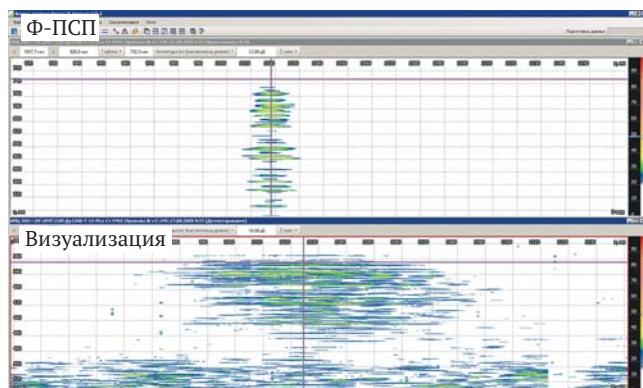


Рис. 5. Изображения дефекта Д1, полученные обычной визуализацией и методом фронтальной ПСП. Введена отсечка на уровне минус 6дБ от локального максимума

Таким образом, в сравнении с обычной визуализацией обработка эхосигналов методом Ф-ПСП позволяет:

- уменьшить фронтальное разрешение изображения более чем в пять раз, то есть с 80 мм до 15 мм при сканировании ПЭП на расстоянии порядка 900 мм от продольного сварного соединения, что позволяет достоверно проводить классификацию выявленных несплошностей по протяженности;
- повысить отношение сигнал/шум изображения более чем на 12дБ, то есть увеличить чувствительность контроля не меньше, чем в четыре раза.

Последнее обстоятельство позволяет при использовании бесконтактного возбуждения ультразвука с применением электромагнитоакустических преобразователей (ЭМА) совмещая преи-

мущество бесконтактного метода ЭМА с высокой чувствительностью УЗК.

Технология УЗК с применением Ф-ПСП применялась в 2010 года при проведении интегральной диагностики основного металла и продольных сварных соединений магистральных газопроводов ОАО «Газпром». При проведении контроля системами АВГУР-Т был выявлен ряд дефектов в основном металле трубопроводов и сварных соединениях, подтвержденных ручным УЗК (см. рис. 6).



Рис. 6. Система АВГУР-Т внутри трубопровода (слева) и изображение недопустимого дефекта, протяженностью 150 мм, полученное методом Ф-ПСП (справа)

4.2 Контроль шва сварки патрубка в обечайку тройника 1020x1420 мм

Использование алгоритма 3D-ПСП [14] в системе АВГУР-Т позволило решить задачу контроля внутреннего сварного соединения (СС) патрубков-обечайка тройников сварных с усиливающими накладками (ТСН). Характерный вид тройника представлен на рис. 7. Эффективный контроль внутреннего сварного соединения «патрубок-обечайка» тройника, установленного в газопровод из-за наличия усиливающей накладки на патрубке и воротника на обечайке тройника традиционными методами невозможен. Накладки не позволяют обеспечить непосредственный доступ к этому сварному соединению.

Изображение, полученное методом Ф-ПСП, не дает информацию о высоте дефекта, в отличие

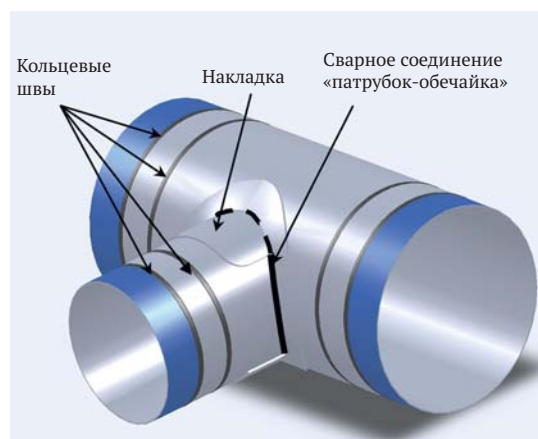


Рис. 7. Эскиз типового сварного тройника с усиливающей накладкой

от изображения, восстановленного методом 3D-ПСП. Однако, по существующей методике контроля требуется определять положение несплошности только вдоль сварного соединения. На рис. 8 представлены изображения участка сварного шва варки патрубка в обечайку, полученные методом Ф-ПСП (слева) и 3D-ПСП (справа). В рамках данной методики оба метода получения изображения дают похожий результат. Существенных отличий между изображениями, полученными на других подобных объектах, также зафиксировано не было.

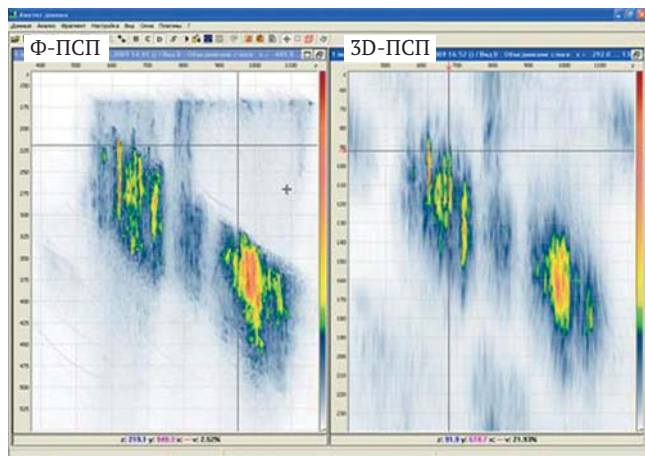


Рис. 8. Изображения участка сварного шва варки патрубка в обечайку, полученные методом фронтального и 3ДПСП

5. Выводы

Таким образом, по результатам представленных результатов исследований можно сделать следующие выводы:

- применение метода Ф-ПСП вместо простой визуализации позволяет существенно повысить фронтальную разрешающую способность изображения несплошностей, уменьшить уровень шума и повысить чувствительность контроля при расстоянии до зоны контроля порядка 1000 мм.
- в результате высокая разрешающая способность позволяет проводить классификацию несплошностей по протяженности вне зависимости от расстояния до несплошности;
- при проведении контроля по методикам, не требующим определения глубины залегания отражателя и его высоты, применение метода Ф-ПСП вместо 3D-ПСП позволяет существенно ускорить процесс контроля.

Статья опубликована в журнале «Сварка и Диагностика» в 2015, № 1

6. Список литературы

1. Hoppenbrouwers, M. B., de Raad, J.A. Long Range Ultrasonics for corrosion detection on hard-to-

access locations, 7th European Conference on Non Destructive Testing, 1998.

2. Дефектоскопы-сканеры ультразвуковые АВТОКОН-МГТУ. Описание типа средств измерений. Регистрационный номер 33918-07.
3. Официальный сайт фирмы Tecnatom — <http://www.tecnatom.es/en/home/activity-areas/diversification/software-engineering/design-and-development-of-computer-applications-cas>
4. Официальный сайт фирмы Sonomatic <http://www.vsonomatic.com>
5. Базулин А. Е., Гордеев Ю. Л., Костылов А. Г., Тихонов Д. С., Штерн А. М., Мобильные измерительные системы автоматизированного ультразвукового контроля серии АВГУР. — В мире неразрушающего контроля, 2010, № 1 (47), с. 16–23.
6. Буров В. А., Горюнов А. А., Сасковец А. В., Тихонова Т. А. Обратные задачи рассеяния в акустике (обзор). — Акуст. журн., 1986, т. XXXII, № 4, с. 33–449.
7. Горюнов А. А., Сасковец А. В. Обратные задачи рассеяния в акустике. — М.: Издательство МГУ, 1989. 152 с.
8. Mayer K., Markelein R., Langenberg K.J., Kreutter T. Three-dimensional imaging system based on Fourier transformation synthetic aperture focusing technique. — Ultrasonics, 1990, № 28, p. 241–255.
9. Takahashi F., Nagashima Y., Tanaka I., Igeta M., Nakada S. Ultrasonic Sizing and Recognition of Cracks and Porosities in Weld Metals Using Acoustical Holographic Inspections. — First International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 20–22 October 1998, Amsterdam, Netherlands.
10. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. — Акуст. журн., 1988, XXXIV, № 2, с. 222–231.
11. Радиолокационные станции бокового обзора./ Под ред. Реутова А. П.. М.: Сов. радио, 1970, 360 с.
12. Дудник П. И., Ильчук А. Р., Татарский Б. Г. Многофункциональные радиолокационные системы. Уч. пособие для вузов./ Под ред. Татарского Б. Г., М.: Дрофа, 2007, 283 с.
13. Devaney A.J. Fundamental limitation inverse source and scattering problem in NDT. — Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, 1986, vol. 5A, p. 303–317.
14. 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).

**А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, Ю.Л. Гордеев, В.Л. Козлов, С.А. Коколев,
К.А. Кузнецов, С.В. Ромашкин, Д.С. Тихонов, А.М. Штерн**

A.E. Bazulin, E.G. Bazulin, U.L. Gordeev, V.L. Kozlov, S.A. Kokolev, K.A. Kuznetsov,
S.V. Romashkin, D.S. Tikhonov, A.M. Stern

Система автоматизированного контроля АВГУР-АРТ – от искусства применения новых возможностей к практической диагностике

AUGUR-ART AUT System - from new technologies implementation to practical diagnostics

В статье подробно описывается новая разработка ведущих специалистов ООО НПЦ «ЭХО+» – система автоматизированного ультразвукового контроля АВГУР-АРТ. Система обладает всеми возможностями современных технологий применения фазированных антенных решёток (ФАР), в том числе технологии цифровой фокусировки антенны (ЦФА), уникальной по своим возможностям. Наиболее сильно метод цифровой фокусировки проявляется при использовании точного механического сканирования антенными решётками, что хорошо сочетается с принципом автоматической регистрации данных контроля. Применение методов ЦФА-Х, ЦФА-У, ЦФА-ХУ, Multi-ЦФА даёт значительное преимущество по сравнению с режимом аппаратной фокусировки в режиме обычного ФАР-дефектоскопа так как с их помощью восстанавливаются изображения без характерных искажений ФАР-режима с равномерной и предельной фокусировкой.

В данной статье дано наглядное описание самой системы АВГУР-АРТ и её функций, продемонстрированы их реализации на практике и сделана попытка заглянуть в будущее систем ультразвукового контроля, которое уже проступает под прессом созданных новых возможностей.

The article describes in detail the new development of leading specialists Ltd. SPC "ECHO+" system of automated ultrasonic testing AUGUR-ART. The system has all the capabilities of modern technology application of phased antenna arrays (PA), including digital technology focus antenna (DFA), unique in its capabilities. The most powerful method of digital focus appears when using the precise mechanical scanning antenna array that fits well with the principle of automatic data logging control. Application of methods of the DFA-X, the DFA-Y, the DFA-XY, Multi-DFA provides a significant advantage over hardware mode to focus using conventional phased array flaw detector as work to restore the image without distortion characteristic of PA-mode with a uniform and maximum focus.

In this paper we give a visual description of the system AUGUR-ART and its functions, demonstrated their implementation in practice and attempt to look into the future of ultrasonic testing systems, which are already under pressure emerges created new opportunities.

Введение

Технологии антенных решёток в ультразвуковом контроле открывают для диагностики возможности, которые столь разнообразны и необычны, что их практические приложения вызывают подчас проблему выбора наиболее эффективного решения. Ведь до сих пор эти возможности в разной степени представлены в различных приборах, до сих пор многие приборы реализуют только их часть. Какое сочетание функций прибора окажется достаточным для данного набора задач, нужна ли такая и этакая функция – не только проблема выбора растерянного потребителя, но и насущный вопрос получения адекватных результатов контроля.

Изначально понимая мощный информационный потенциал, заложенный в технологиях антенных решёток, и сожалея о тех потерях, на которые сознательно идут разработчики ради повышения

производительности и компактности приборов, мы поставили перед собой сверхзадачу создания прибора, реализующего все возможности метода, и при этом ни в чём не уступающего самым современным приборам.

В результате была создана система автоматизированного ультразвукового контроля АВГУР-АРТ, обладающая кроме полного традиционного набора функций применения антенных решёток, также и многообразными алгоритмами обработки данных на базе технологии цифровой фокусировки антенны. Применяя эту технологию с возможностями точного механического сканирования удаётся преодолеть пространственные ограничения применения антенных решёток и добиться существенного повышения качества изображений.

В данной статье дано наглядное описание самой системы и её функций, продемонстрированы

их реализации на практике и сделана попытка заглянуть в будущее систем ультразвукового контроля, которое уже проступает под прессом созданных новых возможностей.

Идеология

Метод цифровой фокусировки антенны – двойное (тройное, ...) сканирование + C-SAFT

В отличие от традиционных систем с фазированными антенными решётками (ФАР) в системе АВГУР-АРТ в качестве основного заложен особый принцип записи данных. Его суть заключается в регистрации всех эхо-сигналов при любом сочетании элементов антенной решётки в качестве излучателей и приёмников. Этот подход применяется как для одной работающей антенной решётки, так и для нескольких антенных решёток, когда излучателями поочередно служат элементы одной решётки, а принимают сигналы одновременно элементы других решёток. На рис. 1 проиллюстрирован этот метод записи данных, для которого в западной литературе используются термины full matrix capture (FMC) – полный захват матрицы данных [1] или sampling phased array – выборки с антенной решётки [2] и пр. Некоторые из авторов настоящей статьи считают уместным также и термин **двойное сканирование**, подразумевая, что при записи выполняется раздельное электронное сканирование излучателей и приёмников [3].

Н сторона

Р сторона

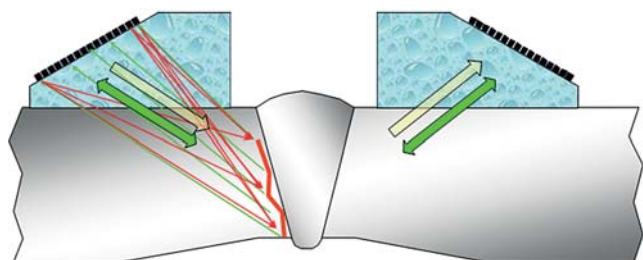


Рис. 1 – Метод двойного сканирования: один элемент – излучатель, все остальные – приёмники, затем поочередно все элементы выступают в качестве передатчиков, а приёмники, по-прежнему, – все

Полученный массив эхо-сигналов, представляющий собой всевозможные пространственные комбинации излучателей и приёмников, является богатейшим источником информации для получения изображений отражателей, так как представляет обзор под максимальным количеством ракурсов прозвучивания. Этот массив ещё более расширяется при пространственном сканировании антенными решётками, дополняя информацию новыми конфигурациями излучения и приёма. Совмещение механического и электронного сканирования

одним автором этой статьи предложено называть термином — **тройное сканирование** [5], который наводит на мысль о возможном появлении в будущем четверного, и даже..., но сейчас речь не об этом.

Для обработки этого огромного массива данных используется алгоритм комбинированного SAFT (C-SAFT) [4]. Этот алгоритм позволяет проводить совместную обработку потока эхо-сигналов как при одном пространственном положении антенной решётки, так и при их механическом сканировании. Он легко модифицируется для учёта многолучевого распространения ультразвука, различных типов волн, влияния не плоскопараллельных границ объекта контроля, и применим как для антенных решёток, так и для антенных матриц [5].

Авторы статьи [6] регистрацию эхосигналов в режиме двойного сканирования и получение изображения методом C-SAFT предлагают называть цифровой фокусировкой антенной решётки (ЦФА), что представляет собой весьма точный термин, поэтому этот основной режим системы АВГУР-АРТ мы будем называть режимом ЦФА.

Расширение метода ЦФА – учёт сканирования, преобразования типов волн и геометрии объекта контроля

Дополнительный учёт координат механического сканирования антенной решётки позволяет расширить пространственную апертуру регистрируемого поля, тем самым расширяя область действия антенной решётки. За счёт синтеза расширенной апертуры сканирования можно увеличить диапазон глубин эффективной фокусировки, улучшить разрешающую способность, а также обеспечить дополнительно снижение отношения сигнал/шум. В зависимости от того какая координата сканирования используется для расширения апертуры решётки метод ЦФА делится на:

- ЦФА-Х, когда решётка расширяется вдоль своей основной оси, обычно поперёк оси контролируемого шва,
- ЦФА-У, когда решётка расширяется вдоль своей дополнительной оси, обычно вдоль оси контролируемого шва,
- ЦФА-ХУ, когда решётка расширяется в обоих направлениях сканирования.

Режим, объединяющий в себе учёт геометрии объекта контроля при многократном переотражении от его границ УЗ волн и учёт преобразования типов волн при отражениях и переотражениях УЗ волн, называется режимом Multi-ЦФА [7]. Этот режим позволяет существенно уточнить форму и тип дефекта. Пример применения этого режима при-

ведён на рис. 9. Основная идея состоит в том, что из исходного набора А-сканов, записанного в режиме двойного сканирования, можно восстановить несколько изображений одной области контроля, сформированных различными типами волн при различных направлениях отражений и преломлений УЗ волн. Это позволяет восстановить изображение дефектов с пространственным спектром, который при контроле с одной поверхности был ранее просто невозможен, т.е. увидеть дефект детально и практически со всех сторон даже при одностороннем контроле.

При этом в системе АВГУР-АРТ сохранён режим записи данных и формирования изображений являющийся основным для подавляющего большинства современных систем, основанных на формировании полей излучения и приёма за счёт применения предварительного рассчитанного массива временных задержек. Этот режим аппаратной фокусировки будем называть режимом ФАР-дефектоскопа [8].

Режим ЦФА и, особенно, его усиленные модификации ЦФА-Х, ЦФА-У, ЦФА-ХУ, Multi-ЦФА обладают значительными преимуществами по сравнению с режимом ФАР-дефектоскопа так как с их помощью восстанавливаются изображения без характерных искажений ФАР-режима с равномерной и предельной фокусировкой. Детальное сравнение двух методов получения изображений: ФАР и ЦФА сделано в статье [9].

Одной из главных задач, которая была решена при создании системы АВГУР-АРТ, стала задача повышения скорости вычислений ЦФА-изображения. Огромный массив данных, который возникает при записи в режиме двойного и, тем более, тройного сканирования может быть обработан за приемлемое время только с использованием метода распараллеливания вычислений. Для этого применяется широко распространённая и активно применяемая в современных компьютерах технология компании NVIDIA — CUDA™ (Compute Unified Device Architecture) [10], применение которой обеспечило отображение на экране ЦФА-изображения размерностью 256×256 для 32-элементной антенной решётки со скоростью 20 кадров в сек., т.е. практически в реальном времени.

Отображение ЦФА-изображения on-line используется только для одной из схем прозвучивания, возможной для выбранного сочетания антенных решёток. Получение изображений по другим схемам прозвучивания или с учётом сканирования антенных решёток возможно в режиме постобработки записанного массива исходных данных, когда с данными можно делать уже «что угодно». В этом случае время ЦФА-обработки, в зависимо-

сти от выбранного алгоритма расчёта, может занимать от нескольких секунд до нескольких часов.

Идеология определяет программно-аппаратную архитектуру системы АВГУР-АРТ, в основе которой — 1) многоканальный дефектоскоп с антенными решётками для регистрации эхо-сигналов, 2) сканер для перемещения антенных решёток и расширения их пространственной апертуры, 3) компьютер, связанный через стандартный интерфейс с дефектоскопом, оснащённый видеоплатой-ускорителем CUDA и 4) **программное обеспечение**, которое реализует весь функционал системы.

Аппаратное воплощение

Система АВГУР-АРТ может быть представлена в виде схемы на рис. 2. Представленная на этом рис. комплектация предназначена для проведения автоматизированного УЗК толстостенных кольцевых сварных соединений. В её состав входят управляющий компьютер — notebook (NB, A2), который питается от встроенных аккумуляторов или внешнего блока питания (БП, A1). Через патчкорд (A3) NB подключается напрямую или через удлинитель Ethernet на кабельной катушке (ККЕ, A4) к дефектоскопу ультразвуковому многоканальному (ДУМ, A7). Дефектоскоп соединяется со сканером кабелем КСК-AUTO (A9), а питается от блока аккумуляторов (БА, A8) или от сети 220 В через блок питания. Блок аккумуляторов в процессе работы и отдельно может заряжаться от зарядного устройства (ЗУ, A6).

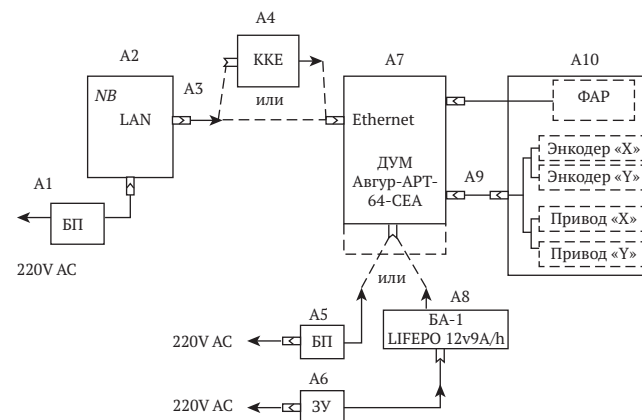


Рис. 2. Наиболее типичный вариант функциональной схемы системы АВГУР-АРТ

На двухкоординатном сканере (A10) — два энкодера и два привода для сканирования по осям x и y, поперёк и вдоль сварного соединения.

Антенная решётка (ФАР) устанавливается на сканер и по высокочастотному кабелю подсоединяется к дефектоскопу.

Это наиболее лаконичная и функциональная комплектация для проведения дистанционного автоматизированного УЗК. Для различных целей

система может доукомплектовываться видеокамерой наблюдения за сканированием, переговорным устройством, соединением через интерфейс USB, дополнительными аккумуляторами, сканирующими устройствами, преобразователями ФАР и разветвителями для подключения нескольких антенных решёток, оборудованием для хранения.

I. Дефектоскоп ультразвуковой многоканальный (ДУМ) с цифровой фокусировкой и автоматизированным сканированием антенными решётками

ДУМ является 64-канальным дефектоскопом с возможностью одновременного подключения от одной до четырёх антенных решёток.

Дефектоскоп представляет собой небольшой моноблок (рис. 3) с разъёмами для подключения антенных решёток, сканера, управляющего компьютера, внешнего питания от сети 220 В или блока аккумуляторных батарей. Дефектоскоп изготавливается в климатическом исполнении УХЛ категории 1.1 по ГОСТ 15150-69 и предназначен для эксплуатации при значениях рабочих температур от +1 °С до +40 °С.



Рис. 3. 64-канальный дефектоскоп АВГУР-АРТ

Дефектоскоп обеспечивает проведение высокопроизводительного автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений и основного материала оборудования, деталей, трубопроводов и прочих изделий из металлов, их сплавов и других материалов для выявления несплошностей, их визуализации, определения их эквивалентной отражающей способности, размеров (условных или реальных), а также координат месторасположения в трёхмерной системе координат объекта контроля.

Для управления дефектоскопом используется управляющий компьютер, выполняемый на базе персонального или промышленного, переносного или стационарного компьютера с предустановленным программным обеспечением АВГУР. Конструктивное и климатическое исполнение управляющего компьютера соответствует условиям эксплуатации.

Для выполнения обработки C-SAFT управляющий компьютер должен содержать в своем составе

специализированные вычислительные средства (например, видеоплату с поддержкой технологии NVIDIA CUDA версии 2.1 и более).

Управляющий компьютер связывается с дефектоскопом интерфейсы USB 2.0, Ethernet или USB 3.0 (различные модификации системы).

Удаление оператора при дистанционном управлении дефектоскопом определяется длиной соединительных кабелей между дефектоскопом и управляющим компьютером, которая может составлять от 0,5 м до 100 м.

Дефектоскоп обеспечивает работу в режимах ФАР, ЦФА, ЦФА-Х, ЦФА-У, ЦФА-ХУ, МультиЦФА для сбора и обработки данных с целью трёхмерной визуализации результатов контроля.

В режиме ФАР перед проведением контроля выполняется расчет временных задержек излучения и приема импульсов для обеспечения требуемых параметров контроля (диапазон углов ввода, глубин фокусировки луча). Визуализация несплошностей выполняется при представлении данных контроля в виде растровой картины распределения амплитуд в выбранной цветовой палитре.

Дефектоскоп обеспечивает поиск несплошностей с пороговыми уровнями чувствительности, установленными по уровням эхосигналов от эталонных отражателей, в соответствии с действующими нормативными документами.

Дефектоскоп обеспечивает управление сканирующими устройствами для перемещения антенных решёток, включающими в свой состав один или два датчика положения и один или два электродвигателя (сервомотора). Диапазон измерения пройденного расстояния датчиком положения, не менее чем от 1 до 20000 мм.

В состав ДУМ входят блок питания от сети 220 В, блок аккумуляторов и зарядное устройство.

II. Антенные решётки, антенные матрицы, призмы

Дефектоскоп может работать с линейными решетками и матрицами производства компаний Imasonic, Olympus, ООО «НПП «ЭХО+» и другими с эффективными частотами от 1,2 до 10 МГц с количеством элементов от 1 до 64.

Т.к. система АВГУР-АРТ поддерживает режимы обработки ЦФА с перемещением антенных решёток (режимы ЦФА-Х, У, ХУ) с помощью сканера, становится возможным использование прореженных антенных решёток, которые с меньшим количеством элементов, обеспечивают существенно большую пространственную апертуру, тем самым расширяя область эффективной работы

антенной решётки. Система АВГУР-АРТ обеспечивает работу с антенными решётками имеющими расстояние между элементами до 5 мм.

На рис. 4 приведены антенные решётки на призмах, вставленных в прижимы, которые фиксируются на сканере.

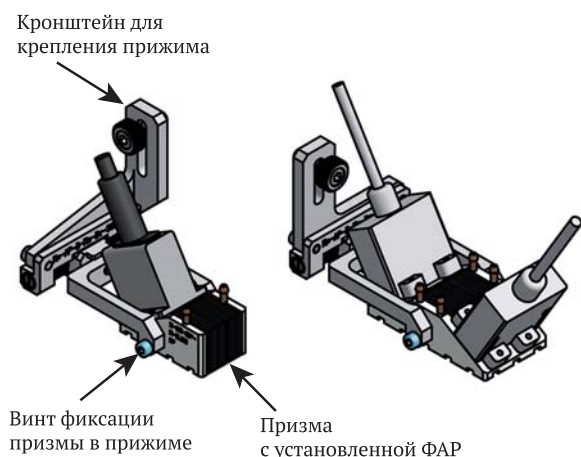


Рис. 4. Антенные решётки, установленные на призмах в прижимы сканера

Антенные решётки и матрицы подключаются к ДУМ через разъём Hypertronix. Для подсоединения нескольких АР к одному разъёму Hypertronix требуется разветвитель, который устанавливается либо на сканер, либо располагается отдельным блоком рядом с дефектоскопом.

III. Управляющий внешний компьютер

Как уже говорилось, основной особенностью управляющего компьютера является наличие в нём графического процессора CUDA, превращающего его в маленький суперкомпьютер. Основные характеристики CUDA, определившие выбор этого ускорителя как базового в системе АВГУР-АРТ:

- унифицированное программно-аппаратное решение для параллельных вычислений на видеочипах NVIDIA;
- стандартный язык программирования Си;
- стандартные библиотеки математического анализа — быстрое преобразование Фурье и линейная алгебра;
- оптимизированный обмен данными между центральным и графическим процессорами;
- взаимодействие со стандартными графическими интерфейсами (OpenGL и DirectX);
- поддержка 32- и 64-битной операционной системы Windows XP (и др.);
- возможность разработки на низком уровне.

Для постобработки удобно использовать стационарный компьютер, который, кроме обработки и анализа данных, будет также обеспечивать хранение результатов контроля за

большой период времени в базе данных системы АВГУР-АРТ.

IV. Сканирующие устройства

В состав системы АВГУР-АРТ включается, по крайней мере, один сканер, по крайней мере, с одним датчиком положения.

При этом для большого количества объектов контроля НПЦ «ЭХО+» разработал и предлагает своим заказчикам более двадцати различных типов сканирующих устройств — от ручных манипуляторов до двухкоординатных и двухмоторных механизмов. Каждый из этих сканеров оснащается адаптерами-прижимами для большого разнообразия типов антенных решёток и призм, а также схем их размещения на объекте контроля для различных методик.

На рис. 5 и 6 приведены примеры сканирующих устройств системы АВГУР-АРТ — ручные манипуляторы с одним датчиком положения (рис. 5) и сканеры с электроприводами — однокоординатный для трубопроводов Ду300 и двухкоординатный для цилиндрических объектов большого диаметра (рис. 6). Сканерам серии АВГУР посвящена одна из статей настоящего сборника (см. стр. 118).

Любое сканирующее устройство, входящее в состав системы АВГУР-АРТ имеет сертификат калибровки, выполненной по методике утвержденной государственным центром испытаний средств измерений Росстандарта.

Программное обеспечение системы АВГУР-АРТ

Программное обеспечение (ПО) АВГУР-АРТ работает с операционной системой Windows XP SP3 и выше, устанавливается на управляющий компьютер и включает в себя следующие программы:

- Регистрация данных АВГУР-АРТ.
- Поверка АВГУР-АРТ.
- Анализ данных.
- Редактор типов преобразователей, антенных решёток, матриц и призм.
- Формирование методических параметров.
- Копирование базы данных.
- Редактор параметров сканирующего устройства.
- Редактор эскизов объектов.

Программное обеспечение для внешнего стационарного компьютера рекомендуется устанавливать в том же объёме при условии, если планируется подключать к нему дефектоскоп, в другом случае, программы взаимодействия с аппаратной частью (регистрация и поверка) можно не устанавливать.

Работа с программным обеспечением системы начинается с регистрации в ней пользователя.

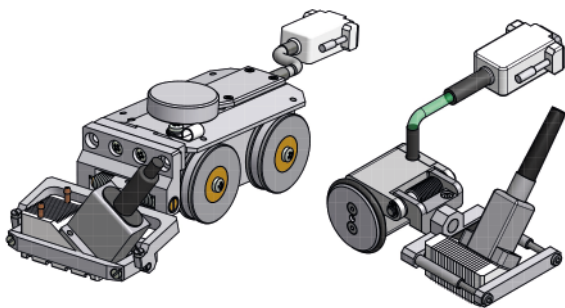


Рис. 5. Ручные манипуляторы для системы АВГУР-АРТ



Рис. 6. Одно- и двухкоординатный сканеры для системы АВГУР-АРТ

В последующей работе это реализует авторизованный доступ к некоторым функциям ПО.

I. Регистрация данных

Перед началом сканирования и записи данных в программе вручную или из ранее записанных параметров методик задаются объект контроля, его параметры, параметры акустических каналов, начальные координаты сканера на объекте контроля, а также тип контроля — ФАР или ЦФА (вкладки *Объект* и *Настройка* на рис. 7).

В программе регистрация данных задаются все необходимые параметры объекта контроля, вплоть до записей наименования предприятия, размещения и наименования, которые определяют его место в базе данных системы. Регистрируемые данные связываются с наименованием объекта контроля. В дальнейшем данные контроля могут быть найдены в базе данных по структуре объекта контроля.

Регистрация данных запускается во вкладке *Контроль*. Начинается перемещение преобразователей. Контроль продолжается до тех пор, пока не будут просканированы заданные зоны контроля (обычно одна зона соответствующая размеру

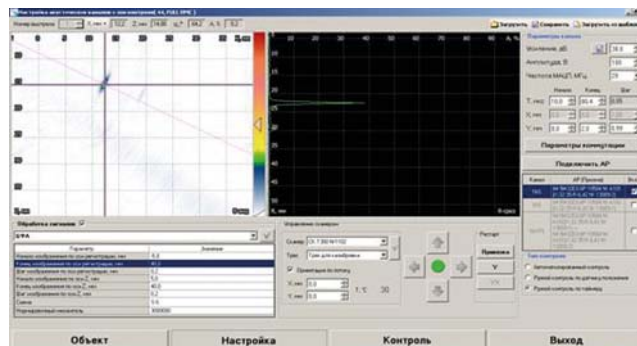


Рис. 7. Страница настройки параметров в программе регистрации АВГУР-АРТ

сварного соединения). В процессе контроля в окне каждого канала отображается соответствующий *B*- или *D*-скан и текущие координаты антенных решёток. По шумовым сигналам структуры металла или по амплитуде донного сигнала при возбуждении продольной волны оператором отслеживается наличие и стабильность акустического контакта. Полученные в результате контроля данные можно сразу же открыть в программе **Анализ данных**.

II. Анализ данных

Во время проведения контроля информация, получаемая в каждом акустическом канале, регистрируется и записывается в виде набора исходных *A*-сканов и изображений ЦФА или ФАР. Программа **Анализ данных** (рис. 8) предназначена для просмотра, обработки и анализа результатов контроля, а также формирования протоколов контроля. Основные функции доступные в этой программе:

- выбор и открытие, сохранение, удаление данных для просмотра из базы данных;
- *A*-, *B*-, *C*-, *D*-, *S*- сканы данных, послойное перелистывание;

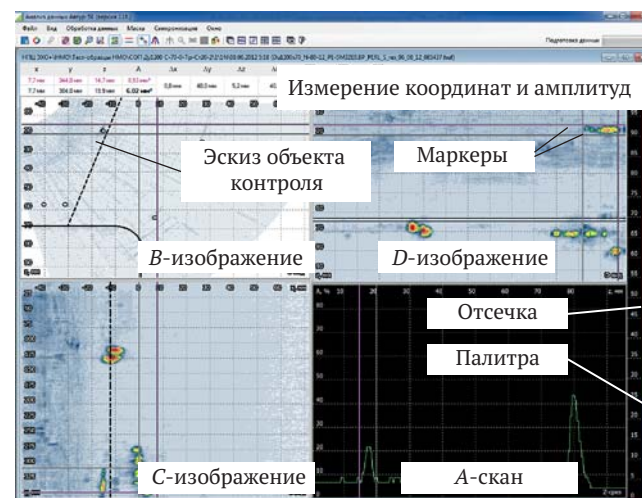


Рис. 8. Три проекции одного файла данных с линиями эскиза маски объекта контроля

- специальное представление данных толщинометрии: 3D-карта коррозии и контрастная линия границы раздела сред, формирование таблицы данных толщинометрии;
- многооконное, многофайловое одновременное отображение данных;
- отображение суммарной проекции по любой из проекций данных;
- синхронное отображение данных различных каналов и времён;
- детектирование и фильтрация исходных данных (пространственная, частотная);
- выбор цветовой палитры из библиотеки палитр;
- изменение контрастности цветовой палитры;
- измерение параметров изображения, отсечка по любому заданному уровню, измерение параметров дефектов во всех плоскостях;
- масштабирование (zoom-zoom);
- наложение трёхмерных эскизов объектов контроля (маски) на изображения, библиотека типовых эскизов, программа создания эскизов;
- изменение единиц измерения амплитуд — дБ, В, %, кв.мм;
- расчёт традиционных значений эквивалентной площади по изображениям ФАР и ЦФА;
- автоматическое определение размеров несплошностей (образмеривание);
- добавление, удаление, сохранение дефектов и их параметров в базе данных;
- формирование таблиц размеров дефектов и заключений контроля в формате файлов электронных таблиц.

В программе также реализованы следующие когерентные 2D- и 3D-обработки исходного набора А-сканов:

- ЦФА-Х, ЦФА-У (С-SAFT);
- ЦФА-ХУ (3D-C-SAFT);
- восстановление профиля внутренней поверхности объекта контроля для 3D-толщинометрии;
- Multi-ЦФА (учёт преобразования типов волн и геометрии объекта контроля);
- Объединение изображений, полученных различными методами обработки;
- Пространственная регулировка чувствительности.

На рис. 9 приведены наглядные примеры применения этих методов обработки. Эти изображения получены с помощью двух 32-ух элементных антенных решёток, с рабочей частотой 5 МГц, расположенных на внешней поверхности образцов.

Программа системы АГВР-АРТ обеспечивает совместимость форматов файлов данных с предыдущими поколениями систем серии АВГУР, а также с приборами Olympus, Narfang, Gekko. В программе Анализ данных можно воспроизводить и обраба-

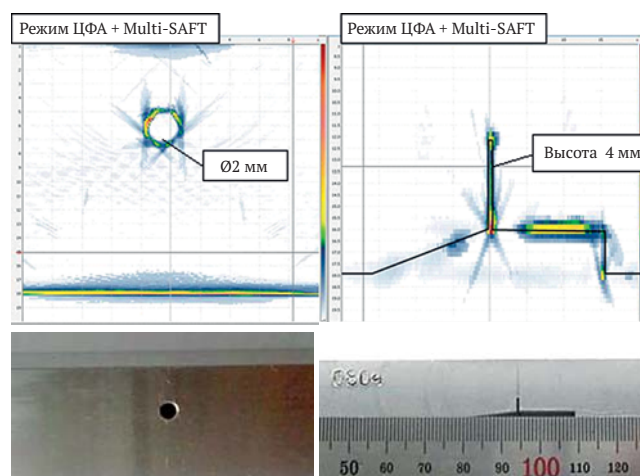


Рис. 9. Визуализация искусственных отражателей в виде бокового отверстия диаметром 2 мм и вертикальным пазом высотой 4 мм со сложным профилем дна

тывать данные, полученные при помощи математического моделирования в программе CIVА.

Аттестованные методики применения системы АВГУР-АРТ

Система АВГУР-АРТ успешно прошла испытания в концерне «Росэнергоатом» и внесена в реестр средств измерений Росстандарта. Это открыло путь для её активного применения при контроле ответственных сварных соединений на объектах использования атомной энергии. Для системы АВГУР-АРТ разработаны и аттестованы в системе РОСАТОМ несколько методик контроля таких сварных соединений. История испытаний, аттестации и применения этих методик и системы АВГУР-АРТ на АЭС России представляет собой большую последовательность интересных решений и событий, требующую отдельного изложения. В этой статье мы ограничимся лишь перечнем методик, которые прошли этот путь и теперь применяются на АЭС (в таблице 1).

Контроль системами АВГУР-АРТ выполняется в соответствии с требованиями российских и международных норм, а аппаратно-программные средства систем обеспечивают проведение контроля всеми известными методами УЗК.

Система с полным циклом автоматизации на базе системы АВГУР-АРТ

Качество и точность получаемых изображений с помощью уникальных режимов системы АВГУР-АРТ, позволили впервые точно сформулировать и поставить задачу автоматизации процесса анализа данных с формированием заключения, учитывающего все нюансы контроля — от качества акустического контакта до учёта трансформированных и многократно переотражённых УЗ волн. Так, если весь процесс УЗ контроля представить в виде трёх

Табл. 1. Методики для системы АВГУР-АРТ и других систем с ФАР

№ п.п.	Наименование методики	Год утверждения и тип реактора	Основные средства контроля
1	Методика ультразвукового контроля композитных сварных соединений приварки патрубков уравнильных трубопроводов, приварки патрубков впрыска компенсаторов давления и приварки патрубков САОЗ корпуса реактора ВВЭР-440 к переходной втулке с применением технологии фазированных решёток	2012 г. ВВЭР-440	Дефектоскопы: АВГУР-АРТ, Omniscan MX и др. Сканирующее устройство: Однокоординатный сканер АВГУР-АРТ Антенные решётки: частота 2,25 МГц, шаг 0,8–1,2 мм, число элементов 16
2	Методика автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых аустенитных сварных соединений трубопроводов впрыска и трубопроводов сброса компенсатора давления реакторов ВВЭР-1000 с применением антенных решёток	2012 г. ВВЭР-1000	Дефектоскопы: АВГУР-АРТ, Omniscan MX, Harfang X-32 и др. Сканирующее устройство: Однокоординатный сканер АВГУР-АРТ Антенные решётки: частота 5,0 МГц, шаг 0,6–1,0 мм, число элементов 32
3	Методика автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых разнородных (композитных) сварных соединений дыхательных трубопроводов 426×40 компенсатора давления реакторов ВВЭР-1000 с применением технологии фазированных решёток	2012 г. ВВЭР-1000	Дефектоскопы: Omniscan MX, Harfang X-32 и др. Сканирующее устройство: Однокоординатный сканер АВГУР-АРТ Антенные решётки: частота 5,0 МГц, pitch 0,8–1,2 мм, число элементов 32
4	Методика автоматизированного ультразвукового контроля разнородных (композитных) сварных соединений патрубков сброса пара и впрыска с патрубками компенсатора давления реакторов ВВЭР-1000 с применением антенных решёток	2012 г. ВВЭР-1000	Дефектоскопы: Omniscan MX, Harfang X-32 и др. Сканирующее устройство: Специализированный однокоординатный сканер АВГУР-АРТ Антенные решётки: частота 5,0 МГц, pitch 0,8–1,2 мм, число элементов 32 Призмы: угол ввода продольной волны в аустенитную сталь 43°–47°
5	Методика ультразвукового контроля сварных соединений трубопроводов главного циркуляционного контура энергоблоков АЭС с РУ ВВЭР-1000 с использованием технологии фазированных решеток	2012 г. ВВЭР-1000	Дефектоскопы: АВГУР-АРТ, Omniscan MX, Harfang X-32 и др. Сканирующее устройство: Специализированный однокоординатный сканер АВГУР-АРТ Антенные решётки: частота 2,25 МГц, pitch 0,6, число элементов 16 частота 5,0 МГц, pitch 0,8, число элементов 32

№ п.п.	Наименование методики	Год утверждения и тип реактора	Основные средства контроля
6	Методика ультразвукового контроля сварных соединений приварки коллекторов теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000 с использованием технологии фазированных антенных решёток	2013 г. ВВЭР-1000	Дефектоскопы: АВГУР-АРТ, Omniscan MX, Harfang X-32 и др. Сканирующее устройство: Специализированный однокоординатный сканер АВГУР-АРТ Антенные решётки: частота 5,0 МГц, pitch 0,6–0,8 мм, число элементов 32
7	Методика ультразвукового контроля сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 с применением технологии фазированных решёток	2009, 2013 г. РБМК-1000	Дефектоскопы: АВГУР-АРТ, Omniscan MX, Harfang X-32 и др. Сканирующее устройство: Специализированный однокоординатный сканер АВГУР-АРТ для труб Ду300 Антенные решётки: частота 2,25 МГц, pitch 0,8–1,2; число элементов 16 частота 5,0 МГц, pitch 0,6–1; число элементов 16
8	Методика ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений перлитных трубопроводов номинальным внешним диаметром от 219 мм до 630 мм и номинальной толщиной от 8 мм до 28 мм с применением технологии фазированных решеток	2014 г. ВВЭР-1000	Дефектоскопы: АВГУР-АРТ, Omniscan MX, Harfang X-32 (число каналов 16, число элементов 32) и др. Сканирующее устройство: Одно и двухкоординатные сканеры АВГУР-АРТ Антенные решётки: частота 4,0 МГц, pitch 0,6–1, число элементов 32 частота 5,0 МГц, pitch 0,6–1, число элементов 32
9	Методика автоматизированного ультразвукового контроля сварного соединения переходного кольца и патрубка Ду1100 парогенераторов с использованием технологии ФАР	2015 г. (план) ВВЭР-440	Дефектоскоп: АВГУР-АРТ Сканирующее устройство: Специализированный двухкоординатный сканер АВГУР-АРТ Антенные решётки: в разработке
10	Автоматизированный ультразвуковой контроль кольцевых сварных соединений обечаек парогенераторов ПГВ-1000, ПГВ-1000М с применением системы автоматизированного контроля с полным циклом автоматизации. Методика	2015 г. ВВЭР-440	Дефекоскоп: АВГУР-АРТ (АВТОМАТ) Сканирующее устройство: Двухкоординатное сканирующее устройство Антенные решетки: частота 5,0 МГц, pitch 1, число элементов 32

этапов, то система с полным циклом автоматизации должна реализовывать следующие основные функции автоматизации на каждом из этих этапов:

- Этап 1: Настройка и сбор данных (программа регистрации данных)
- Настройка аппаратуры сбора данных (включая самотестирование оборудования);

- Автоматизированный сбор данных (сканирование и запись в режиме двойного и тройного сканирования);
- Автоматизированное сохранение результатов контроля в базе данных.
- Этап 2: Обработка и представление данных (программа анализа данных)
 - Автоматизированное определение качества акустического контакта.
 - Автоматизированное определение отношения сигнал/шум и контролепригодности в указанной области контроля.
 - Автоматизированное определение толщины основного металла и построение внутреннего профиля сварного соединения при двухстороннем доступе. Значения толщины являются вспомогательными для получения изображений дефектов в режиме Multi-ЦФА.
 - Восстановление изображений сечений объекта контроля по эхосигналам, полученным по совмещённой и раздельной схеме контроля, с применением двух антенных решеток, расположенных с двух сторон сварного соединения.
- Этап 3: Анализ данных, оценка качества объекта контроля, формирование заключения по результатам контроля
 - Автоматизированное обнаружение областей вероятной локализации несплошностей с учетом требований к настройке чувствительности контроля.
 - Автоматизированное измерение параметров несплошностей в соответствии.
 - Автоматизированное определение типа несплошности (внутренняя/выходящая на внутреннюю или внешнюю поверхность, протяженная/непротяженная, объемная/плоскостная).
 - Автоматизированная оценка качества объекта контроля.
 - Автоматическое формирование заключений по результатам контроля.
 - Ведение и сохранение протокола с результатами работы по сценарию.

Набор этого функционала, по нашему мнению, должен обеспечить возможность полностью автоматизировать и документировать процесс УЗК, что позволит создать в скором будущем системы УЗ диагностики нового поколения.

Заключение

В НПЦ «ЭХО+» создана и аттестована система нового поколения АВГУР-АРТ с передовой технологией применения антенных решеток — цифровой фокусировкой антенны. Новая технология обеспе-

чивает получение изображений феноменального качества, что существенно расширяет возможности эксплуатационного контроля и открывает возможности для создания систем нового поколения — систем с полным циклом автоматизации.

Список литературы

1. Chatillon S., Fidahoussen A., Iakovleva E., Calmon P. Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models. — NDT in Canada 2009 National Conference, Aug 25–27, 2009.
2. Bulavinov A., Dalichow M., Kröning M., Kurz J.H., Walte F. and Reddy K. Quantitative Ultrasonic Testing of Pressurized Components Using Sampling Phased Array. Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. 7–9, 2006, Hyderabad, p. 437–448.
3. Базулин Е.Г., Голубев А.С., Коколев С.А. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов. Дефектоскопия, 2009, № 2, с. 18–32.
4. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция. Дефектоскопия, 1990, № 2, с. 29–41.
5. Базулин Е.Г. Восстановление изображения дефектов методом C-SAFТ по эхосигналам измеренным антенной матрицей в режиме тройного сканирования. Дефектоскопия, 2012, № 1, с. 3–19.
6. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решёток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов. В мире неразрушающего контроля, № 1 (51), март 2011, с. 64–70.
7. Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решётками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12–22.
8. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. <http://www.olympus-ims.com/en/books/>
9. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решётки или фазированные антенные решётки // Дефектоскопия. 2013, № 7. С. 51–75.
10. Боресков А., Харламов А., Основы работы с технологией CUDA — М.: ДМК-Пресс, 2010. — 232 с.

Опыт применения автоматизированного ультразвукового контроля технологических трубопроводов из аустенитных сталей взамен радиографического контроля на примере строительства комплекса каталитического крекинга ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез»

The experience of technological austenitic pipelines AUT in lieu of RT based on construction of catalytic cracking complex LLC "Nizhegorodnefteorgsintez"

В статье рассмотрены вопросы применения автоматизированного ультразвукового контроля аустенитных сварных соединений выполняемого взамен радиографического контроля проводимого при монтаже технологических трубопроводов комплекса каталитического крекинга. Представлены результаты испытаний методики автоматизированного ультразвукового контроля аустенитных сварных соединений, основанной на применении когерентных методов получения акустических изображений внутренней структуры объекта контроля.

In this paper highlighted aspects of technological austenitic pipelines AUT in lieu of RT based on construction of catalytic cracking complex. Results of AUT procedure attestation presented. Procedure based on coherent data treatment with visualization of internal structure of inspected object.

Введение

При строительстве современных комплексов переработки нефти существует необходимость неразрушающего контроля большого числа монтажных аустенитных сварных соединений различных типоразмеров. Наибольшие трудности возникают при контроле толстостенных аустенитных соединений. Применение традиционного рентгенографического метода ограничивается тем, что на больших толщинах его чувствительность значительно снижается. При этом требуется значительное увеличение времени экспозиции и мощности источника ионизирующего излучения. Тем не менее, качество получаемых снимков зачастую остается непригодным для их анализа. Платить приходится низкой производительностью контроля и значительными организационными трудностями связанными с обеспечением безопасности при работе с источниками ионизированного излучения. Во время контроля на производственной площадке должны быть остановлены другие работы в радиусе воздействия ионизирующего излучения. Другим недостатком рентгенографического метода является его низкая чувствительность к наиболее опасным плоскостным дефектам, плоскость которых совпадает с плоскостью излучения.

Одним из решений этих проблем могло бы стать использование новых технологий ультразвукового контроля (УЗК), использующих эффективные ме-

тоды повышения отношения сигнал/шум, низкий уровень которого для традиционных методов УЗК аустенитных сварных соединений делает невозможным его применение на требуемых уровнях чувствительности. Причиной ограниченных возможностей традиционных методов УЗК является высокая зернистость материала свариваемых деталей и самого сварного соединения, приводящая к высокому коэффициенту затухания ультразвука и высокому уровню структурных реверберационных шумов. На рис. 1 приведены эхо-сигналы традиционного УЗК, полученные в бездефектном аустенитном сварном соединении. Хорошо заметен высокий уровень шумовых сигналов, превосходящий уровень фиксации несплошностей. Другим недостатком традиционного и обычного ручного УЗК является отсутствие записи исходных сигналов, ведущее к возрастанию субъективного фактора.

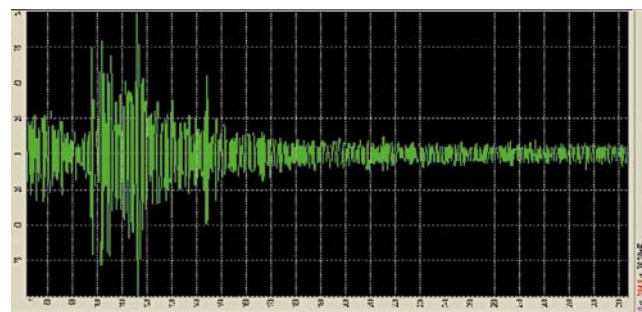


Рис. 1. Эхо сигнал в аустенитном сварном соединении

Преодолеть недостатки традиционного УЗК стало возможным с применением автоматизированных средств ультразвукового контроля, использующих 2D- и 3D- когерентную обработку данных, обеспечивающих стопроцентную запись эхо-сигналов и трёхмерное представление результирующих изображений дефектов.

Для преодоления недостатков рентгенографического контроля, особо остро проявившихся при строительстве комплекса каталитического крекинга ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» и приведших к ограничению производительности работ, было решено заменить рентгенографический контроль автоматизированным ультразвуковым контролем (АУЗК) с когерентной обработкой данных. Для решения этой задачи была разработана и испытана методика АУЗК, в соответствии с которой был проведен контроль аустенитных сварных соединений.

Методика контроля

В процессе разработки методики контроля аустенитных сварных соединений технологических трубопроводов был учтен многолетний опыт успешного применения на атомных станциях систем с когерентной обработкой данных серии АВГУР с ее методическим обеспечением, разработанных в ООО «НПЦ «ЭХО+». Анализ материалов и геометрических характеристик сварных соединений технологических трубопроводов установки каталитического крекинга показал высокую степень их сходства с аустенитными сварными соединениями объектов атомной энергетики, для которых методики контроля были разработаны ранее. Так аустенитные кольцевые сварные соединения толщиной от 13 мм до 20 мм установки каталитического крекинга аналогичны кольцевым сварным соединениям аустенитных трубопроводов реакторов ВВЭР-440, кольцевые аустенитные сварные соединения толщиной от 20 мм до 60 мм аналогичны аустенитным сварным соединениям верхних патрубков вакуумной камеры ИТЭР. Это позволило при разработке методики использовать основные положения «Методики АУЗК кольцевых сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду200 реакторов ВВЭР-440 с применением системы АВГУР 5.2» и «ITER vacuum vessel upper ports production welds automated ultrasonic inspection procedure».

Одной из особенностей разработанной методики является применение когерентных методов обработки эхо-сигналов. В процессе контроля аустенитных сварных соединений эти методы применяются для получения изображений внутреннего объема сварных соединений. В системе АУЗК

АВГУР-Т когерентные изображения получаются в результате обработки сигналов по методу FT SAFT [1]. Особенности FT-SAFT изображений являются:

- высокое фронтальное и лучевое разрешение, как следствие того, что при построении изображений используется амплитудная и фазовая информация поля, рассеянного дефектом;
- повышение отношения сигнал/шум за счёт совместной обработкой А-сканов при восстановлении изображений;
- относительная нечувствительность изображений к изменениям условий акустического контакта при регистрации данных, что обеспечивается совместной обработкой А-сканов, зарегистрированных при разных положениях преобразователя.

С целью дополнительного увеличения отношения сигнал/шум было предложено для аустенитных сварных соединений толщиной более 22 мм проводить контроль двумя типами волн: объемных волн сжатия и сдвига. На этапе когерентной обработки изображения, полученные по отдельности для каждого типа волн когерентно складываются в итоговое изображение, что позволяет дополнительно уменьшить уровень структурных шумов и обеспечить лучшее выявление некоторых типов технологических дефектов.

Предпринятые меры по увеличению отношения сигнал/шум позволили обеспечить чувствительность автоматизированного ультразвукового контроля аустенитных сварных соединений в соответствии с требованиями ПБ 03-585-03 [2].

Испытания методики контроля

Испытания предложенной методики контроля аустенитных сварных соединений проводились с целью установления технической возможности замены контроля гаммаграфированием на АУЗК. Другой целью испытаний было установление возможности применения предложенной методики АУЗК для контроля качества сварных соединений технологических трубопроводов объектов нефтехимического и нефтеперерабатывающего производства диаметром от 219 мм до 600 мм и толщинами стенки от 20 до 45 мм изготовленных из импортной аустенитной стали А312 (российский аналог — 12Х18Н10Т).

Основным методом испытаний было выбрано сопоставление результатов АУЗК образцов аустенитных сварных соединений с реальными дефектами с паспортными данными образцов или данными контроля базового метода. В качестве базового метода использовался радиографический контроль панорамным методом с применением рентгеновского аппарата «Март-250» и гамма де-

фектоскоп при контроле производственных стыков через две стенки. В процессе испытаний также оценивались функциональные особенности системы АВГУР-Т на предмет их соответствия требованиям ASME CASE 2235-9 [3] для замены радиографического метода контроля ультразвуковым.

Установление возможности применения АУЗК проводилось путем проверки выявления АУЗК по предложенной методике АУЗК несплошностей, дефектов и конструктивных отражателей регламентированных правилами ПБ 03-585-03.

Испытания проводились в несколько этапов. На первом этапе было проведено сравнение результатов АУЗК тест-образцов с их паспортными данными и определялся запас чувствительности контроля. Для испытаний использовались два тест-образца из стали 08Х18Н10Т ГОСТ 5632-72 толщиной 44 мм и 52 мм с искусственными отражателями, расположенными как на поверхности, так и в сечении сварных соединений.

В первом образце толщиной 52 мм имеются шесть боковых отверстий, три из них по границе разделки сварного соединения, три отверстия по центральной линии шва, отверстия диаметром 2 мм, расположены на глубинах 15, 30 и 45 мм. На рис. 2 представлены В-, С- и D- сечения результирующего 3D-изображения боковых сверлений, полученного в процессе АУЗК тест-образца толщиной 52 мм. Анализ полученных изображений показал, что обнаруживаются все боковые сверления, причем фактическое отношение сигнал/шум достаточно для обеспечения выявления дефектов меньшего размера на требуемой правилами ПБ 03-585-03 чувствительности контроля.

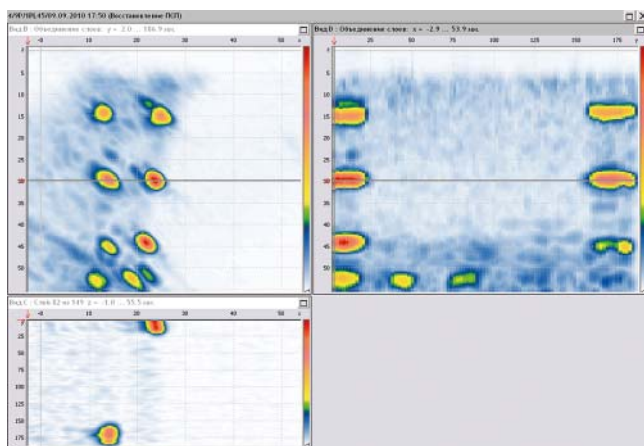
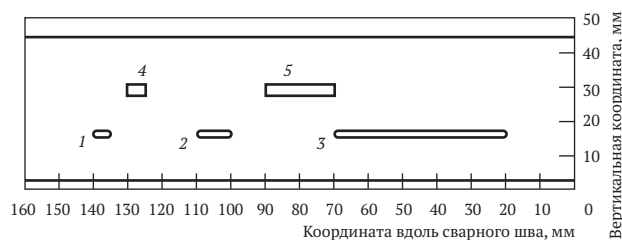


Рис. 2. Результаты АУЗК тест-образца толщиной 52 мм

Во втором образце сварного соединения при изготовлении были заложены дефекты в виде реальных технологических дефектов (непроваров и шлаковых включений). Их положение и размеры приведены на рис. 3. Результаты контроля второго тест-образца представлены на рис. 4. Видно, что



Условный номер дефекта	Геометрия дефекта	Расположение дефекта
1	Непровар по кромке сварного шва: Длина — 5 мм, высота — 2 мм	Глубина залегания от наружной поверхности — 28 мм
2	Непровар по кромке сварного шва: Длина — 10 мм, высота — 2 мм	Глубина залегания от наружной поверхности — 28 мм
3	Непровар по кромке сварного шва: Длина — 50 мм, высота — 2 мм	Глубина залегания от наружной поверхности — 28 мм
4	Шлаковое включение в сварном шве: Длина — 5 мм, высота — 3 мм	Глубина залегания от наружной поверхности — 15 мм
5	Шлаковое включение в сварном шве: Длина — 20 мм, высота — 3 мм	Глубина залегания от наружной поверхности — 15 мм

Рис. 3. Параметры дефектов второго тест-образца (паспортные данные)

по изображениям обнаруживаются все внесенные дефекты. Было установлено, что определенные по изображениям размеры дефектов совпадают с паспортными значениям в пределах установленной погрешности измерения системы АВГУР-Т.

В ходе испытаний на тест-образцах было установлено, что АУЗК, выполняемый по предложенной методике, удовлетворяет требованиям ПБ 03-585-03 к чувствительности контроля и типам выявляемых дефектов. Возможность измерения размеров дефектов удовлетворяет требованию ASME CASE 2235-9 для возможности замены радиографического метода контроля ультразвуковым с помощью системы АВГУР-Т.

Для подтверждения результатов испытаний, полученных на тест-образцах и установления степени информативности результатов АУЗК системой АВГУР-Т не ниже, чем при рентгенографическом контроле был проведен второй этап испытаний с использованием контрольных образцов.

Контрольные образцы представляли собой отдельно сваренные образцы (катушки) реальных сварных соединений $\varnothing 323,8 \times 22,23$ и $\varnothing 508 \times 34,93$, изготовленные по действующей аттестованной

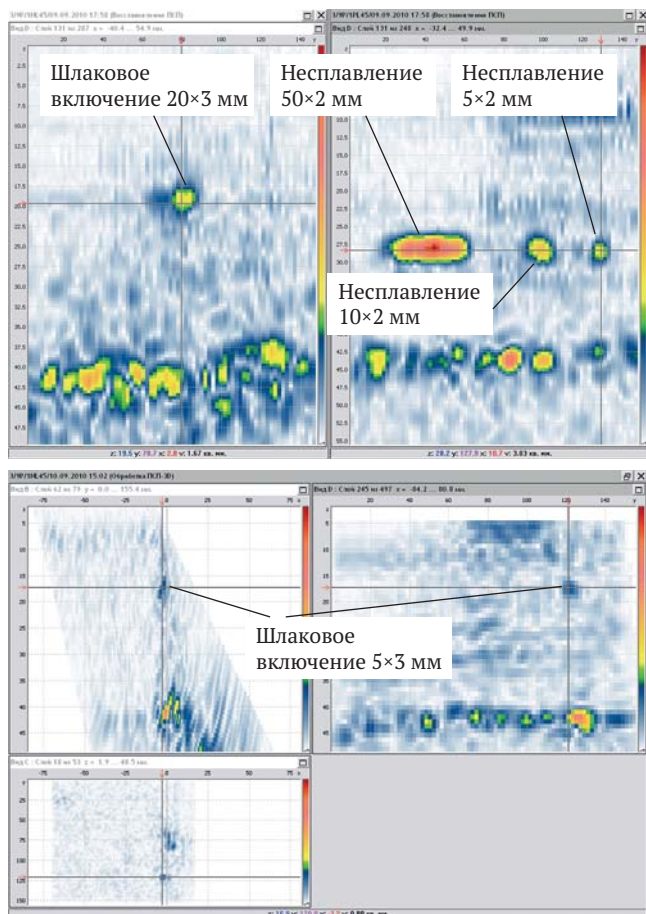


Рис. 4. Результаты АУЗК тест-образца толщиной 42 мм

технологии сварки (образцы ИОДy300 и ИОДy500 соответственно). В качестве контрольных образцов так же были использованы производственные (монтажные) сварные соединения технологического трубопровода установки гидроочистки вакуумного газойля. Образцы сварных соединений были изготовлены из импортной нержавеющей стали А312 выполненных комбинированной сваркой ручная аргодуговая сварка + ручная дуговая сварка. В образце ИОДy300 во время сварки были внесены искусственные дефекты в виде зерен графита, имитирующие шлаковые включения. Для имитации непровара корня в этом же образце был выполнен паз на внутренней стороне. Образец ИОДy500 был выполнен бездефектным. На рис. 5–7 представлены результаты АУЗК этих образцов. В образце ИОДy300 на изображениях в центральной части сварного соединения видны индикации №№ 2–7, соответствующие шлаковым включениям и индикация № 1, соответствующая пазу в корне сварного соединения. В образце ИОДy500 видно, что дефекты отсутствуют. Увеличение чувствительности контроля на 20 дБ приводит к тому, что на изображении становится видна внутренняя поверхность трубы, валик усиления на

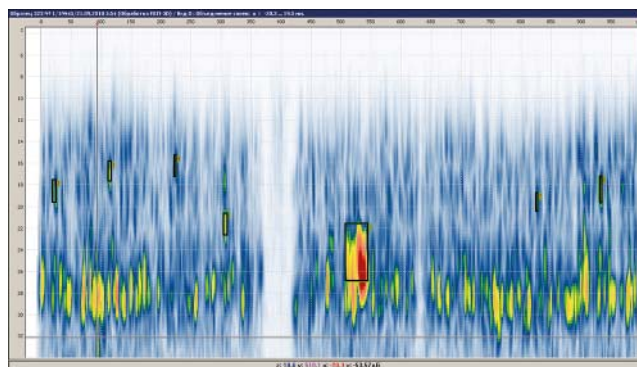


Рис. 5. Изображение D-вида образца ИОДy300

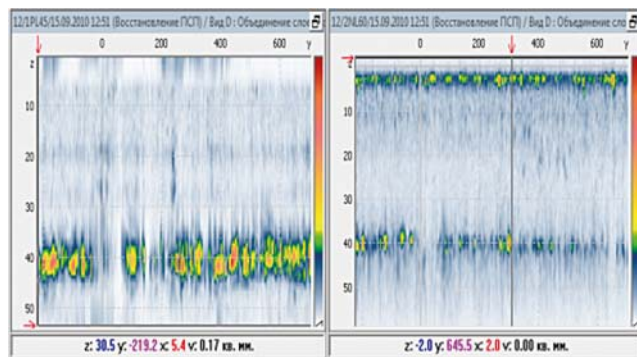


Рис. 6. Изображение D-вида образца ИОДy500

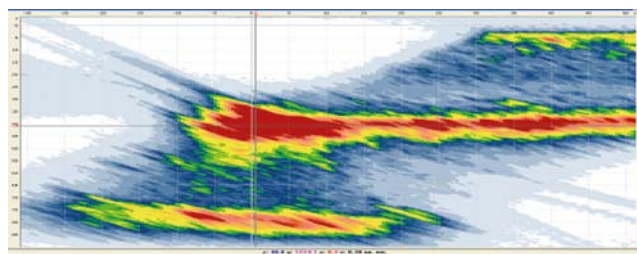


Рис. 7. Объединённое изображение всех сечений B-вида образца ИОДy500 на прямом и отраженном луче на завышенной на 20 дБ чувствительности

отраженном луче и внутренняя структура сварного соединения (рис. 7).

Полученные результаты сравнивались с данными рентгенографического контроля. В процессе сопоставления и анализа результатов АУЗК и рентгенографического контроля образцов было установлено, что контроль, проводимый по предложенной методике, обеспечил обнаружение дефектов, в сварном соединении, включая границу шва и околшовную зону. Была также подтверждена возможность выявления технологических и искусственных несплошностей, эквивалентная площадь которых равна или превышает 2 мм^2 , что соответствует требованиям, установленным для труб первой категории по правилам ПБ 03-585-03. Аналогичные результаты были получены и при контроле образцов в виде производственных сварных соединений технологического трубопровода $\text{Ø} 508 \times 34,93$, изготовленного из стали А312,

установки вакуумного газойля. При сравнении результатов было отмечено, что в процессе АУЗК на контрольном уровне выявляются дефекты, которые не обнаруживаются рентгенографическим контролем, что свидетельствует о более высокой чувствительности АУЗК. Другими преимуществами АУЗК системой АВГУР-Т являются возможность обнаружения в сварных соединениях плоскостных дефектов и трехмерная визуализация дефектов с определением их координат и размеров. Было отмечена и такая особенность контроля, проводимого системой АВГУР-Т, как сохранение исходных данных в базе данных системы без каких-либо предварительных обработок, что позволяет выполнять их просмотр в любое время после проведения контроля. Эти особенности системы АУЗК удовлетворяют требованиям ASME CASE 2235-9 для возможности замены рентгенографического метода контроля на ультразвуковой.

Все испытания проводились в присутствии представителя Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору России. На основе полученных в ходе испытаний результатов «Методика автоматизированного ультразвукового контроля стыковых сварных соединений технологических трубопроводов из сталей аустенитного класса с применением системы АВГУР-Т» (МА-ТД-НХ1-Т2С/26-К-10) получила разрешение Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору России на применение на объектах химических и нефтехимических взрывоопасных производств.

По результатам испытаний было отмечено, что методика МА-ТД-НХ1-Т2С/26-К-10 может быть использована для проведения контроля качества технологических трубопроводов объектов нефтехимического и нефтеперерабатывающего производства изготовленных из аустенитных сталей А312 (российский аналог — 12Х18Н10Т) диаметром более 219 мм.

Проведение контроля

В соответствии с проверенной методикой был проведен АУЗК аустенитных сварных соединений технологических трубопроводов установки гидроочистки вакуумного газойля комплекса каталитического крекинга нефтеперерабатывающего завода ООО «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез». Оценка качества выполнялась в соответствии с ПБ 03-585-03. Автоматизированный ультразвуковой контроль проводился взамен рентгенографического, поскольку последний не мог обеспечить приемлемой производительности и требовал

остановки других работ на время его проведения. Как показали испытания, проведение АУЗК одного сварного соединения $\varnothing 508 \times 34,93$ не превышает 60 мин. при возможности проведения других монтажных работ. В ходе АУЗК обеспечивается соблюдение мер безопасности для окружающих.

В процессе АУЗК (рис. 8) было проконтролировано 91 аустенитное сварное соединение из них $\varnothing 558,8 \times 38,1$ — 19 штук; $\varnothing 508,8 \times 34,9$ — 29 штук; $\varnothing 457 \times 34,9$ — 27 штук; $\varnothing 406,6 \times 28,6$ — 16 штук. Контроль проводился в период с 24.09.2010 г. по 13.10.2010 г.



Рис. 8. Проведение АУЗК аустенитных сварных соединений

Наилучшая производительность контроля за время проведения работ составила 10 сварных соединений в день, а обычная величина производительности была 6–7 сварных соединений в день. Опыт контроля показал, что для обеспечения высокой производительности контроля необходимо решить следующие задачи:

- исключить время ожидания на подготовку сварного соединения к АУЗК;
- исключить время ожидания на обеспечение безопасного доступа к сварному соединению;
- обеспечить возможность работы в несколько смен;
- обеспечить готовность сварных соединений и безопасного доступа к ним на выходные дни из расчета 5 СС на одну бригаду на один день.

Еще одним фактором влияющим на производительность работ является большое разнообразие свариваемых деталей технологических трубопроводов. На объекте встречались сварные соединения труба — гиб (отвод), труба — труба, катушка — гиб (отвод), гиб — катушка — гиб, тройник — гиб, тройник — труба, тройник — тройник, конусные сварные

соединения. Это приводит к частой перенастройке сканирующей системы под особенности конструкций деталей. Контроль некоторых сварных соединений, например, сварных соединений с фланцами возможен только с одной стороны. В этом случае контроль со стороны фланца невыполним из-за невозможности сканирования по поверхности фланца. При одностороннем контроле снижается чувствительность на стороне сварного соединения противоположной той, с которой проводится контроль.

В качестве примера на рис. 9 представлены результаты контроля в виде развертки типа *D* (вдоль сварного соединения), на которых видны допустимые (не превышающие браковочного уровня) точечные дефекты, расположенные на границе валиков сварного соединения. Наличие индикаций от валиков сварного соединения свидетельствует о возможности проведения контроля на достаточно высоком уровне чувствительности.

По результатам контроля на каждое сварное соединение было выдано заключение, к которому помимо обычной информации о дефектах прилагались когерентные изображения сварного соединения по всей его длине и глубине (рис. 11). Изображения представляет *D*-вид координатная ось *y*, отложена вдоль оси сварного соединения, а координатная ось *z* отложена вглубь сварного соединения от его внешней поверхности.

Проведенный контроль аустенитных сварных соединений технологических трубопроводов позволил в срок сдать заказчику установку гидроочистки вакуумного газойля комплекса каталитического крекинга нефтеперерабатывающего завода ООО «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез».

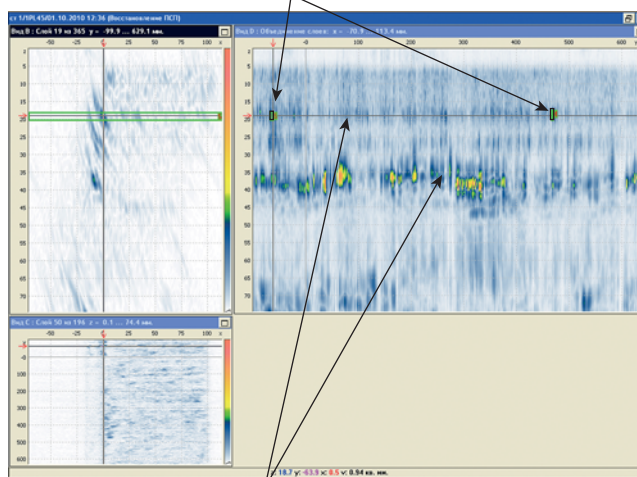
Сохранённые в базе данных контроля изображения и исходные эхо-сигналы позволяют проводить сопоставительный мониторинг состояния сварных соединений в процессе их дальнейшей эксплуатации.

Таким образом применение АУЗК системой АВГУР-Т взамен радиографического контроля показало высокую эффективность как по качеству контроля, так и по производительности. Для проведения радиографического контроля потребовалось бы до 90 рабочих смен при останове других видов работ. При АУЗК контроль проведен за 15 рабочих дней в условиях продолжающихся монтажных работ.

Выводы

1. Показана возможность замены радиографического контроля аустенитных сварных соединений технологических трубопроводов нефтехимической аппаратуры автоматизированным

Допустимые точечные дефекты



Границы валиков сварного соединения

Рис. 9. Развертка типа *D* с индикациями дефектов

ультразвуковым контролем с когерентной обработкой данных с оценкой качества сварных соединений в соответствии с ПБ 03-585-03.

2. Разработана и успешно прошла испытания методика АУЗК аустенитных сварных соединений. Получено одобрение инструкции от Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору России.
3. Рекомендуются при строительстве, ремонте и эксплуатации нефтехимической аппаратуры контроль аустенитных сварных соединений проводить ультразвуковым методом с использованием системы АВГУР-Т взамен радиографического контроля.
4. За 15 рабочих дней проведен АУЗК 91 аустенитного сварного соединения на установке вакуумного газойля ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез».
5. Показана более высокая эффективность применения АУЗК аустенитных сварных соединений в сравнении с рентгенографическим контролем.

Литература

1. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. и др. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов/под ред. А.Х. Вopilкина. М.: Машиностроение, 2008 – 368 с.
2. ПБ 03-585-03 Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов.
3. Code CASE 2235-09 Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel Code.

Разработка и аттестация методик АУЗК с использованием программного комплекса CIVA

Development and certification of ultrasonic inspection procedures with the use of software CIVA

Рассмотрены основные области применения комплекса программ CIVA как вспомогательного средства для разработки и аттестации методик ультразвукового неразрушающего контроля. Рассмотрены результаты применения схемы регистрации данных методом тандем, полученные при использовании в экспериментах при моделировании.

Приведены примеры использования моделирования для выбора параметров УЗК в объекте сложной формы с применением антенных решеток. Работоспособность выбранной схемы контроля оценивалась по результатам измерений на тест образце.

Даны результаты расчетов оценки соответствия методики контроля изделия требованиям технического задания (выявляемость дефектов, локализованных в области контроля; построения кривой выявляемости).

The main field of application of CIVA software as auxiliary tools for the development and certification of ultrasonic inspection procedures. The results of the inspection by Tandem method obtained with experiments and modeling. Examples of the use of modeling for inspection parameters for object of complex shape with the use of antenna arrays shown. Efficiency of the selected control scheme was evaluated by measurements on the test sample. Given the results of calculations of conformity assessment procedures products requirements of reference (detection of flaws localized in the area of control; POD-curve).

ВВЕДЕНИЕ

Применение современных средств моделирования предоставляет возможность существенного повышения эффективности разработки и оценки возможностей (аттестации) методик ультразвукового контроля (УЗК). Требования к их аттестации на объектах атомной энергетики, которые регламентируются общим подходом к процедуре контроля, аппаратуре и персоналу, изложенном в РД ЭО 0487-05 [1]. Этот документ, разработанный на основании федерального закона «Об использовании атомной энергии» и развивает положения государственных и отраслевых стандартов ГОСТ Р 15.201-2000, ГОСТ 15.005-86, ОСТ 9518-2001, с учётом рекомендаций ENIQ (Европейская Сеть по Аттестации Эксплуатационного контроля) [2, 3] и МАГАТЭ [4].

Методология аттестации методик ультразвукового контроля ENIQ сочетает:

- *практические испытания*, предназначенные для проведения оценки соответствия методики контроля выполнению целей, поставленных в методике;
- *техническое обоснование*, которое предназначено, в частности, для преодоления ограничения количества испытательных образцов и дефектов путём получения дополнительных данных при моделировании методики контроля.

Использование математического моделирования даёт возможность учесть и проанализировать

влияние на результаты контроля значительного числа допустимых и возможных отклонений параметров контроля и параметров самого объекта контроля (ОК) от номинальных значений, что очень трудно достичь одними натурными испытаниями и даже длительной опытной эксплуатацией.

В рекомендациях ENIQ [5] сформулированы требования к программным средствам (ПС), которые можно использовать для моделирования.

В настоящее время разработано много ПС, удовлетворяющих этим требованиям:

- универсальные ПС, в которых для расчетов полостей используется метод конечных элементов ANSYS [6, 7], COMSOL [8], или конечных разностей UMASIS [9];
- специализированные ПС, предназначенные для моделирования акустических полей, в которых для этих целей используется теория лучевых трубок: CIVA (CEA, Франция) [10], I3D (UTEX SI, Канада) [11], UTSIM (США) [12], simSUNDT (Швеция) [13], [14] (BAM, Германия).

Краткое описание ПС CIVA

Далее, мы будем рассматривать использование моделирования для разработки и аттестации методики ультразвукового неразрушающего контроля с применением модуля ультразвукового контроля ПС CIVA. Программное средство CIVA разработано

Комиссариатом по Атомной Энергии и аттестовано НПЦ «ЭХО+» [15] для использования в атомной энергетике России.

ПС CIVA предназначено для:

- моделирования ультразвуковых полей преобразователей и антенных решёток для изучения рассеяния ультразвука на дефектах;
- моделирования взаимодействия акустических волн с несплошностями, локализованными в твёрдых телах ограниченных размеров (акустические методы отражения, прохождения и комбинированные);
- выполнения компьютерного анализа в широкой области изменения параметров контроля и возможных положений, форм, размеров и ориентаций дефектов.

В ПС CIVA для *приближенного расчёта акустических полей преобразователей и антенных решёток* используется **теория лучевых трубок** [16, 17, 18], которая описывает распространение звука в **скалярном приближении**, когда продольная и сдвиговая волны рассматриваются независимо друг от друга. Взаимное преобразование этих волн может происходить при процессах преломления и отражения лучей.

Для *приближенного расчёта взаимодействия акустических полей с дефектами* применяются следующие алгоритмы.

Теория дифракции Кирхгофа [18] используется для прямоугольных, полуэллиптических плоских дефектов, САD-дефектов (заданных произвольным плоским контуром), для объёмных дефектов типа: отверстий с полусферическим дном, плоскодонных отверстий или сферических включений.

Геометрическая теория дифракции [19] применяется для описания процесса дифракции на краях трещин (для прямоугольных дефектов, полуэллиптических плоских дефектов, произвольных САD-дефектов, не выходящих на границы ОК).

Модифицированное Борновское приближение [20] предназначено для моделирования дефектов в виде твёрдых включений типа сферических, цилиндрических и эллипсоидных включений в среду с другими упругими свойствами.

Как видно из списка используемых в ПС CIVA алгоритмов, ПС удовлетворяет требованиям [5] и результаты расчётов можно применять для моделирования в области неразрушающего контроля в рамках тех ограничений, которые накладываются на эти алгоритмы, относительно параметров ОК и параметров контролируемых несплошностей.

Использование расчетов с применением ПС CIVA для разработки и аттестации методик УЗК

Основными областями применения численного моделирования являются: моделирование различных акустических схем УЗК, оптимизация параметров методики контроля (**при разработке методики контроля**) и **анализ соответствия разработанной методики требованиям технического задания**.

Ниже мы рассмотрим некоторые задачи УЗК, где использование моделирования особенно эффективно.

Моделирование различных схем неразрушающего контроля

Существуют разнообразные схемы контроля, включающие в себя применение одного или нескольких акустических преобразователей. Здесь мы ограничимся моделированием одной из популярных схем УЗК, использующей два акустических преобразователя — схемы тандем. Рассмотрим **корректность качественного и количественного описания результатов регистрации данных, полученных при использовании схемы тандем** (рис. 1) в экспериментах и при расчетах с применением CIVA.

Для этого сопоставим изображения В-типа, полученные при расчетах и в экспериментах при синхронном сканировании двух акустических наклонных преобразователей вдоль стального образца толщиной 44 мм. В образце выполнен паз высотой 6 мм и толщиной 0,3 мм; применялись одинаковые преобразователи сдвиговых волн на частоту 2,5 МГц, с углом ввода акустического пучка 40° и расстоянием между ними — 80 мм. Полученные в экспериментах изображения В-типа приведены на рис. 2.

В этих изображениях наблюдается ряд эхосигналов, соответствующих отражению от поверхностей образца, паза и угла при распространении сдвиговых и преобразованных продольных волн, связанных с взаимодействием с дном образца и пазом. Расчёты, выполненные для такой схемы контроля, представлены на рис. 3. Здесь же для каждого набора эхосигналов дана схема хода лучей для сдвиговых волн (красная линия) и продольных волн, преобразованных на дефекте (зелёная линия).

Анализ рис. 2 и рис. 3а показывает, что все значимые эхосигналы получены и в экспериментах, и при расчётах. При этом наблюдаются высокоамплитудные эхосигналы от дефекта, обозначенные как «3» и «3а», которые соответствуют нижнему, выходящему на поверхность, и верхнему концам паза.

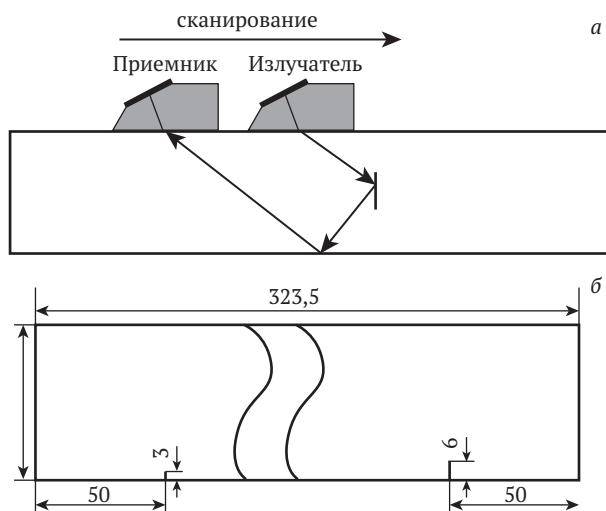


Рис. 1. Схема контроля методом тандем (а), эскиз образца (б)

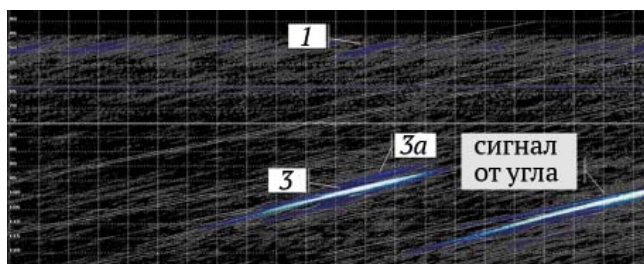


Рис. 2. Изображения В-типа, для расстояния между преобразователями 80 мм (эксперимент)

Схема распространения акустических пучков для этих эхосигналов изображена на рис. 3б. Видно, что в формировании эхосигналов «3» и «3а» участвуют только сдвиговые волны. При этом принимаемая волна, после взаимодействия с дефектом, испытывает двойное зеркальное отражение. Кроме того, взаимодействием с дефектом объясняется существование эхосигналов, обозначенных как «1» и «2». Заметим, что амплитуда этих сигналов значительно меньше, так как в формировании эхосигналов участвуют сдвиговые и продольные волны, преобразованные на дефекте. При этом в схеме «2» сдвиговые волны, при отражении от донной поверхности, преобразуются в продольные, которые взаимодействуют с дефектом и после второго отражения от верхней поверхности образца преобразуются обратно в сдвиговые волны, которые после очередного отражения регистрируются приёмником. Фактически в схеме «2» дважды выполняется преобразование сдвиговых волн в продольные, что оказывает значительное влияние на амплитуду эхосигналов.

Поэтому, учитывая наличие шума в экспериментальных данных, эхосигналы по схеме «2» на рис. 2 — не обнаружены. Количественные измерения амплитуд максимумов эхосигналов по изображениям В-типа, приведённых на рис. 2 и рис. 3

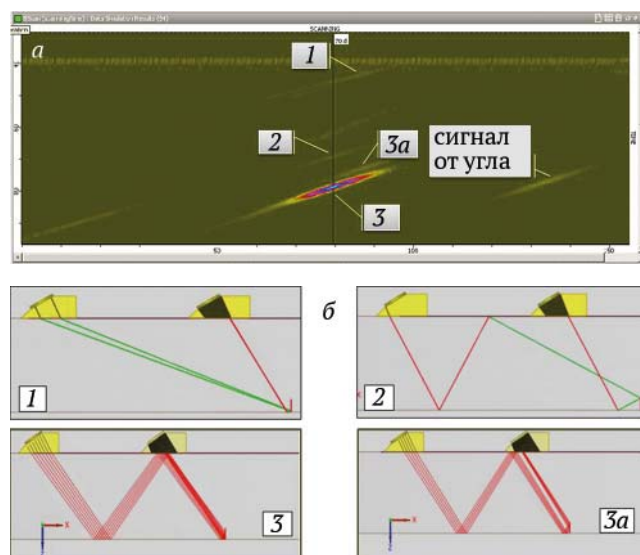


Рис. 3. Изображения В-типа, для расстояния между преобразователями 80 мм (расчёты СИВА): а — схемы распространения акустических пучков для различных положений ПЭП при сканировании по поверхности теста рис.1; б —соответствующие им схемы распространения акустических пучков. Цифры 1, 2, 3, 3а обозначают эхосигналы и соответствующие им схемы; красные линии соответствуют акустическим пучкам сдвиговых волн, зелёные — преобразованным продольным волнам

представлены в табл. 1. В ней в качестве опорных выбраны эхосигналы, соответствующие схеме «3», которая описывает распространение сдвиговых волн, отражённых от угла, образованного пазом и донной поверхностью.

Табл. 1. Амплитуда эхосигналов для схемы тандем с базой 80 мм

Схема распространения акустических пучков	Амплитуда эхосигналов, дБ	
	Расчёт	Эксперимент
1	— 33,5	— 30,6
2	— 36,6	—
3а	— 28,8	— 29,6
3	0	0

Данные измерений амплитуд эхосигналов, полученные в экспериментах и расчётах совпадают с точностью до 3дБ.

На этом примере видно, что использование моделирования значительно облегчает анализ схемы контроля и даёт возможность получить достоверную картину пространственно — временного положения эхосигналов, соответствующих различным типам акустических волн в объекте контроля; проанализировать причины появления эхосигналов (например, из-за эффектов преобразования типа

волны или геометрических отражений); корректно оценить амплитуду эхосигналов, которые будут наблюдаться в экспериментах.

Оптимизация параметров методики контроля

Одним из важных достоинств моделирования являются широкие возможности оптимизации разрабатываемой методики УЗК: выбора схемы УЗК при решении различных задач, параметров акустических преобразователей, параметров сканирования и др.

Ниже мы проанализируем выбор параметров УЗК сварного соединения (СС) приварки патрубка трубопровода с ультразвуковой антенной решеткой (АР). ОК выполнен из стали и представляет собой СС с усилением, с одной стороны которого имеется конусный переход, а с другой — цилиндрическая поверхность (см. рис. 4).

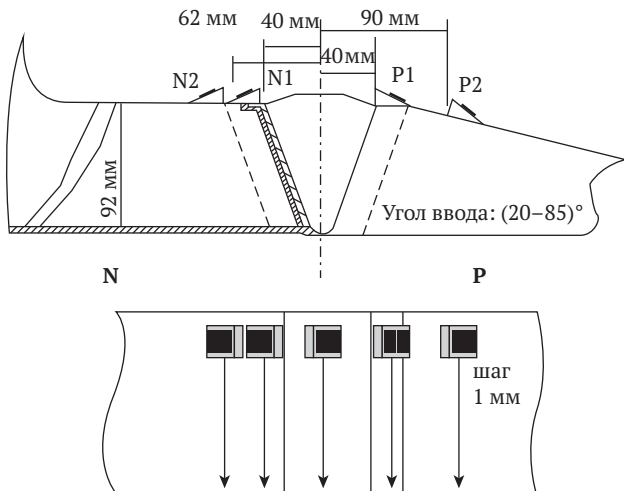


Рис. 4. Объект контроля и предлагаемые схемы контроля СС патрубка

Результаты моделирования подтверждают эффективность схемы контроля СС, предполагающей получение данных с обеих сторон с использованием 32-элементных АР на частоту 5 МГц, излучающих продольные волны. Рассматривалась модель объекта из стали, содержащая модели дефектов, расположенные по всей области контроля. Моделировались дефекты в виде боковых сверлений диаметром 2 мм; отверстия располагались на глубинах (от наружной поверхности) 5 мм, 10 мм, 20 мм и далее с шагом 10 мм по глубине. Отражатели локализованы по сечению СС в наплавленном металле, в центре и в околошовной зоне на расстоянии 20 мм параллельно кромке разделки, как это показано на рис. 5. Здесь отражатели изображены в виде красных окружностей; фокусировка акустического пучка осуществлялась вертикально по глубине. На рисунке фокусировка представлена в виде

«линии» синих дисков, которая перемещается синхронно со сканированием АР. На рис. 5 зафиксировано положение АР при котором фокусировка осуществляется в середине СС.

Анализ УЗК СС выполнялся для расположения АР со стороны конусного перехода и по цилиндрической поверхности. Сканирование проводилось с шагом 10 мм перпендикулярно оси СС. Секторное электронное сканирование с электронной фокусировкой осуществлялось в диапазоне углов ввода акустического пучка 20° – 85° . Фокусировка акустического пучка выполнена с постоянным смещением таким образом, чтобы при координатах передней грани призмы 80 мм, она выполнялась в середине шва СС (рис. 5). На рис. 6 приведены примеры изображений В-типа, полученные со стороны конусного перехода (левый рисунок) и цилиндрической поверхности (правый рисунок).

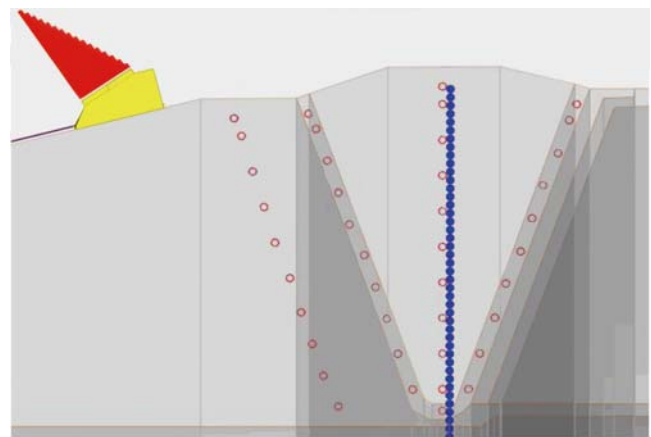


Рис. 5. Моделируемые отражатели диаметром 2 мм (красные кружки) и используемый закон фокусировки (синие диски)

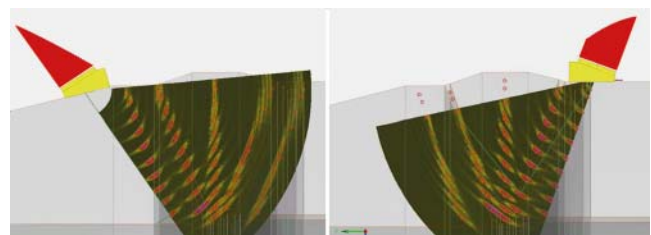


Рис. 6. Изображения В-типа с разных сторон СС: со стороны конусного перехода — слева, цилиндрической стороны — справа

Анализ результатов моделирования показывает, что для контроля всех отражателей достаточно использовать два положения АР с каждой стороны от оси СС: для сканирования по цилиндрической поверхности положение передней грани призмы соответствует координатам -40 мм и -60 мм; при сканировании со стороны конической поверхности сканирование выполняется при положении передней грани призмы в координате 40 мм (по

цилиндрической поверхности) и 90 мм (по конической поверхности).

В результате контроля выявляются отражатели в виде отверстий бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 5 мм. Все отражатели, расположенные в середине шва, выявляются с конической стороны, за счёт геометрических особенностей ОК. С цилиндрической стороны не выявляются два отражателя в центре шва на глубинах 5 и 10 мм.

Результаты расчётов составлялись с данными контроля, полученными на испытательном образце (рис. 7). Здесь номерами обозначены положения призмы при сканировании, числами обозначены координаты передней грани АР относительно середины СС. В соответствии с выводами по результатам моделирования, минимальной объём данных обо всех дефектах можно получить при четырех положениях АР: «1», «1'», «2» и «4».

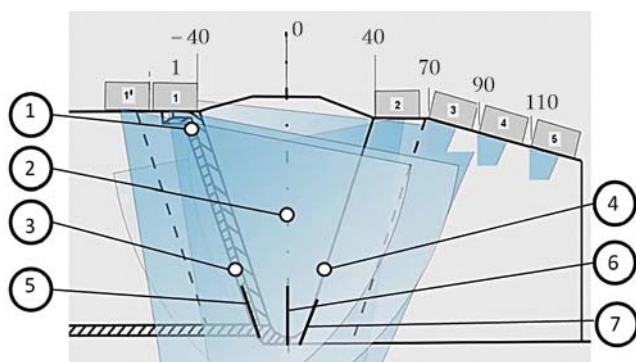


Рис. 7. Тест-образцы схема прозвучивания при экспериментах (номерами обозначены положения АР при сканировании)

Характерный результат измерений приведен на рис. 8. На нем представлены изображения (суммированные по всем слоям) А-, В-, С- и D- типа на которых отмечены изображения, соответствующие отверстиям бокового сверления № 1, 3 и пазу № 7 для положения АР, изображённого на схеме № 1. Заметим, что для пазов изображения В- и D- типа представляют собой совокупность элементов изображений, соответствующих дифракции от верхнего и отражению на нижнем конца пазы. Высота пазы определяется расстоянием между этими отражениями. При контроле со стороны конусоного перехода хорошо видны изображения, соответствующие отверстиям бокового сверления № 2, 4 и пазу № 5.

Относительные амплитуды эхосигналов (в дБ) для различных отражателей тест-объекта приведены в табл. 2. В качестве опорной амплитуды принята амплитуда сигнала от отверстия бокового сверления № 1. В этой же таблице представлены результаты измерений отношения сигнал от отражателя/шум.

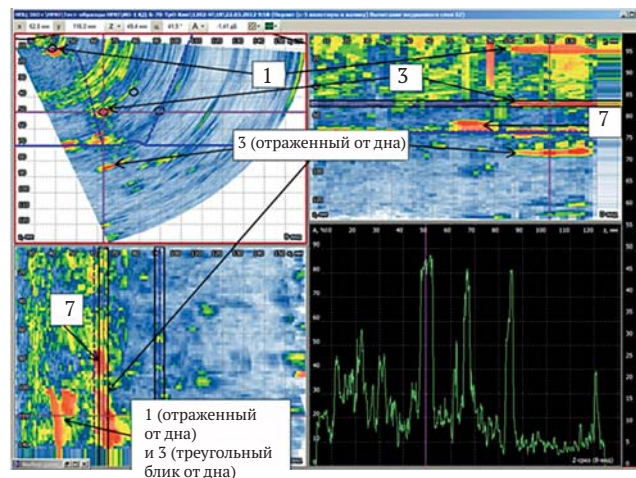


Рис. 8. Изображения А-, В-, С- и D- типа проконтролированного объёма тест-образца. АР расположена со стороны цилиндрической поверхности (рис. 7, схема 1)

Табл. 2. Амплитуда эхосигналов от моделей дефектов в тест-образце

№/тип отражателя	Соотношение амплитуд при выявлении дефектов, дБ		Отношение сигнал/шум при выявлении дефектов, дБ
	Сторона цилиндрической поверхности	Сторона конусоного перехода	
1/ отв. бокового сверления	0	-	12
2/ отв. бокового сверления	-	-7	15
3/ отв. бокового сверления	0	-	12
4/ отв. бокового сверления	-	0	20
5/ паз	-	-9	7
6/ паз	-	-10	4
7/ паз	-3	-	7

Анализ табл. 2 показывает, что расположение АР с обеих сторон СС обеспечивает экспериментальное обнаружение всех несплошностей (объёмных и плоскостных) с высоким отношением сигнал/шум, большим 6дБ. Вместе с тем несплошность № 6, расположенная в корне СС выявляется при отношении сигнал/шум 4дБ, что позволяет обнаруживать эту несплошность только при повышенной чувствительности аппаратуры контроля.

Выявляемость искусственных дефектов, локализованных в области контроля

Одним из неперенных условий технического задания на разработку методик контроля является требование к выявляемости дефектов в области, подлежащей ультразвуковому контролю. При этом обычно задаются:

- размеры искусственных дефектов (отверстий бокового сверления, плоскостных отверстий, пазов и т.д.), которые должны быть зафиксированы в результате контроля;
- вероятности выявления различного типа дефектов и различных размеров, локализованные в определённых областях контроля, описываемые кривой *POD* (а);
- размеры минимально выявляемых дефектов в определённых областях контроля;
- выявляемость дефектов в наихудшей дефектной ситуации.

Проверка выполнения этих требований технического задания с обеспечением статистически значимой выборки данных существенно упрощается при использовании моделирования процесса УЗК.

Оценка возможности фиксации дефектов заданных размеров, во всей области контроля

Оценка возможности выявления дефектов по всей области контроля является одной из таких трудоемких задач, которые достаточно просто решаются с использованием моделирования. Для чисто экспериментального решения этой задачи необходимо размещать искусственные дефекты в различных местах в области контроля, что требует значительного числа испытательных образцов. Ниже приведён пример моделирования результатов контроля сварных соединений узлов приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам корпуса парогенераторов (рис. 9). При моделировании в этом объекте были размещены 6 рядов моделей дефектов в виде отверстий бокового сверления диаметром 2 мм, расположенных на различных глубинах и одно отверстие того же диаметра, локализованное вблизи середины галтельного перехода. Заметим, что наиболее часто встречаются дефекты в области СС (ряды 2, 3, 4) и в нижней части области галтельного перехода (ряды 5, 6 и 7).

На рис. 9б также приведено расчетное изображение *B*-типа для всех модельных дефектов, полученное с применением 32-элементной ФАР при контроле с цилиндрической стороны. Аналогичное изображение было получено и со стороны галтельного перехода.

Для оценки возможности выявления эхосигналов от дефектов было экспериментально опре-

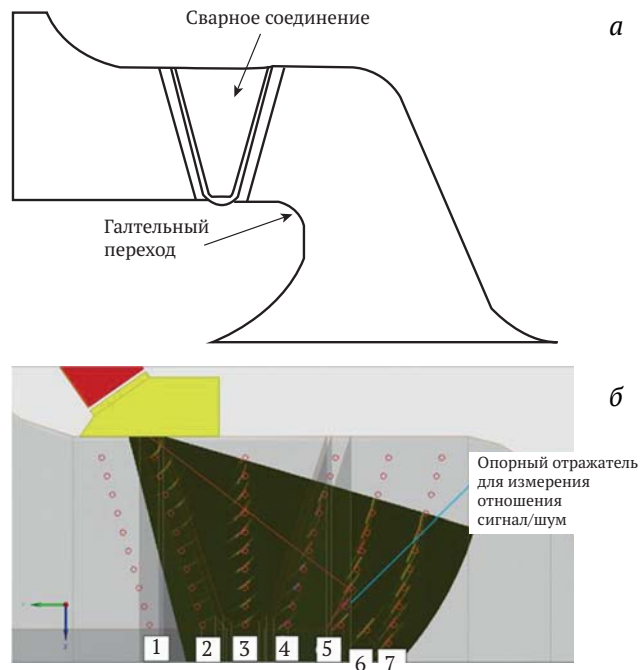


Рис. 9. Моделирования контроля кольцевых сварных соединений приварки коллекторов теплоносителя к корпусу парогенератора: а – эскиз объекта контроля; б – расчетная модель объекта контроля с отверстиями бокового сверления при контроле с применением ФАР в сторону галтельного перехода через сварной шов. Цифрами обозначены номера рядов модельных дефектов

делён уровень отношения сигнал/шум в объекте контроля. Эксперимент выполнялся на образце, содержащем отверстие бокового сверления диаметром 2 мм и изготовленном по той же технологии и из тех же материалов, что и контролируемый объект. Для оценки отношения сигнал/шум результаты измерений амплитуды эхосигналов от отверстия сопоставлялись с вычисленной амплитудой эхосигналов от отражателя, локализованного на глубине 63 мм и изображенного на рис. 9б (ряд № 5, по глубине № 9).

В табл. 3 приведены результаты расчетов амплитуд эхосигналов от дефектов, представленных на рис. 9б с учетом критерия их уверенного выявления на фоне шумов; амплитуда эхосигнала, равная 0дБ соответствует отношению сигнал/шум 6дБ. Амплитуда эхосигналов приведена в дБ в виде дроби, где числитель дроби соответствует данным, полученным при положении АР со стороны, противоположной галтельному переходу, знаменатель — со стороны галтельного перехода. Когда эхосигнал от дефекта отсутствует, то в числителе и /или знаменателе дроби ставится символ «-». В том случае, когда амплитуда эхосигнала от дефекта мала и меньше удвоенного значения уровня шума, их значения в таблице отрицательны. В этих случаях дефект не может уверенно обнаруживаться.

Табл. 3. Расчитанная амплитуда эхосигналов от моделей дефектов относительно экспериментально определенного уровня шумов в объекте контроля (дБ)

Положение по Y/Z	Ряд №						
	1	2	3	4	5	6	7
1	-/-	7/-	13/16	-/8	-/-	-/-	-/-
2	-/-	9/-	17/14	-/7	-/-	-/-	-/-
3	-/-	7/13	16/14	8/6	-/-	-/-	-/-
4	-/11	5/11	14/16	16/2	8/-	-/-	-/-
5	-/14	-6/19	16/15	12/-6	13/-	8/-	-/-
6	-/12	-5/13	15/14	13/-5	15/-	7/-	-/-
7	-/7	-5/10	16/13	21/-6	10/-	8/-	-/-
8	-/18	-5/14	14/13	21/-7	13/-	10/-	-/-
9	-/10	-6/14	12/9	21/-7	17/-	12/-	-/-
10	-/19	-7/16	6/3	18/-7	13/-	14/-	-/-
11	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	14/-	9/-

Анализ табл. 3 показывает, что:

- для выбранной схемы контроля обнаружение всех дефектов в наплавленном металле и в зоне галтельного перехода контроля возможно только при двустороннем контроле сварного шва;
- эффективный контроль области галтельного перехода возможен только со стороны, противоположной галтельному переходу;
- дефекты из рядов № 2 и № 4, локализованные на глубинах 5–10 мм при контроле только с одной стороны имеют достаточную амплитуду, чтобы уверенно выявляться;
- в области галтельного перехода обнаружение дефектов возможно только при положении ФАР со стороны, противоположной галтельному переходу;

Построение кривой $POD(a)$

Одним из важных параметров, которые определяются в современных технических заданиях на разработку методик контроля, является построение кривой $POD(a)$ — зависимости вероятности выявления дефектов от их размеров a (например, длина, высота). Так как для каждого размера несплошности, существует вероятность ее обнаружения, то кривую $POD(a)$ можно рассматривать как кривую, проходящую через средние вероятности обнаружения [21].

Для получения статистически достоверной вероятности обнаружения несплошности, равной 0,9 в 95% доверительном интервале, требуется не менее 28 независимых измерений (для одной точки на кривой $POD(a)$ для дискретных данных

«да/нет») [22]. Совершенно очевидно, что получение такого объема данных по результатам измерений чрезвычайно дорого и трудоёмко. Поэтому использование в целях построения кривой $POD(a)$ моделирования весьма уместно. Безусловно, расчитанная кривая $POD(a)$ должна быть сопоставлена с экспериментальными данными.

Ниже приводятся результаты расчетов и экспериментов, выполненных с использованием ПС CIVA при анализе методики контроля дефектов, поперечных оси СС, в трубопроводе из нержавеющей стали диаметром 325 мм.

В этой методике контроля используется схема прозвучивания сдвиговыми волнами на частоте 4 МГц (рис. 10). При этом применялись ПЭП, расположенные по обе стороны СС на расстоянии 90 мм друг от друга и развёрнутые под углом $\pm 45^\circ$ относительно осевой линии СС. Угол ввода акустического пучка в основной металл трубопровода составляет 70° относительно поверхности ввода. Акустические преобразователи синхронно сканируют по поверхности трубопровода по меандру. Сканирование выполняется двумя ПЭП с шагом 5 мм, по образующей трубопровода и с шагом 2 мм, вдоль СС. Здесь же представлена модель плоскостного дефекта, дифрагированное и отраженное акустические поля которого регистрируются при сканировании. Результатом контроля является амплитуда эхосигнала от корня модели дефекта.

Анализ зависимости амплитуды сигнала от дефектов от их высоты показывает, что эта зависимость нелинейная (рис. 11). Поэтому для построения кривой $POD(a)$ было выбрано дискретное распределение данных, сообщающее о наличии или отсутствии несплошности в данной области с использованием лог-логистической модели [23]. Здесь критерий выявления дефекта определяется по амплитуде сиг-

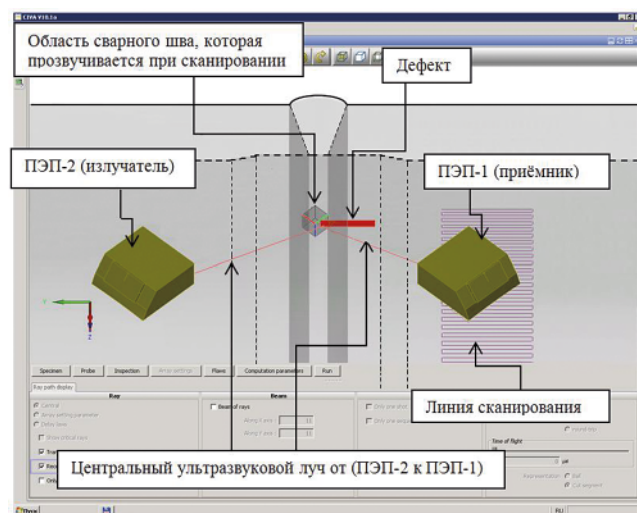


Рис. 10. Схема контроля на поперечные дефекты, использованная при расчётах на ПС CIVA

нала: превышение сигналом заданного порога, соответствующего уровню структурных акустических шумов — означает, что дефект выявлен или нет — не выявлен. По такому же критерию определяется факт обнаружения дефекта в экспериментах.

Рассчитанная, с применением специальной программы в ПС CIVA, кривая *POD (a)* приведена на рис. 12 (красная кривая). Здесь пунктирная синяя кривая соответствует 95% доверительному интервалу кривой *POD (a)*. Рассчитанные вероятности выявления дефектов заданной высоты приведены в виде символов «+».

Параметры дефектов, геометрические параметры ОК и схемы контроля, использованные в расче-

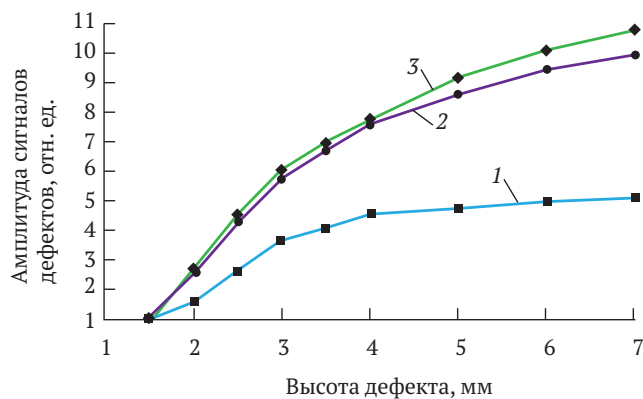


Рис. 11. Зависимость амплитуды сигналов от прямоугольных дефектов от их высоты: 1 — для вертикальных дефектов с нулевой азимутальной ориентацией; 2, 3 — для наклонных дефектов с углом наклона 3° относительно вертикали и азимутами 1° и 2°, соответственно

Табл. 4. Параметры контроля, при моделировании

Параметры дефекта		
1	Высота дефекта (поверхностного), мм	1,5; 2, 2,5; 3, 3,5; 4, 5, 6
2	Длина дефекта	15 мм
3	Угол наклона дефекта к нормали поверхности трубы	0°, ±3° (случайное распределение по нормальному закону — 15 реализаций)
4	Азимутальный угол ориентации дефекта относительно оси СС	90° ±3° (случайное распределение по нормальному закону — 15 реализаций)
5	Форма дефекта	Прямоугольная
6	Локализация	Поверхностная от внутренней поверхности, в области термического влияния
Геометрические параметры объекта контроля		
7	Диаметр трубопровода с СС, мм	325
8	Толщина стенки трубопровода, мм	15
Параметры схемы контроля		
9	Расстояние между ПЭП, мм	90
10	Угол разворота ПЭП относительно оси СС	± 45°
11	Угол ввода акустического луча в изделие	70°
12	Параметры сканирования ПЭП	Соответствуют Методике контроля

тах, приведены в табл. 4. Все параметры, которые изменялись при расчетах выделены подчеркиванием.

Для оценки правильности выбора влияющих параметров и построения кривой *POD (a)* были выполнены эксперименты по выявлению поперечных дефектов. Измерения выполнены на трех испытательных образцах, вырезанных из реально-

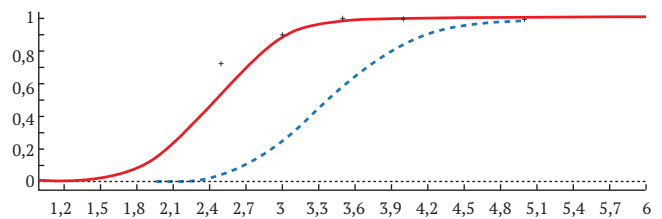


Рис. 12. Кривая *POD (a)*, рассчитанная с применением ПС CIVA для прямоугольных дефектов в СС длиной 15 мм (красная линия); 95% доверительный интервал — синяя пунктирная линия. В расчетах изменялась высота дефекта, его наклон и азимут

го трубопровода. Испытательные образцы содержали модели прямоугольных дефектов в виде вертикальных пазов высотой от 1,5 мм до 6 мм. Пазы были изготовлены перпендикулярно оси СС и расположены в зоне термического влияния. Были выполнены измерения при изменении азимутального угла в пределах ±3°. Полученные результаты приведены на рис. 13.

Анализ рис. 13 показывает, что результаты расчетов *POD (a)* и экспериментальные данные в целом согласуются: дефекты высотой более 3,5 мм выявляются во всех случаях; вероятность выявле-

ния дефектов высотой 1,5 мм — невысока. Здесь же можно оценить требования, предъявляемые к выявляемости дефектов различной высоты в методике и при расчетах ПС CIVA: расчеты показывают высокую вероятность выявления дефектов высотой 4 мм и более и низкую вероятность (но ненулевую) выявления дефектов высотой 1,5 мм, что подтверждается результатами экспериментов.

ВЫВОДЫ

Использование для моделирования ПС CIVA позволяет существенно облегчить разработку методик ультразвукового неразрушающего контроля, особенно для ОК сложной формы за счет детального анализа причин появления эхосигналов, связанных с эффектами преобразования типов волн и геометрических отражений; оценить соответствие

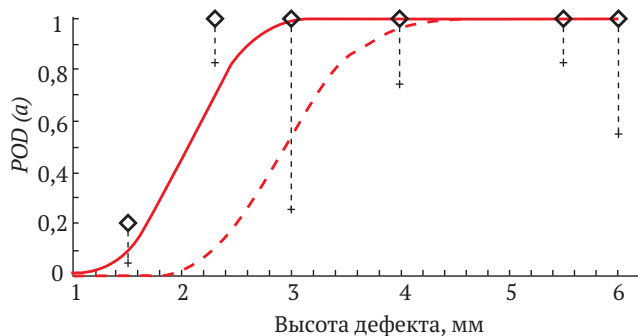


Рис. 13. Кривая $POD(a)$, рассчитанная ПС CIVA при учете изменения только азимутального угла в пределах $\pm 3^\circ$: сплошная линия — кривая $POD(a)$; пунктирная — нижняя граница 95% доверительной вероятности; точки — экспериментальные данные, + — нижняя граница 95% доверительной вероятности для экспериментальных точек (биномиальное распределение)

методики контроля требованиям технического задания по выявляемости дефектов во всей области УЗК; построить кривые зависимости вероятности выявления дефектов от их размеров.

Статья опубликована в журнале «Контроль. Диагностика» 2015. № 5

ЛИТЕРАТУРА

- РД ЭО 0487–05. Типовые требования к порядку разработки технического задания, проведению испытаний и условиям применения средств и методик неразрушающего контроля на объектах использования атомной энергии. Концерн «Росэнергоатом», Москва, 2005 г.
- Отчет ENIQ № 2, EURRU 17299, опубликованный Европейской комиссией, Брюссель-Люксембург, 1997. Европейская методика аттестации неразрушающего контроля.
- Отчет ENIQ № 31 EUR 22906 EN European methodology for qualification of non-destructive testing (third issue) Люксембург, 2007 г.
- Документ МАГАТЭ IAEA-EBP-WWER-11. Методология для аттестации систем эксплуатационного контроля для АЭС с реакторами ВВЭР. 1998 г.
- Отчет ENIQ № 15 EUR 19017 EN ENIQ recommended practice 6: The use of modeling in inspection qualification (issue1). Брюссель-Люксембург, 1999 г.
- Официальный сайт ANSYS — <http://www.ansys.com/>
- Басов К.А. ANSYS для конструкторов. М.: ДМК Пресс. 2009 г. 248 с.
- Официальный сайты COMSOL: <http://www.comsol.com/>; <http://www.humusoft.com/produkty/comsol/ru/>
- Официальный сайт программы UMASIS — http://www.tno.nl/content.cfm?context=thema&content=inno_case&laag1=895&laag2=911&item_id=444&Taal=2
- Официальный сайт CIVA — <http://www.extende.com/civa-3>
- Официальный сайт I3D — <http://www.utex.com>
- Официальный сайт UTSIM — <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/CalibrationMeth/utsim.htm>
- Håkan Wirdelius, Alexander Blomquist. The application of mathematical modeling of ultrasonic NDT in the qualification process [J/OL]. <http://www.ndt.net/article/ecndt98/reliability/323/323.htm>, 1998–11/2007-06-06
- Research Report No. 249 of the Federal Institute for Material Research and Testing (BAM) Berlin, ISBN 3-89701-632-X. Bremerhaven — Germany. NDT.net — June 2001, Vol. 6, No. 6.
- АТТЕСТАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА № 329 от 18.04.2013. Ростехнадзор, ФБУ «НТЦ ЯРБ»
- Акустика океана./Под ред. Бреховских Л.М. — М.: Наука, 1974. 693 с.
- Кравцев Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. — М.: Наука, 1980, с. 304.
- Leger Alain, Deschamps Marc (Eds.) Ultrasonic Wave Propagation in Non Homogeneous Media Series: Springer Proceedings in Physics, Vol. 128, 2009, X, 435 p. 168 illus.
- Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. — М.: Связь, 1978. 248 с.
- Huang R., Schmerr L., Sedov A.A. Modified Born Approximation for Scattering in Isotropic and Anisotropic Elastic Solids. — Journal of Nondestructive Evaluation, Volume 25, Number 3, September 2006, pp. 139–154.
- Berens, A. P. and Hovey, P. W., «Evaluation of NDE Reliability Characterization,» AFWAL-TR-81-4160, Volume 1, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Wright — Patterson Air Force Base, Ohio, December 1981.
- РД ЭО 0488–03 Методические рекомендации по оценке достоверности средств и методик неразрушающего контроля, Концерн «Росэнергоатом», Москва, 2005 г.

Сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла и сварных швов

Continuous Ultrasonic Thickness Measurement of Main Metal and Welded Joints

В статье описаны технологии ультразвуковой толщинометрии трубопроводов с применением фазированных антенных решёток и измерения профиля донной поверхности трубопроводов с применением фазированных антенных решёток, работающих по схеме TOFD (time-of-flight diffraction). Приведены результаты измерения с применением этих технологий. Также описаны перспективы развития методов с использованием технологии цифровой фокусировки антенны.

The problems of sampling ultrasonic thickness measurement are considered in this article. The application of methodologies and technologies using phased arrays are considered.

The principles of application of continuous thickness measurement of pipeline main metal and also measurement of pipeline welded joints bottom surface profile using antenna arrays technology and TOFD (time-of-flight diffraction) scheme are described. The simulations of the inspection scheme basic parameters of the technologies is carried out by the method of ray tubes with application the verified software CIVA.

Examples of application and technologies measurement results on test blocks are given in the article. The development perspectives of methods using digital antenna focusing for visualization and measurement of bottom surface profile are described

Введение

Трубопроводы в процессе эксплуатации подвержены эрозионно-коррозионному износу. Под воздействием теплоносителя происходит эрозионное разрушение защитной оксидной плёнки на внутренней поверхности, что способствует протеканию процесса коррозии, возникновению коррозионных трещин, в результате чего происходит разрушение металла стенки трубопровода. Одним из примеров эрозионно-коррозионного износа трубопровода является разрыв трубопровода в турбинном отделении АЭС Микама (Япония) в 2004 г. [1].

Для обеспечения надёжной и безопасной эксплуатации АЭС необходимо использование современных достижений технологий ультразвукового неразрушающего контроля и диагностики металла стенок и сварных соединений трубопроводов. Одним из таких направлений является сплошная ультразвуковая толщинометрия (УЗТ) основного металла и сварных швов с применением антенных решёток (АР). В отличие от выборочной УЗТ, применение автоматизированных сканирующих устройств при контроле позволяет увидеть и зафиксировать полную картину состояния металла.

На рынке представлены различные средства для сплошной УЗТ на основе АР в режиме электронного сканирования (рис. 1), которые позволяют за

один проход измерять толщину в полосе, ширина которой определяется количеством элементов в антенной решетке. Применение электронного сканирования АР значительно экономит время по сравнению с механическим сканированием, что является важным фактором, в том числе для работы в условиях ионизирующего излучения.

Выбор параметров АР для задач толщинометрии обоснован ниже.

В 2013 г. ООО «НПЦ «ЭХО+» совместно с Dekra Industrial (Швеция) были разработаны технологии и средства УЗТ. Работа велась по двум направлениям:

1. сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла трубопроводов с применением антенных решеток;
2. построение профиля донной поверхности сварных соединений трубопроводов с применением антенных решеток, применяемых по схеме TOFD (Time-of-flight diffraction).

Сплошная УЗТ основного металла трубопроводов

Объектом контроля (ОК) является основной металл перлитных трубопроводов с наружными диаметрами \varnothing 159–426 мм, гибы и конусные переходы. Диапазон контролируемых толщин стенок трубопроводов составляет от 2 до 60 мм.

Измерение толщины проводится с использованием технологии ультразвуковых фазированных антенных решеток эхо-импульсным ультразвуковым методом с контактным способом ввода ультразвука с наружной поверхности трубопровода с использованием полуавтоматизированных сканирующих устройств. Обеспечить относительно широкую полосу измерения толщины трубопровода позволила схема контроля, при которой АР движется вдоль оси трубопровода и ориентирована поперек направлению сканирования (рис. 1).

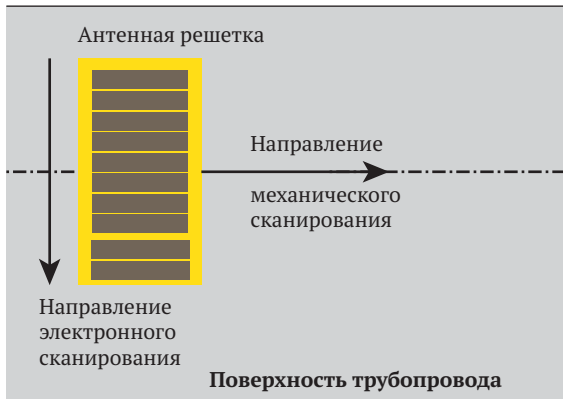


Рис. 1. Схема толщинометрии основного металла трубопроводов

В процессе измерений применяются АР, установленные на плосковогнутые призмы, контактная поверхность которых имеет вогнутую поверхность (рис. 2). При контроле используют продольную волну, сфокусированную на номинальную толщину ОК, и электронное сканирование, обеспечиваемое при подключении к дефектоскопу, поддерживающему технологию контроля фазированными АР.

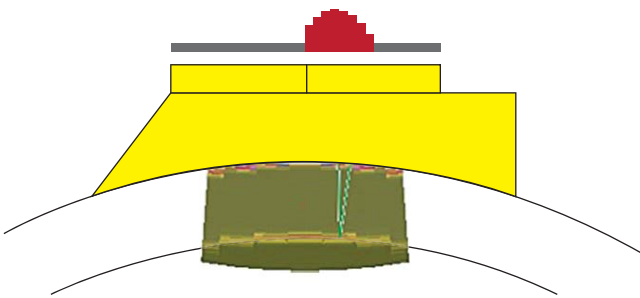


Рис. 2. Электронное сканирование вдоль апертуры АР

Для проведения толщинометрии основного металла трубопроводов по предложенной схеме контроля было разработано механизированное двухкоординатное сканирующее устройство на магнитных колесах (рис. 3) с возможностью установки на трубопроводы с наружными диаметрами $\varnothing 159\text{--}426\text{ мм}$, а также на гибы и конусные переходы. Использование нестандартной схемы контр-

оля, изображенной на рис. 2, привело к необходимости обоснования параметров и настроек применяемого оборудования.

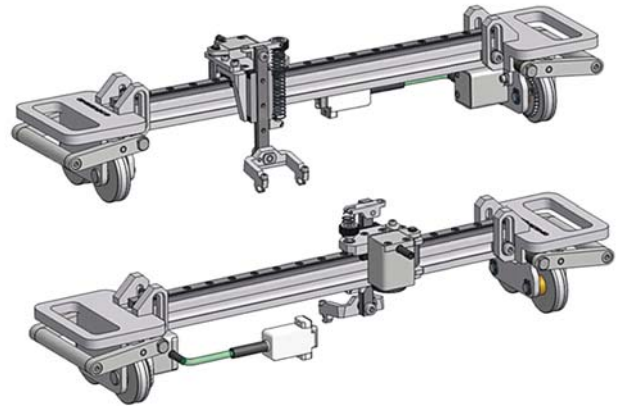


Рис. 3. Сканер для выполнения толщинометрии основного металла

Выбор оптимальных параметров схемы контроля был сделан исходя из результатов расчетов в программной среде CIVA 10.1 с применением ультразвукового модуля. Пример расчета модели показан на рис. 4. При выбранной схеме контроля для измерения толщины используются два эхо-сигнала: отраженный от внутренней поверхности трубопровода (начальный) и первый донный. По результатам моделирования были сформулированы следующие выводы:

- оптимальным является использование 32-х элементной решетки с шагом 1 мм;
- при фокусировке на номинальную толщину ОК достигается минимальная погрешность измерения, которая не изменяется при уменьшении толщины до 50% от номинальной с сохранением фокусировки на номинальную толщину.

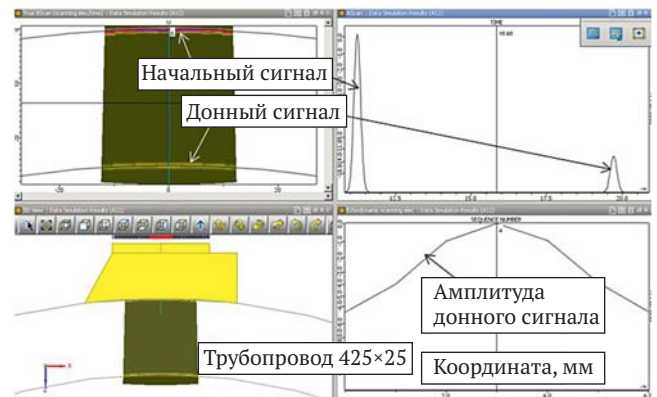


Рис. 4. Пример расчета модели в среде CIVA. Объект контроля — трубопровод $425 \times 25\text{ мм}$, задержка (призма) высотой 15 мм

При выборе толщины h призмы, представляющей линию задержки, необходимо найти компро-

мисс между минимально возможным значением толщины h , при котором первый донный сигнал от ОК отчетливо выявляется на фоне переотраженных в призме сигналов, и эффектом увеличения погрешности измерения и уменьшения амплитуды донного сигнала из-за отклонения угла падения на границу раздела от нормального. Было принято решение использовать минимально возможную величину толщины h , которая определяется номинальной толщиной ОК и длиной импульса первого донного сигнала.

Кроме того, необходимо учитывать, что при выполнении толщинометрии на конусном переходе вносится дополнительная погрешность вследствие изменения диаметра с большего на меньший (покачивание призмы на ОК), а также уменьшается ширина полосы измерений.

Для программного обеспечения (ПО) АВГУР «Анализ данных» был разработан плагин для работы с данными толщинометрии, включающий в себя следующие функции и возможности:

- построение карты толщины по данным толщинометрии;
- просмотр карты толщины по координатам X-Y и по срезу X/Y;
- значение толщины в каждой точке с формированием таблицы значений;
- возможность изменения сетки с соответствующим изменением количества столбцов/строк таблицы со значением толщины;
- поиск минимального значения толщины с фиксацией координат;
- возможность выдачи заключения;
- возможность применения фильтрации (медианная, сглаживающая);
- возможность объединения двух или нескольких файлов данных в один и просмотр общей карты толщины;
- представление карты толщины не зависит от метода сбора данных толщинометрии.

Пример обработки данных толщинометрии изготовленного для Ленинградской АЭС образца

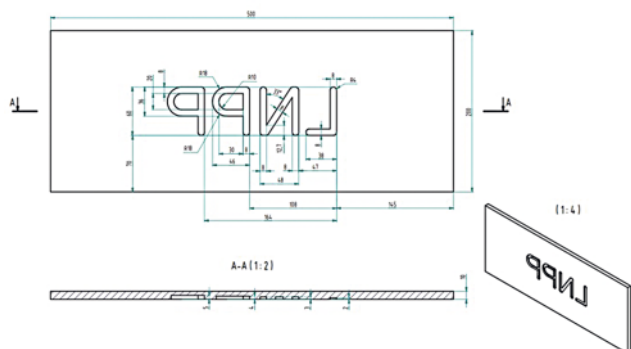


Рис. 5. Образец LNPP. Чертёж

LNPP (рис. 5) представлен на рис. 6. Буквы L, N, P и P выполнены толщинами 2, 3, 4 и 5 мм соответственно. Остаточная толщина металла над буквами равна 8, 7, 6 и 5 мм соответственно.

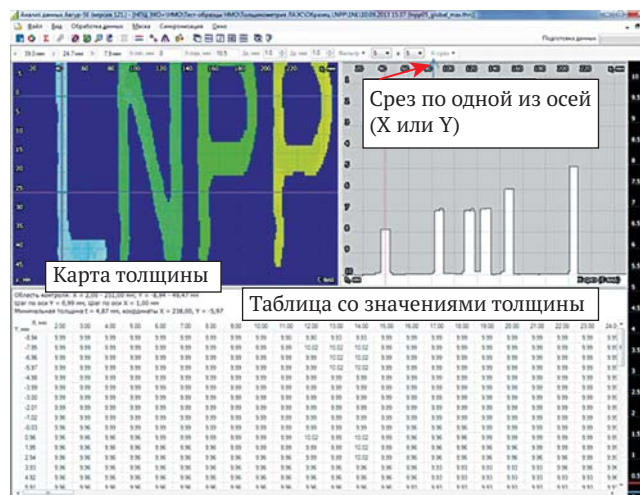


Рис. 6. Интерфейс ПО АВГУР «Анализ данных» для анализа карты толщины

Построение профиля донной поверхности сварных соединений трубопроводов с применением AP по схеме TOFD

ОК являются сварные соединения трубопроводов с наружными диаметрами $\varnothing 159-426$ мм. Диапазон контролируемых толщин стенок трубопроводов составляет от 2 мм до 60 мм.

Измерения проводятся с использованием технологий ультразвуковых фазированных AP ультразвуковым методом времяпролетной дифракции (TOFD) с контактным способом ввода ультразвука с наружной поверхности трубопровода с использованием полуавтоматизированных сканирующих устройств.

При контроле применяются преобразователи с AP и сменными призмами для наклонного ввода продольной волны и обеспечения при подключении к дефектоскопу режима электронного сканирования (рис. 7). Одновременно проводятся измерения толщины в околошовной зоне с применением тех же AP, работающих в режиме электронного сканирования с углом ввода 0° , по времени прихода донного сигнала (рис. 8). Таким образом, обеспечивается широкая полоса измерения толщины.

Формула вычисления толщины h при измерении по методу TOFD, согласно стандарту ASTM E 2373-09 [3] имеет вид:

$$h = [(C/2)^2 (t - t_0)^2 - (PCS/2)^2]^{1/2}, \quad (1)$$

где t — время пролета для донного сигнала, мкс; t_0 — калибровочный параметр, мкс; PCS — расстояние

яние между точками ввода, мм; C — скорость звука продольной ультразвуковой волны в ОК, мм/мкс.

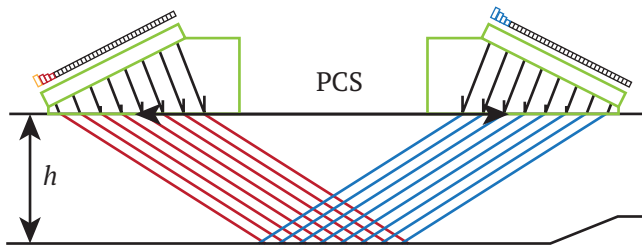


Рис. 7. Принцип измерения толщины по схеме TOFD с AP и электронным сканированием

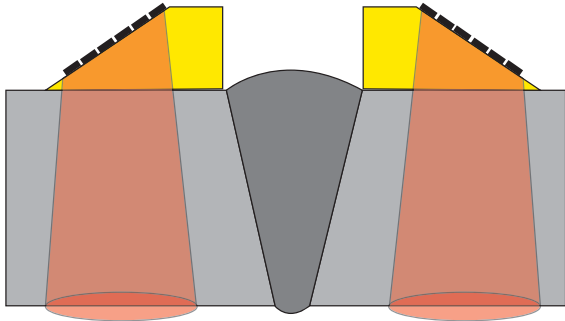


Рис. 8. Принцип измерения толщины в околошовной зоне

Калибровочный параметр t_0 предварительно определяется по настроечному образцу и вычисляется по формуле $t_0 = t_{н0} - 2 \left[(PCS/2)^2 + H^2 \right]^{1/2} / C$, где $t_{н0}$ — время пролета для донного сигнала настроечного образца, мкс; H — толщина настроечного образца, мм.

Для перемещения AP используется однокоординатное сканирующее устройство с набором треков под диаметры 159, 219, 273, 325, 377 и 426 мм, разработанные ООО «НПЦ «ЭХО+» (рис. 9).

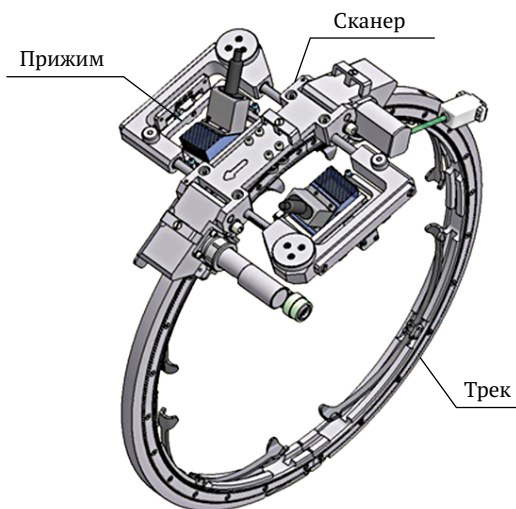


Рис. 9. Сканер СК-ТД.160–426. ДП-1 с треком Ø 325 мм

Обоснование параметров схемы измерения толщины проводилось в программной среде CIVA 10.1 с применением ультразвукового модуля.

Для проведения толщинометрии сварных соединений трубопроводов с толщиной стенки до 25 мм целесообразно применять AP с частотой 5 МГц, с 32-мя элементами с шагом 0,8–1 мм. Такие решетки обеспечивают оптимальное соотношение ширины контролируемой зоны и габаритов призмы, в том числе контактной площадки. Для эффективного ввода ультразвука под большими углами следует использовать угол наклона призмы, обеспечивающий угол ввода продольной волны около 70° . Стрела преобразователя при этом должна быть минимизирована.

Выбраны четыре активных элемента, что обеспечивает размер пьезоэлемента в соответствии со стандартом ASTM E 2373.

Для того чтобы на фоне донного сигнала выявлять локальные утонения, необходимо установить конкретное положение строба, в котором измеряется время пролета сигнала. Если по амплитуде строб установить на низком уровне, то это приведет:

- к возможному попаданию помехи в строб и к возникновению ошибки при измерении толщины;
- к завышению протяженности утонения за счет широкой диаграммы направленности при измерениях по методу TOFD.

Следовательно, установка строба на низкий уровень по амплитуде приведет к занижению чувствительности к выявлению локальных утонений, а также к увеличению погрешности измерения ширины локальных утонений. В то же время чем ниже уровень строба, тем шире полоса измерения толщины.

Для проверки минимально реализуемой чувствительности и подбора параметров строба смоделирован объект толщиной 25 мм с плоскодонными отражателями на глубине 20 мм диаметрами 1, 3 и 6 мм. Расстояние между передними гранями по-прежнему 40 мм.

Отражающая способность плоскодонного отражателя Ø 3 мм на 23 дБ меньше, чем амплитуда донного сигнала (рис. 10). Отражение от плоскодонного отражателя Ø 6 мм на 10–14 дБ меньше,

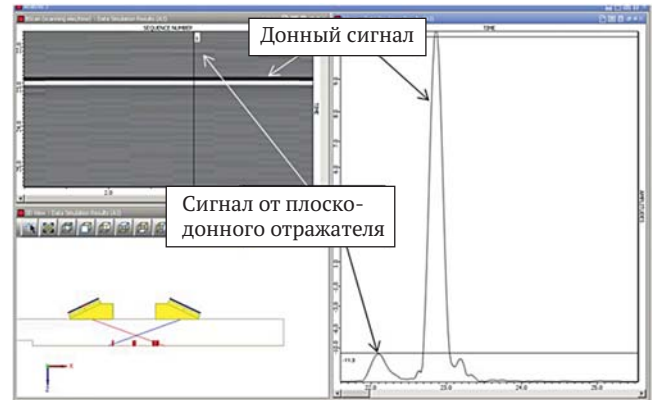


Рис. 10. Отражение от плоскодонного отражателя Ø 3 мм

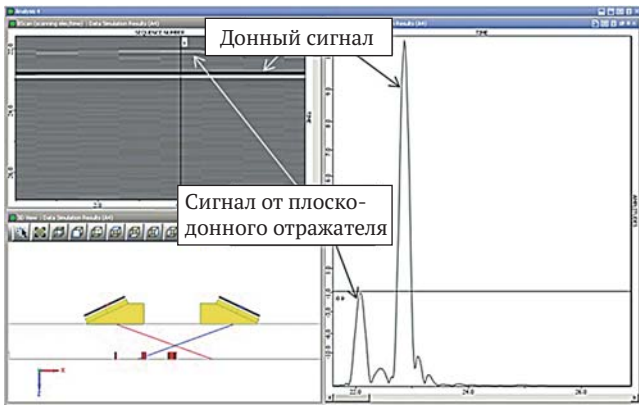


Рис. 11. Отражение от плоскодонного отражателя Ø6 мм

чем донный сигнал, толщина в этой точке измеряется как 20,8 мм (рис. 11).

Таким образом, если установить уровень строба на 10 дБ ниже максимума донного сигнала, то фиксироваться будет локальное утонение, эквивалентное Ø6 мм, причем его протяженность будет фактически точечной.

Моделирование двух плоскодонных отражателей Ø6 мм, один на глубине 10 мм, другой — на глубине 20 мм при несимметричном расположении АР показало, что оптимальным положением строба признано такое положение, при котором фиксируется сигнал от вертикального плоскодонного отверстия диаметром 6 мм. Однако, поскольку амплитуда эхо-сигнала от отражателя будет зависеть от его положения относительно центра симметрии, положение строба необходимо уточнить.

Были проведены расчеты для обоснования ширины зоны захвата, в которой надежно выявляется утонение. Моделировался объект толщиной 25 мм, плоскодонный отражатель Ø 6 мм на глубине 20 мм. В дополнение к электронному сканированию выполнялось механическое сканирование, когда плоскодонный отражатель располагался в диапазоне координат от 0 мм (между передними гранями) до 50 мм. Зависимость ширины зоны захвата от уровня установки строба:

- если строб устанавливается на уровне -12 дБ, то ширина зоны захвата составляет 30 мм;
- если строб устанавливается на уровне -20 дБ, то ширина зоны захвата составляет 50 мм.

Проверка также была выполнена на ступеньке глубиной 20 мм. Для такого большого отражателя ширина зоны захвата также составляет:

- при уровне строба -12 дБ — 30 мм;
- при уровне строба -20 дБ — 50 мм.

Оптимальным признано положение строба на уровне -20 дБ относительно донного сигнала, если шумы не достигают данного уровня. В противном случае уровень необходимо изменить до 12–15 дБ.

Было исследовано влияние глубины пересечения лучей. Предположительно погрешность измерения толщины при утонении уменьшится, если лучи будут пересекаться не на донной поверхности, а выше. При угле 70° пересечение на глубине 15 мм (рис. 12), а при угле 60° пересечение на дне.

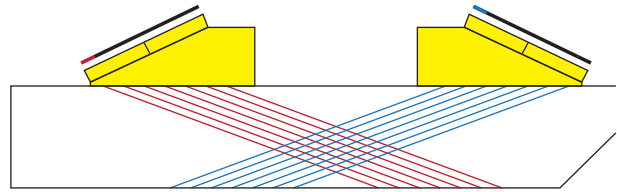


Рис. 12. Толщина 25 мм, пересечение лучей на глубине 15 мм

На рис. 13 показан расчет поля для 4 элементов, угол ввода 60° и 70°. Отличие не существенно. Ширина поля на глубине 25 мм по уровню -3 дБ составляет соответственно 27 и 32 мм.

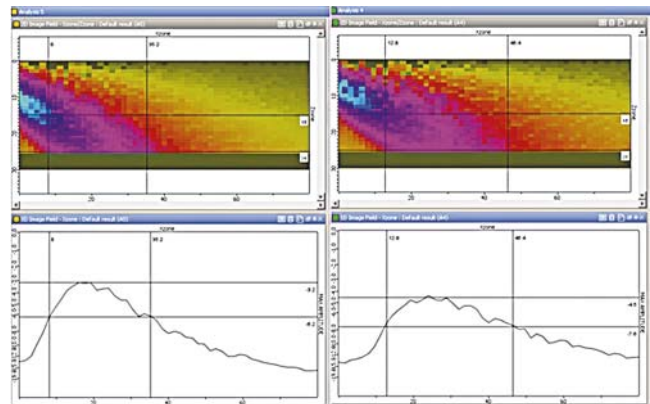


Рис. 13. Расчет поля излучения при использовании 4 элементов (слева угол 60°, справа - 70°)

Результаты моделирования показали, что угол ввода не влияет на погрешность измерения, поэтому вопрос с точкой пересечения лучей в данном случае не столь принципиален. Выбор должен делаться также с учетом возникновения и влияния головной волны.

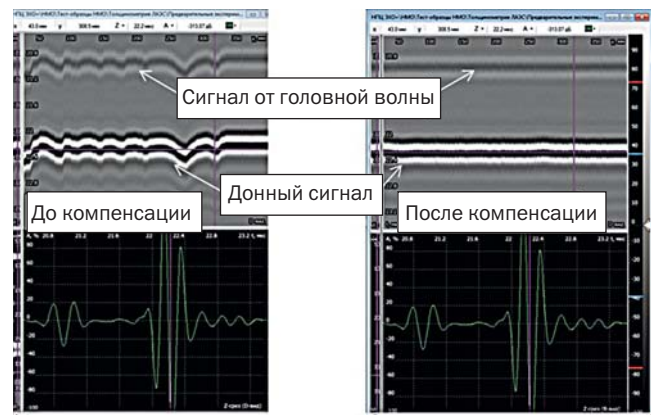


Рис. 14. Компенсация времени пробега головной волны для данных толщинометрии. Применяется до построения карты толщины

Сигналы головной волны, с одной стороны, увеличивают мертвую зону, пересекаясь с донным сигналом при уменьшении толщины ниже определенного предела. Однако результаты экспериментов показали, что время прихода головной волны всегда меньше, чем время, при котором формула (1), по которой вычисляется толщина, перестает действовать и показывает 0 мм. Таким образом, как таковое влияние головной волны на результаты измерения толщины не существенно. С другой стороны, по времени прихода сигнала головной волны может выполняться компенсация изменения расстояния между передними гранями призм и изменение толщины слоя контактной жидкости. ПО «Анализ данных» поддерживает данную функцию (рис. 14).

Измерения на испытательных образцах

Для приемо-сдаточных испытаний ЛАЭС был изготовлен образец $\varnothing 325$ мм с выборками, ориентированными в продольном и поперечном направлении, глубинами от 3 до 9 мм (рис. 15).

Пример карты толщины при толщинометрии основного металла участка трубопровода представлен на рис. 16. Погрешность измерения составила не более 0,2 мм.

Пример карты толщины при толщинометрии участка трубопровода по схеме TOFD приведен на рис. 17. Погрешность измерения составила не более 1,0 мм.

Заключение

Разработанные методы толщинометрии позволяют своевременно обнаружить локальные области коррозии и эрозии, пропущенные при применении методов выборочной толщинометрии, а также для определения точных пространственных параметров локальных областей измерения толщины.

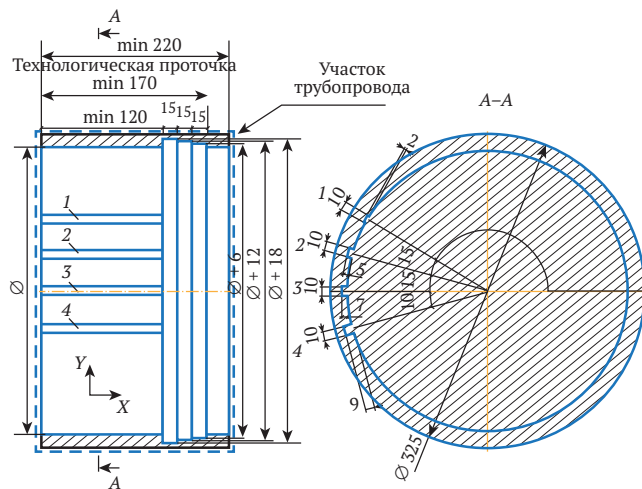


Рис. 15. Испытательный образец для приемо-сдаточных испытаний на ЛАЭС

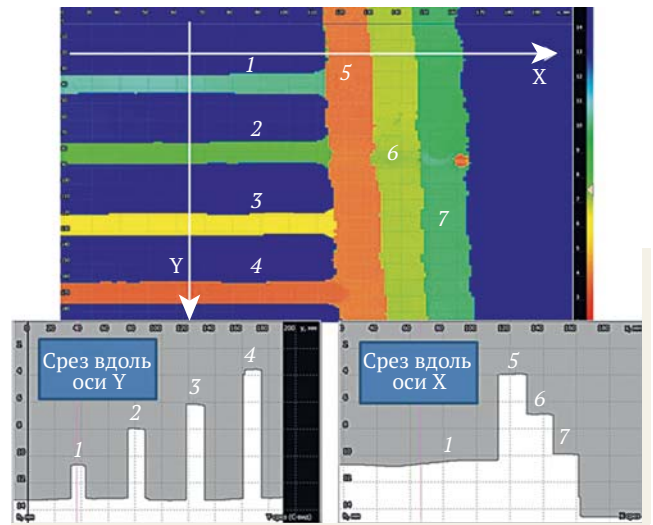


Рис. 16. Пример карты толщины при толщинометрии основного металла

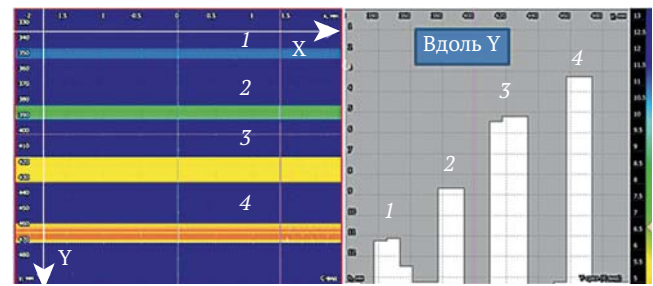


Рис. 17. Пример карты толщины при толщинометрии СС по схеме TOFD

Одним из перспективных направлений развития методов толщинометрии является внедрение метода цифровой фокусировки антенны [4] для контроля профиля донной поверхности, в том числе конусных проточек и зоны под валиком сварного шва.

Применяют две АР: одну в качестве излучателя (каждым элементом АР независимо и последовательно) эхо-импульсов, а другую в качестве приёмника (всеми элементами одновременно), как показано на рис. 18. В описываемом способе используют 5 акустических схем:

Волна излучения	Волна приема, отраженная от дна ОК	Схема приема
поперечная	поперечная	раздельная
поперечная	продольная	раздельная
продольная	поперечная	раздельная
продольная	продольная	совмещенная (с N стороны)
продольная	продольная	совмещенная (с P стороны)

Получив ультразвуковые импульсы при использовании всех пяти схем и восстановив пять изобра-

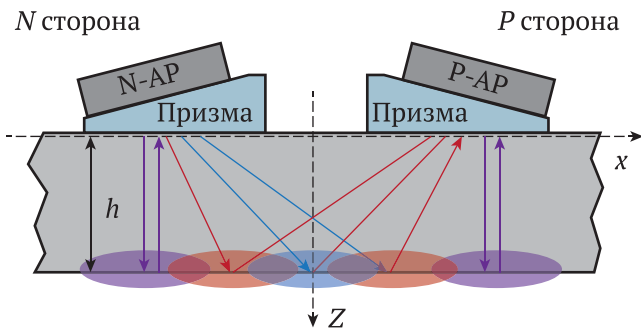


Рис. 18. Применение ЦФА для толщинометрии по схеме TOFD. Фиолетовый цвет — продольные волны по совмещенной схеме, красный цвет — продольные волны по раздельной схеме, фиолетовый цвет — поперечные волны по раздельной схеме

жений, при сложении всех восстановленных изображений получим результирующее изображение профиля донной поверхности.

Пример применения способа на ОК толщиной 18мм с неровным дном приведён на рис. 19. Результирующее изображение профиля дна приведено на рис. 20. Результат применения алгоритма поиска дна по критерию превышения амплитуды изображения заданного порога представлен на рис. 21. Среднеквадратическое отклонение (СКО) измеренного профиля донной поверхности от фактического составило 0,18мм. Если исключить выброс, связанный с наличием резкого перехода (ступеньки), то СКО равно 0,04 мм.

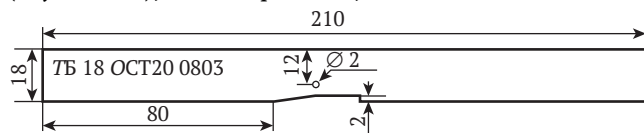


Рис. 19. ОК с неровной донной поверхностью

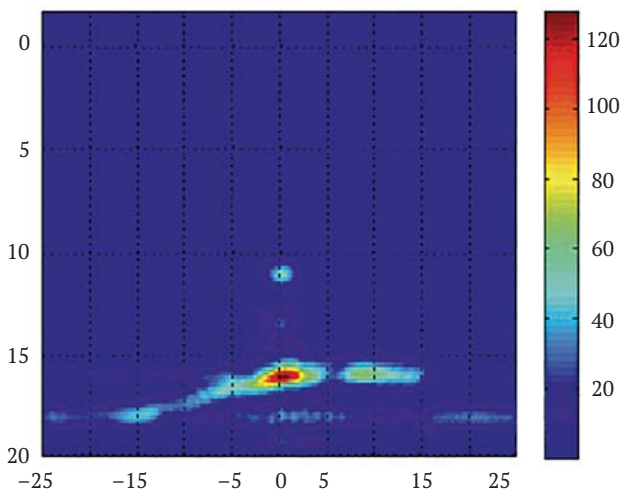


Рис. 20. Изображение профиля дна

Таким образом, предлагаемый способ может найти широкое применение в ультразвуковой дефектоскопии различных металлоконструкций

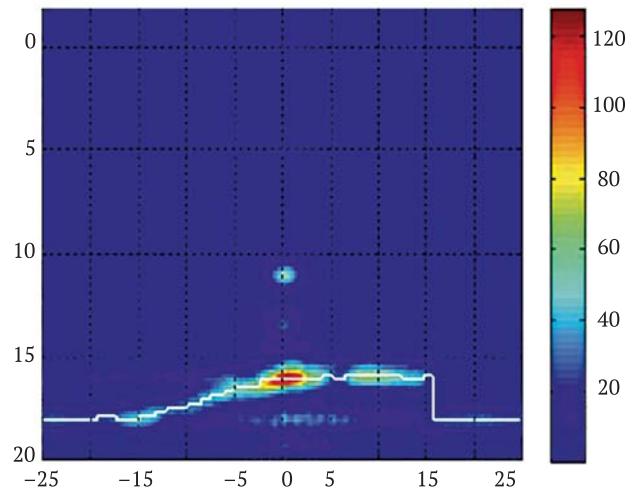


Рис. 21. Изображение профиля дна с примененным алгоритмом поиска дна

с неровными поверхностями и одностороннем доступе. Например, для контроля профиля донной поверхности сварных соединений трубопроводов с наличием валика усиления. Способ позволяет обнаруживать вмятины, выемки, коррозию, утонения, провисания, утяжины, смещение кромок и др. с высокой достоверностью и точностью измерения их геометрических параметров.

Литература

1. Secondary Piping Rupture Accident at Mihama Power Station, Unit 3, of the Kansai Electric Power Co., Inc. (Final Report). — The Nuclear and Industrial Safety Agency. 2005, March 30.
2. ПНАЭГ-7-031-91. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов. Ультразвуковой контроль. Часть III. Измерение толщины монометаллов, биметаллов и антикоррозионных покрытий.
3. ASTM E 2373. Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique.
4. Базулин Е. Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решётки или фазированные антенные решётки. — Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51–75.

Статья опубликована в журнале
«В мире НК» № 4, 2014

Сравнение изображений, восстановленных ФАР- и ЦФА-дефектоскопами

Comparison of the images reconstructed by Phased Array- and DFA -defectoscope

В статье описаны технологии ультразвуковой толщинометрии трубопроводов с применением фазированных антенных решёток и измерения профиля донной поверхности трубопроводов с применением фазированных антенных решёток, работающих по схеме TOFD (time-of-flight diffraction). Приведены результаты измерения с применением этих технологий. Также описаны перспективы развития методов с использованием технологии цифровой фокусировки антенны.

The problems of sampling ultrasonic thickness measurement are considered in this article. The application of methodologies and technologies using phased arrays are considered.

The principles of application of continuous thickness measurement of pipeline main metal and also measurement of pipeline welded joints bottom surface profile using antenna arrays technology and TOFD (time-of-flight diffraction) scheme are described. The simulations of the inspection scheme basic parameters of the technologies is carried out by the method of ray tubes with application the verified software CIVA.

Examples of application and technologies measurement results on test blocks are given in the article. The development perspectives of methods using digital antenna focusing for visualization and measurement of bottom surface profile are described

1. Введение

Совершенствование технологий изготовления ультразвуковых антенных решёток (матриц) и многоканальных систем для излучения и приёма ультразвука привело к тому, что в начале XXI века в практике ультразвукового контроля (УЗК) стали использоваться дефектоскопы, использующие технологию фазированных антенных решёток (ФАР-дефектоскопы). Являясь коммерческим продуктом, ФАР-дефектоскопы активно рекламируются. При этом, естественно, делается акцент только на их положительных свойствах. Такую ситуацию Гурвич А.К. охарактеризовал следующим образом [1]: «Дефектоскопы с ПЭП на фазированной антенной решётке завораживают обывателей и даже некоторых специалистов своим непрерывно качающимся лучом в сопровождении причитаний экспонентов «шаманов». В данной статье сделана попытка проанализировать сильные и слабые стороны ФАР-дефектоскопов и сравнить их с альтернативными системами получения изображений несплошностей, также использующих антенные решётки (АР) или матрицы (АМ), но формирующие изображения без аппаратной фокусировки.

Под ФАР-дефектоскопом [2] подразумевается АР (АМ), работающая с многоканальной аппаратурой излучения и приёма ультразвуковых импуль-

сов (рис. 1, слева). Регулировка задержек при излучении и приёме позволяет фокусировать ультразвуковые волны в заданной точке объекта контроля. **Многоканальность аппаратуры излучения и приёма является принципиальным требованием работы ФАР-дефектоскопа.** Специалист, проводящий контроль, делает заключение о размерах и типе обнаруженного отражателя не по одному эхосигналу, как в традиционной дефектоскопии, а по двумерному растровому изображению S-типа, которое значительно информативнее, чем обычный эхосигнал. Основными требованиями, которые предъявляют к ФАР-дефектоскопу для ручного контроля, это их малые размеры, вес и возможность сразу на месте контроля сделать предварительный вывод о наличии отражателя, его типе и размере. В настоящее время создан ряд ручных ФАР-дефектоскопов [3, 4, 5, 6, 7, 8].

Альтернативный способ восстановления изображения отражателей при использовании АР (АМ) состоит из двух этапов. На первом этапе регистрируются эхосигналы, излученные и принятые всеми парами элементов. Такой режим регистрации в статье [9] назван режимом двойного сканирования, а в статье [10] — Full Matrix Capture (FMC). Изображение отражателей по измеренным эхосигналам на втором этапе восстанавливаются методом

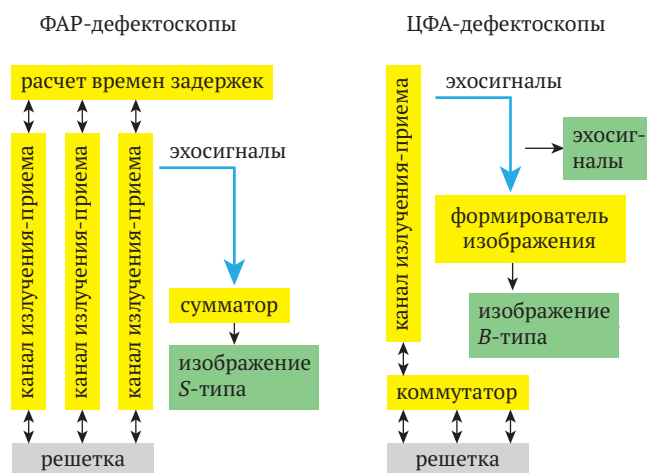


Рис. 1. Структурные схемы ФАР- и ЦФА-дефектоскопа

комбинированного SAFT (C-SAFT) [11, 12], который легко модифицируется для учёта многолучевого распространения ультразвука в объекте контроля с неровными границами. В зарубежной литературе алгоритм C-SAFT называется Total Focusing Method (TFM) [13]. Авторы статьи [14] регистрацию эхосигналов в режиме двойного сканирования и получение изображения методом C-SAFT предлагают называть цифровой фокусировкой антенной решётки (ЦФА), поэтому дефектоскоп, работающий в режиме ЦФА, далее будем называть ЦФА-дефектоскопом, а изображение полученное таким дефектоскопом — ЦФА-изображением.

ЦФА-дефектоскопы представлены на рынке не так широко, как ФАР-дефектоскопы [15, 16]. Причина этого в том, что развитие электронной элементной базы позволило хронологически раньше получить достаточно высокую скорость формирования изображений для аппаратуры, работающей по ФАР-технологии. Сейчас скорость восстановления изображений ЦФА-дефектоскопами соизмерима с частотой обновления экрана ФАР-дефектоскопа. ЦФА-дефектоскопы обладают рядом важных архитектурных особенностей (рис. 1, справа). **Для регистрации эхосигналов не обязательно использовать многоканальную аппаратуру, в предельном случае, это может быть один канал излучения-приёма с электронным коммутатором.** Такой подход существенно упрощает аппаратную часть прибора и уменьшает энергопотребление. Кроме того ЦФА-дефектоскопы позволяют использовать для постобработки исходные эхосигналы, что существенно расширяет возможности применения различных алгоритмов для восстановления изображения и обработки эхосигналов. Обращает на себя внимание дефектоскоп «Gekko» [17], который обладает важной архитектурной особенностью, позволяющей получать изо-

бражения, как в режиме ФАР- так и ЦФА-дефектоскопа.

Сравнению возможностей ФАР- и ЦФА-дефектоскопов посвящены статьи [14, 18]. В данной статье анализируются особенности алгоритмов формирования изображения отражателей.

2. Разрешающая способность и вид функции рассеивания точки

Важной характеристикой любой системы визуализации изображения отражателей является её разрешающая способность и вид функции рассеивания точки (ФРТ). Обычно рассматривают разрешающую способность по лучу $\Delta_{\text{луч}}$ (лучевая разрешающая способность) и разрешающую способность в перпендикулярном к лучу направлении $\Delta_{\text{фронт}}$ (фронтальная разрешающая способность). Качество изображения тем выше чем симметричнее вид ФРТ, чем больше отношение сигнал/шум и чем выше разрешающая способность $\Delta_{\text{луч}}$ и $\Delta_{\text{фронт}}$. Идеальная система визуализации должна формировать изображение точечного отражателя в виде δ -функции.

Лучевая разрешающая способность $\Delta_{\text{луч}} \approx \Delta_{\text{луч}}(x, z)$ для ФАР- и ЦФА-дефектоскопов определяется в основном длиной излучённого импульса и слабо зависит от точки (x, z) принадлежащей области восстановления изображения (ОВИ). Фронтальная разрешающая способность $\Delta_{\text{фронт}}(x, z)$ определяется двумя факторами. Во-первых, угловыми размерами апертуры АР для точки (x, z) ОВИ, и, во-вторых, применяемым алгоритмом восстановления изображения. Фронтальное разрешение ЦФА-дефектоскопа определяется только первым фактором, а для изображения полученного ФАР-дефектоскопом добавляется ещё влияние второго фактора. Если закон фокусировки ФАР-дефектоскопа рассчитан, например, на глубину 30 мм, а отражатель расположен на иной глубине, то эхосигналы по всем элементам антенной решётки будут складываться не в фазе и оптимальная фокусировка не будет достигнута. И это рассогласование будет тем больше, чем больше размеры АР. Поэтому при удалении от линии фокусировки фронтальное разрешение ФАР-изображения, будет ухудшаться сильнее, чем для ЦФА-дефектоскопа. И чем больше размеры АР, тем сильнее будет проявляться этот недостаток ФАР-дефектоскопов. Для его устранения многие ФАР-дефектоскопы могут работать в режиме динамической фокусировки [2], когда излучение происходит при фокусировке по одному закону, а принятые эхосигналы обрабатываются несколько раз с использованием законов фокусировки для нескольких глубин. Однако такой режим

замедляет скорость формирования изображения отражателей и не позволяет достичь предельной фокусировки, так как при излучении поле всё равно фокусируется на одну глубину.

Для иллюстрации изложенных выше рассуждений рассмотрим вариант восстановления изображения ФАР- и ЦФА-дефектоскопами 18 отверстий бокового сверления диаметром 2,0 мм, расположенных на четверти окружности радиуса 50 мм (рис. 2), в стальном образце.

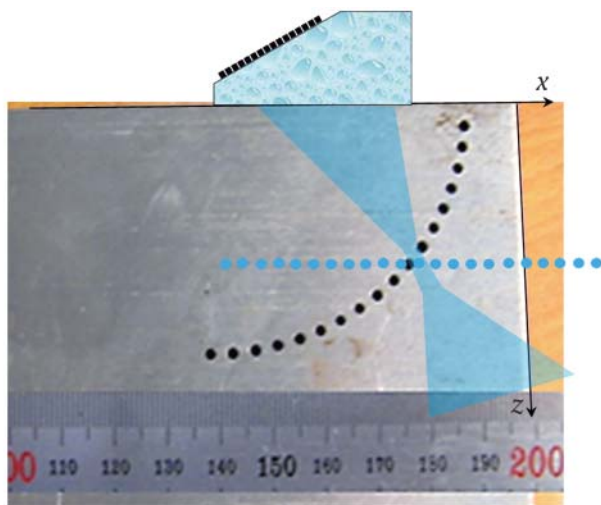


Рис. 2. Тест фронтального разрешения. Многоугольником синего цвета схематически показано поле антенной решётки при фокусировке в одну точку

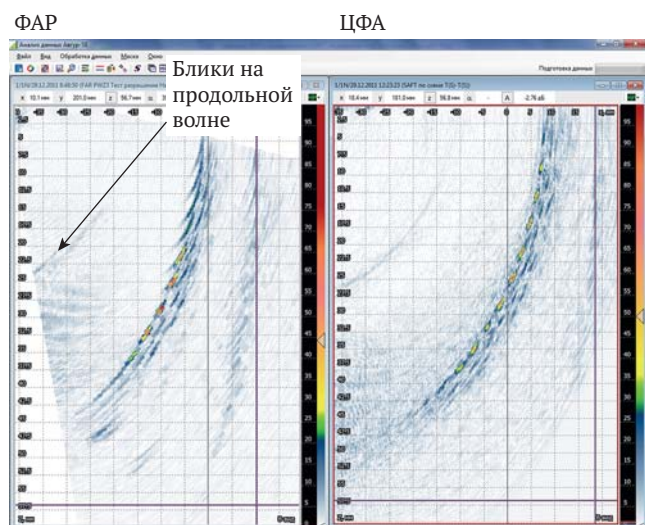


Рис. 3. Изображение теста фронтального разрешения, полученное в режиме ФАР-дефектоскопа (слева) и восстановленное в режиме ЦФА-дефектоскопа (справа)

На рис. 3 представлено изображения теста фронтального разрешения, полученное в режиме ФАР-дефектоскопа (слева) и восстановленное в режиме ЦФА-дефектоскопа (справа). Видно, что при удалении от линии фокусировки (глубина 30 мм) фронтальное разрешение $\Delta_{\text{фронт}}(x, z)$ изображения полученного в режиме ФАР-дефектоскопа на глу-

бине 10 мм становится равным примерно 5 мм, а в режиме ЦФА-дефектоскопа примерно 1,5 мм. Кроме того, амплитуда бликов на изображениях, полученных в режиме ЦФА-дефектоскопа при удалении от глубины 30 мм уменьшается не так заметно, как на ФАР-изображении. На глубине фокусировки качество изображений, полученных по обеим технологиям, практически одинаково.

На рис. 4 представлен увеличенный фрагмент изображения теста фронтального разрешения с рис. 3, полученные в режиме ФАР-дефектоскопа (слева) и в режиме ЦФА-дефектоскопа (справа). Хорошо видно, что фронтальное разрешение $\Delta_{\text{фронт}}(x, z)$ изображения полученного в режиме ЦФА-дефектоскопа лучше. Амплитуда бликов возникших из-за перерассеивания на отверстиях на изображении, полученном в режиме ЦФА-дефектоскопа более чем на 6 дБ выше, чем на изображении, полученном в режиме ФАР-дефектоскопа. На ЦФА-изображении блик самого близкого к поверхности отверстия находится в нужных координатах, в то время как на ФАР-изображении блик этого отверстия сместился на 1 мм в глубину.

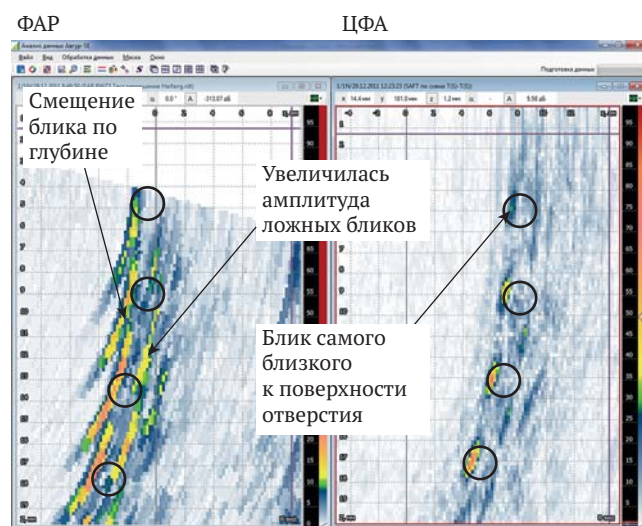


Рис. 4. Увеличенный фрагмент изображения теста фронтального разрешения с рис. 3, полученный в режиме ФАР-дефектоскопа (слева) и восстановленный в режиме ЦФА-дефектоскопа (справа)

Таким образом, ЦФА-дефектоскопы позволяют получать изображения с более высокой фронтальной разрешающей способностью в сравнении с ФАР-изображениями для области восстановления изображения (ОВИ) больших размеров.

3. Получение изображения дна образца двумя антенными решётками

В практике УЗК часто возникает необходимость провести контроль сварных соединений с валиком усиления. В случае двухстороннего доступа можно

использовать две антенные решётки, одна из которых при излучении фокусирует волны в точки, в которые фокусируется приёмная антенная решетка, расположенная с другой стороны шва, так как это показано на рис. 5. Точки фокусировки отмечены на рисунке множеством кругов синего цвета. Многие ФАР-дефектоскопы позволяют подключать, как правило, с коммутатором, две 32-ух элементные антенные решётки и проводить необходимую настройку законов фокусировки на излучение и на приём без учёта смены типа волны при отражении. Однако изображения формируются не в виде изображения S -типов, а просто в виде матрицы. Это позволяет уверенно получать изображения отражателей, но в отличие от изображений S -типа сформированных при излучении и приёме одной АР, полученная матрица не позволяет простым образом определить размеры и местоположение отражателя.

ЦФА-дефектоскопы позволяют восстановить изображение отражателей методом С-SAFT в виде матрицы (изображения В-типа) для двух АР. Причём по один раз измеренным эхосигналам можно получить несколько изображений дна в достаточно широком диапазоне вдоль оси x . На рис. 5 схематически показаны три акустические схемы $T(S) - T(L)$, $T(S) - T(S)$ и $T(L) - T(S)$ с эффектом трансформации типа волны при отражении от дна. Линиями зелёного цвета показаны пути распространения продольных волн, а красным пути распространения поперечных волн.

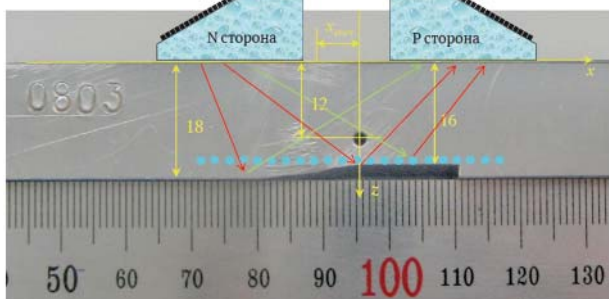


Рис. 5. Фотография образца со сквозным отверстием бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 12 мм

На рис. 5 приведена фотография образца с неровным дном и с отверстием бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 12 мм. На рис. 6 показаны изображения, полученные по один раз измеренным эхосигналам и восстановленные методом С-SAFT по трём акустическим схемам $T(S) - T(L)$, $T(S) - T(S)$ и $T(L) - T(S)$. Каждая из этих схем позволяет получить изображение своего участка дна. На изображение линиями чёрного цвета наброшена маска образца и отверстия. Хорошо видно, что форма поверхности восстановлена в диапазоне от -25 до 25 мм, то есть в интервале 50 мм.

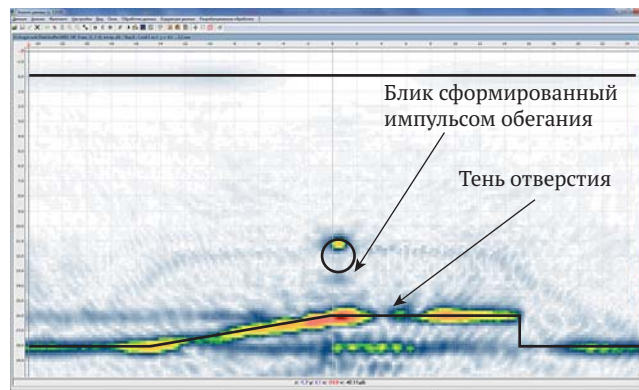


Рис. 6. Изображения дна образца и отверстия бокового сверления, восстановленные по акустическим схемам $T(S) - T(L)$, $T(S) - T(S)$ и $T(L) - T(S)$.

ЦФА-дефектоскопы позволяют получать изображение дна объекта контроля в декартовой системе координат при использовании двух АР с учётом эффекта трансформации типа волны.

4. Когерентное объединение парциальных изображений

В практике УЗК используют сканирующие устройства для перемещения антенных решёток по поверхности объекта контроля для получения множества изображений при разных расстояниях от отражателя до призмы. Автору неизвестны способы когерентного объединения парциальных изображений, реализованные в стандартном программном обеспечении ФАР-дефектоскопов. Кроме того, их эффективное сложение возможно только в окрестности линии фокусировки ФАР-дефектоскопа, где блики максимально сфокусированы и фазовые соотношения ещё не нарушены.

ЦФА-дефектоскопы формируют парциальные изображения с предельной фокусировкой и с сохранением фазовых соотношений во всей ОВИ. Поэтому когерентное сложение парциальных изображений восстановленных методом С-SAFT (ЦФА-Х) позволяет получить изображение высокого качества. При этом фронтальное разрешение $\Delta_{\text{фронт}}(x, z) \approx \Delta_{\text{фронт}}$ возрастает в несколько раз и практически перестаёт зависеть от координат (x, z) , а отношение сигнал/шум возрастает, особенно, если аддитивный шум белый. Такой подход позволяет объединить преимущества систем ультразвукового контроля с механическим и электронным сканированием. На рис. 7 представлены изображения, полученные на прямом луче на поперечной волне (акустическая схема $T(S) - T(S)$). На левой панели показано парциальное изображение в одном слое, а на правой — их когерентная сумма. Хорошо видны расфокусированные блики на продольной волне и блики сформированные импульсами при

перерасеивании между соседними отверстиями. Амплитуда этих ложных бликов может достигать до 75% от бликов самих отверстий. Фронтальное разрешение суммарного изображения равное примерно 1 мм позволяет уверенно разрешить все 18 отверстий бокового сверления. Малая амплитуда самых глубоких бликов объясняется тем, что на поперечной волне диаграмма направленности даже для элемента шириной 0,6 мм не достаточно широка, и нужно было увеличить область сканирования АР.

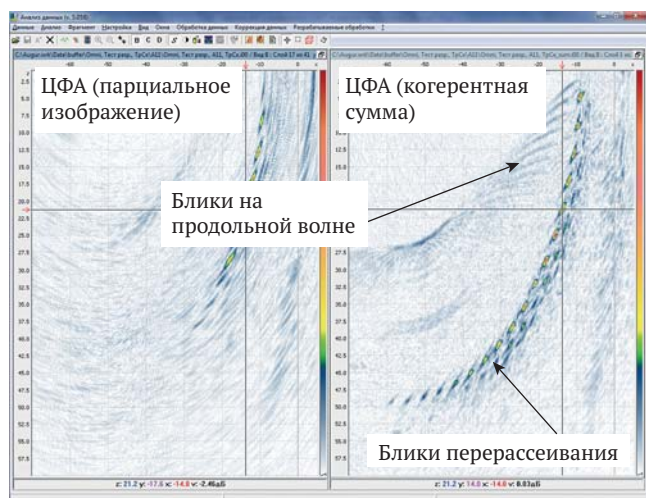


Рис. 7. Изображения теста фронтального разрешения по акустической схеме T(S)–T(S). Слева одно парциальное изображение, а справа когерентная сумма всех парциальных изображений

ЦФА-дефектоскопы позволяют когерентно складывать парциальные изображения, восстановленные для нескольких положений АР. Это приводит к повышению в несколько раз отношения сигнал/шум суммарного изображения и повышению фронтальной разрешающей способности.

5. Получение изображений в режиме 3D при произвольной ориентации антенной решётки

В процессе контроля необходимо обнаружить дефекты разной ориентации. В простейшем случае — это продольно и поперечно ориентированные дефекты. Поэтому методика может содержать требование применять антенные решетки, расположенные на призме произвольным углом поворота β_z . Сама призма может иметь заданный угол наклона β_y и угол скоса β_x и расположена на объекте контроля под определённым углом разворота β_w относительно системы координат x, y, z . На рис. 8 схематически показан объект контроля с продольным и поперечным дефектами и три антенные решетки АР-1, АР-2 и АР-3, произвольно размещённые на призмах разной ориентацией. Для АР-1 угол поворота β_z равен 0 градусов, а для АР-2 — 90 градусов.

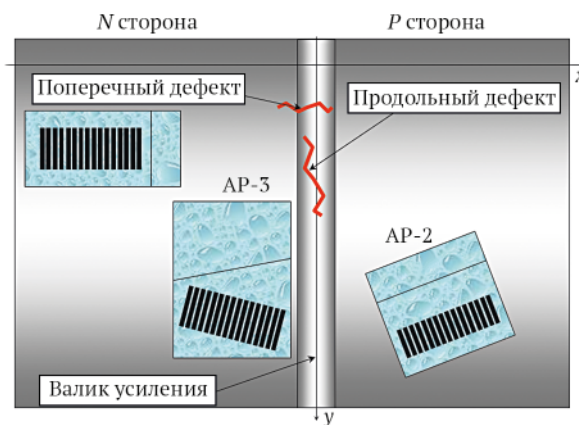


Рис. 8. Дефекты произвольной ориентации показаны линиями красного цвета. Призмы и антенные решётки показаны для трёх разных вариантов размещения

В программном обеспечении ФАР-дефектоскопов, как правило, предусмотрена возможность задавать все углы ориентации β антенной решётки. Однако, попытка совместно проанализировать изображения S-типа полученные ФАР-дефектоскопом с разными антенными решётками вызывает затруднения, так как между ними достаточно сложно установить пространственную связь без специального программного обеспечения.

ЦФА-дефектоскопы восстанавливают изображения на одной пространственной сетке для любых АР, что позволяет анализировать несколько изображений в режиме синхронного просмотра. В статье [18] приведены примеры ЦФА-изображений, демонстрирующие такую возможность.

6. Использование разных акустических схем

С помощью АР удаётся зарегистрировать множество эхосигналов по разным акустическим схемам, то есть для разного количества отражений луча от границ объекта контроля. Для тонких объектов это позволяет «осветить» отражатель по многим направлениям и получить более точную информацию о его форме [19]. Некоторые ФАР-дефектоскопы позволяют формировать задержки с учётом отражения от лучей от дна объекта контроля, в том числе и неровного, и проводить измерения по нескольким акустическим схемам. Работа в таком режиме называется «Multigroup». В том режиме работа ФАР-дефектоскопа замедляется в число раз равное количеству акустических схем, используемых при проведении контроля.

Скорость измерения эхосигналов ЦФА-дефектоскопом не изменится. Для восстановления изображений отражателей методом C-SAFT после завершения регистрации эхосигналов придётся потратить дополнительное время, но это, как пра-

вило, происходит в более комфортных и спокойных условиях, нежели при проведении измерений. Ниже представлены изображения, полученные на прямом луче на продольной волне (акустическая схема $T(L)-T(L)$) по эхосигналам по которым было получено изображение на рис. 7. На левой панели показано одно парциальное изображение, а на правой их когерентная сумма. Фронтальное разрешение парциального изображения не позволяет различить ни одного отверстия, в то время как фронтальное разрешение суммарного изображения равно примерно 1,5 мм и все 18 отверстий на глубине 50 мм отчётливо разрешаются. На суммарном изображении на глубину до 20 мм отчётливо видна боковая стенка. Сравнивая этот рисунок с рис. 7, видно, что применение новой схемы даёт дополнительную информацию о дефектах и о форме образца. Так как на продольной волне диаграмма направленности элемента шириной 0,6 мм более широкая, чем на поперечной волне, то амплитуды бликов всех отверстий стали практически одинаковы. Анализируя два объединённых изображения показанных на рис. 7 и рис. 9 и полученных по одному набору эхосигналов можно точнее определить размеры и, главное, тип отражателя.

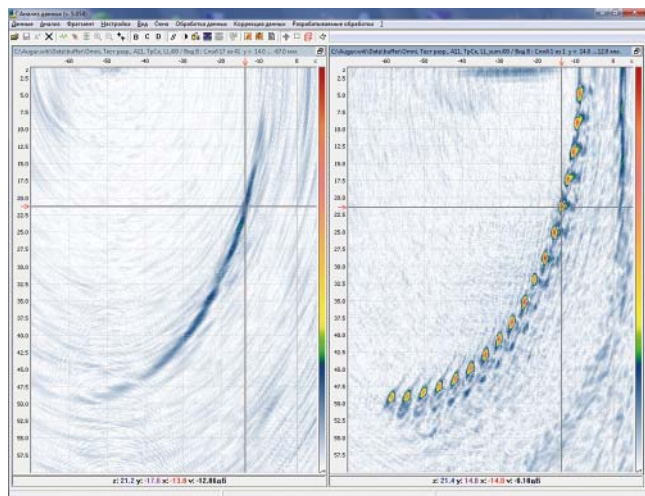


Рис. 9. Изображения теста фронтального разрешения по акустической схеме $T(L)-T(L)$. Слева одно парциальное изображение, а справа когерентная сумма всех парциальных изображений

Как дополнительный пример использования нескольких акустических схем можно рассмотреть изображение дна образца и отверстия бокового сверления, приведённое на рис. 6.

В отличие от ФАР-дефектоскопа, ЦФА-дефектоскоп позволяет по один раз измеренным эхосигналам восстанавливать изображения по заданной методикой контроля акустическим схемам. Это повышает достоверность определения типа несплошности.

7. Получение изображения отражателей в материалах со структурным шумом

Применение антенных решёток очень эффективно для проведения контроля объектов из материалов с высоким уровнем структурного шума. Как показано в работе [20], минимизировать уровень структурного шума при формировании изображения отражателей можно с помощью многоканальной пространственно-временной обработки эхосигналов в предположении, что эхосигналы регистрируются в режиме двойного сканирования. Примеры повышения отношения сигнал/шум изображений восстановленных в режиме ЦФА-Х приведены в статьях [21, 22]. Так как ФАР-дефектоскопы не могут когерентно складывать парциальные изображения, то существенного повышения отношения сигнал/шум при обработке изображений для нескольких положений АР ожидать не стоит.

8. Восстановление изображений в режиме 3D (ЦФА-У)

Обычно, изображения восстанавливаются методом C-SAFT в предположении, что по одному набору эхосигналов восстанавливается один слой изображений В-типа. Для получения дополнительной плоскости xu постоянной по глубине фокусировки равной примерно размеру пьезоэлемента вдоль оси y , метод C-SAFT легко обобщается на трёхмерный случай. Суть обобщения заключается в том, что для формирования одного изображения В-типа, используется не один, а несколько наборов исходных эхосигналов измеренных для разных y . Их количество определяется шириной диаграммы направленности преобразователя в дополнительной плоскости xu . Технологию получения изображения указанным выше способом можно называть 3D-C-SAFT (ЦФА-У). ФАР-дефектоскопы при использовании АР не в состоянии совместно обрабатывать эхосигналы для повышения фронтальной разрешающей способности в дополнительной плоскости.

Проиллюстрируем преимущества такого подхода при УЗК продольными волнами сварного соединения (СС) толщиной 160 мм. На рис. 10 показаны изображения D-типа, восстановленные методом C-SAFT (слева) и 3D-C-SAFT (справа). Видно, что фронтальная разрешающая способность в дополнительной плоскости на глубинах более 150 мм при использовании метода 3D-C-SAFT возросла более чем в четыре раза, в сравнении с методом C-SAFT, а отношение сигнал/шум возросло более чем на 6 дБ. На изображении видно множество бликов отражателей типа непровара или шлаков. Особое подозрение вызывает блик большой протяжённости вдоль оси y на глубине около 90 мм.



Рис. 10. Изображения D-типа СС, восстановленные методом C-SAFT (слева) и 3D-C-SAFT (справа)

Для получения дополнительной информации о типе несплошности расположенной на глубине 90 мм можно воспользоваться следующим приёмом. Как известно [23] коэффициент отражения с трансформацией типа ультразвуковой волны от объемных несплошностей волны значительно меньше в обратном направлении, чем без трансформации. Если по измеренному набору эхосигналов восстановить изображения по акустическим схемам $T(S) - T(S)$, $T(L) - T(S)$ и $T(L) - T(L)$, то на изображении, полученном по акустической схеме $T(L) - T(S)$, останутся блики потенциально опасных несплошностей типа трещин. На рис. 11 показаны изображения полученные методом 3D-C-SAFT, амплитуды которых приведены к максимуму изображения на продольных волнах. Изображения представлены в режиме показа максимума всех слоёв. Видно, что на изображении $T(S) - T(L)$ на глубине около 90 мм нет бликов заметной амплитуды, что служит указанием на отсутствие несплошностей с острыми краями в контролируемом объеме СС.

Таким образом, ЦФА-дефектоскоп при контроле толстостенных объектов позволяет получать более качественные изображения отражателей в сравнении с ФАР-дефектоскопом.

9. Величина амплитуды смещения

Принципиальная разница между ФАР- и ЦФА-дефектоскопами заключается в том, что при физической фокусировке акустических волн амплитуда колебания элементов объекта контроля в десять и более раз больше, чем в случае работы ЦФА-дефектоскопа, когда излучение происходит только одним элементом АР. Если нелинейные эффекты отсутствуют, то разницы в чувствительности между изображениями, полученными ФАР- и ЦФА-дефектоскопами практических нет. Но если контроль проводится с учётом нелинейных эффектов [24,

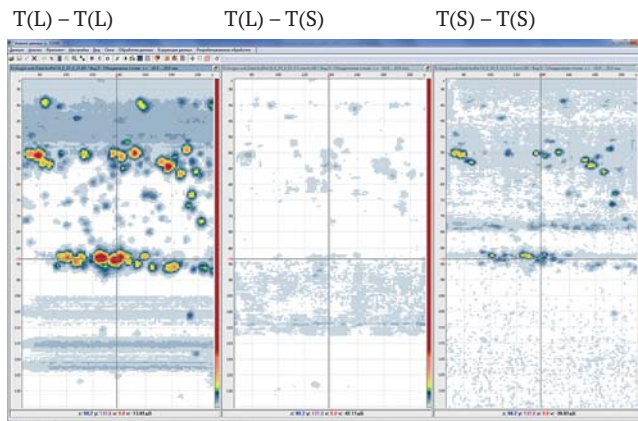


Рис. 11. Определение типа несплошностей с использованием изображений, восстановленных по акустическим схемам $T(S) - T(S)$, $T(L) - T(S)$ и $T(L) - T(L)$

25], то чувствительность ЦФА-дефектоскопа будет существенно меньше чем у ФАР-дефектоскопа.

10. Физическая фокусировка

Могут существовать объекты, для контроля которых эффективнее использовать ФАР-дефектоскоп. Например, если в объекте контроля с отводами нужно обнаруживать отражатели, показанные на рис. 12 линиями красного цвета, то за счёт реальной физической фокусировки в основание отвода с помощью ФАР-дефектоскопа, в отвод можно ввести принципиально больше энергии, и тем самым повысить отношение сигнал/шум принятых эхосигналов.

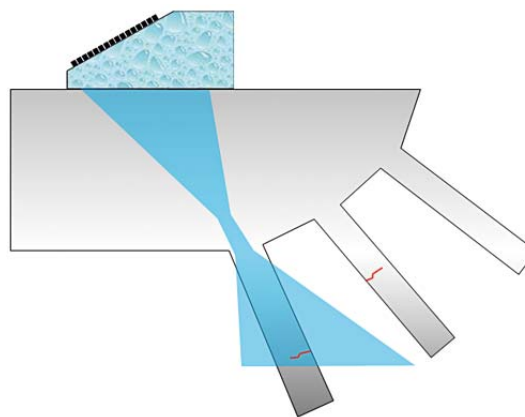


Рис. 12. Объект контроля с отводами, который эффективнее контролировать с помощью ФАР-дефектоскопа, нежели ЦФА-дефектоскопом

11. Скорость получения изображения и объем данных

Оценим объем информации необходимый для работы ФАР- и ЦФА-дефектоскопов. Будем полагать, что изображение S-типа формируется ФАР-дефектоскопом в диапазоне от 30 до 80 градусов с шагом 0,5 градусов ($N_s = 100$). Размер изображения по лучу обозначим как N_t . Путь N_e — число элементов АР, N_{ix} , N_{iz} — размеры ОВИ, N_{ip} — количество

парциальных изображений по разным акустическим схемам. Требуемый объем памяти для хранения и пересылки изображения S -типа равен

$$M_{\text{ФАР}} = N_s N_t N_{\text{ip}}.$$

Для ЦФА-дефектоскопа требуется сначала провести измерения эхосигналов, а затем восстановить по ним N_{ip} парциальных изображений по разным акустическим схемам. Поэтому необходимый объем памяти, при использовании только верхнего треугольника коммутационной матрицы, можно определить как

$$M_{\text{ФАР}} = \frac{N_e(N_e - 1)N_t}{2} + N_{\text{ix}}N_{\text{iz}}N_{\text{ip}}.$$

Первый член выражения этого выражения определяет объём памяти необходимый для хранения эхосигналов, а второй для хранения восстановленных изображений по разным акустическим схемам. Если частота излучения зондирующих импульсов равна f_t , то скорость регистрации эхосигналов для ЦФА- и ФАР-дефектоскопов можно рассчитать по формулам

$$T_{\text{ФАР}} = \frac{N_s N_{\text{ip}}}{f_t}, T_{\text{ЦФА}} = \frac{N_e}{f_t}.$$

Для случая $N_t = 1024$, $N_{\text{ix}} = N_{\text{iz}} = 256$, $f_t = 1$ кГц и для значений количества парциальных изображений равных одному и пяти расчёт объема необходимой памяти $M_{\text{ЦФА}}$ и $M_{\text{ФАР}}$ и времени регистрации эхосигналов приведён в таблице 1.

Таблица 1. Объем памяти необходимый для хранения эхосигналов и изображений и время регистрации

	N_e	$N_{\text{ip}} = 1$		$N_{\text{ip}} = 5$	
		Объем памяти, Мбайт (время регистрации, с)		Объем памяти, Мбайт (время регистрации, с)	
		$M_{\text{ФАР}}(T_{\text{ФАР}})$	$M_{\text{ЦФА}}(T_{\text{ЦФА}})$	$M_{\text{ФАР}}(T_{\text{ФАР}})$	$M_{\text{ЦФА}}(T_{\text{ЦФА}})$
1	16	0,1 (0,1)	0,19 (0,016)	0,49 (0,5)	0,44 (0,016)
2	32	0,1 (0,1)	0,56 (0,032)	0,49 (0,5)	0,81 (0,032)
3	64	0,1 (0,1)	2,06 (0,064)	0,49 (0,5)	2,31 (0,064)

Видно, что для 64-х элементной антенной решётки при расчёте одного парциального изображения требуется в двадцать раз больше объем памяти для хранения эхосигналов и изображений. А вот в случае, если ФАР-дефектоскоп должен получать изображения для нескольких законов фокусировки, то разница между значениями $M_{\text{ЦФА}}$ и $M_{\text{ФАР}}$ для пяти парциальных изображений равна уже пяти. Значения $M_{\text{ЦФА}}$ и $M_{\text{ФАР}}$ для 16-и элементной АР

соизмеримы. Отсюда можно сделать вывод, ЦФА-дефектоскопы должны иметь более скоростные каналы передачи эхосигналов, и чем больше элементов в АР, тем более жесткие требования к скорости передачи. А вот время регистрации эхосигналов ЦФА-дефектоскопом меньше чем ФАР-дефектоскопом, и это может оказаться очень важным фактором, в частности, для медицинских приложений.

12. Восстановление изображений в режиме ЦФА-ХУ

Если эхосигналы регистрируются АР перемещаемой по растровой траектории, то для восстановления изображения можно использовать наборы эхосигналов измеренных как для разных положений по оси x , так и по оси y . Такую технологию восстановления изображения несплошностей можно назвать ЦФА-ХУ.

На рис. 13 слева показаны изображения B -типа плоскостного отверстия диаметром 2,5 мм (5 мм^2) просверленного под углом 55 градусов на глубине 195 мм, полученное ФАР-дефектоскопом. На правой панели показано изображение, восстановленное методом ЦФА-ХУ. На изображения линиями чёрного цвета наброшена маска образца. На ФАР-изображении блик едва угадывается, так как отношение сигнал/шум равно практически 0дБ. А вот на ЦФА-изображении блик дна отверстия имеет амплитуду не менее чем на 12дБ превышающую шум. Фронтальное разрешение ЦФА-изображения улучшилось не меньше чем в пять раз в сравнении с ФАР-изображением.

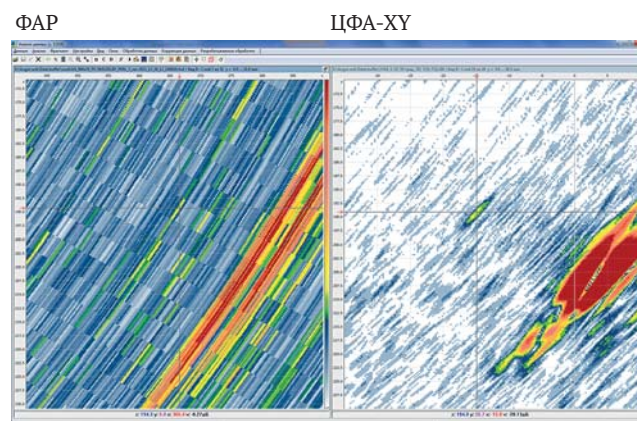


Рис. 13. Изображения плоскостного отверстия диаметром 2,5 мм (5 мм^2) просверленного под углом 55 градусов на глубине 195 мм. На левой панели изображение получено ФАР-дефектоскопом, а на правой методом ЦФА-ХУ

Возможность когерентно складывать парциальные ЦФА-изображения, восстановленные для множества положений АР, позволяет получать более качественные изображения несплошностей, чем ФАР-изображения.

13. Таблица сравнения возможностей ФАР- и ЦФА-дефектоскопов

В таблице ниже сведены результаты сравнения возможностей ФАР- и ЦФА-дефектоскопов.

		ФАР-дефектоскоп	ЦФА-дефектоскоп
1	Методы формирования изображения	Технология ФАР (плата за быстрое действие)	Нет ограничений, так как доступны исходные эхосигналы
2	Когерентная обработка эхосигналов в разных положениях АР (ЦФА-Х, ЦФА-У, ЦФА-ХУ)	Нет	Да
3	Получение изображения для многих акустических схем	Да (режим Multigroup)	Да (постобработка измеренных сигналов)
4	Восстановление изображения отражателей в единой ОВИ для произвольно расположенных одной или нескольких АР (АМ)	Нет	Да
5	Скорость регистрации	Снижается при увеличении глубины и в режиме Multigroup	Снижается при увеличении числа элементов решётки
6	Скорость передачи информации	20 Мбайт (USB 2.0)	Много больше 20 Мбайт (USB 3.0)
7	Физическая фокусировка	Да	Нет
8	Возникновение нелинейных эффектов	Да	Практически нет
9	Количество приёмо-передающих каналов	Равно числу элементов АР	В предельном случае один канал и коммутатор (1 на количество элементов)

14. Выводы

Приведённые в данной статье рассуждения, позволяют сделать следующие выводы:

- Для автоматизированных систем **эксплуатационного** неразрушающего контроля целесообразнее использовать ЦФА-дефектоскопы, по следующим причинам:
 - ЦФА-дефектоскопы имеют более высокую фронтальную разрешающую способность на всей ОВИ;
 - ЦФА-изображения, полученные при механическом сканировании антенной решёткой, можно когерентно складывать, что позволяет получить однородное фронтальное разрешение во всём визуализируемом объеме толстостенных изделий и повысить отношение сигнал/шум;
 - Изображения, полученные методом C-SAFT, с использованием антенных решёток на призмах разной конфигурации и ориентации можно восстанавливать в единой системе координат, что облегчает совместный анализ нескольких изображений;
 - Метод C-SAFT можно модифицировать для трёхмерной обработки эхосигналов, что приводит к повышению фронтального разрешения в дополнительной плоскости АР;
 - ЦФА-изображения восстановленные по нескольким акустическим схемам по одиножды измеренным эхосигналам можно объединять в одно высококачественное изображение.
- Если методика контроля основана на использовании нелинейных эффектов, то ФАР-дефектоскопы имеют неоспоримое преимущество перед ЦФА-дефектоскопами. Но в случае работы в рамках линейной акустики у ФАР-дефектоскопов нет преимуществ перед ЦФА-дефектоскопами, за исключением их большей коммерческой «раскрученности» и массивного присутствия на рынке.
- ЦФА-дефектоскопы требуют более скоростных каналов для передачи эхосигналов, в отличие от ФАР-дефектоскопов.
- Аппаратные средства современных дефектоскопов, использующих антенные решётки, очень высокие технические характеристики, и задача заключается в разработке новых нетрадиционных и эффективных алгоритмов получения информации об отражателях, решение которой позволит надёжно автоматизировать процесс распознавания и образмеривания.
- Все упомянутые в статье алгоритмы для получения ЦФА-изображений реализованы в дефектоскопе «АВГУР АРТ».

30 июня 2014 года

15. Список литературы

1. Гурвич А.К. Способы сканирования при ультразвуковом контроле // В мире неразрушающего контроля. 2010. №3. С. 4–6.
2. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007.
URL: <http://www.olympus-ims.com/en/books/> (дата обращения: 24.06.2014).
3. ФАР-дефектоскоп OMNISCANMX.
URL: <http://www.olympus-ims.com/ru/omniscanmx/> (дата обращения: 24.06.2014).
4. ФАР-дефектоскоп X-32.
URL: <http://www.harfang.ru/content/x-32.html> (дата обращения: 24.06.2014).
5. ФАР-дефектоскоп ISONIC 2009.
URL: <http://www.sonotronndt.com/i2009.htm> (дата обращения: 24.06.2014).
6. ФАР-дефектоскоп PHASORXS.
URL: <http://spektr-ksk.ru/pribor.php?id=1411> (дата обращения: 24.06.2014).
7. ФАР-дефектоскоп AGRTD.
URL: <http://www.newcoinc.com/detail.aspx?ID=1478> (дата обращения: 24.06.2014).
8. ФАР-дефектоскоп CTS-602.
URL: http://www.siui.com/enH/products_view_c5_9_21_35_i28.html (дата обращения: 24.06.2014).
9. Базулин Е.Г., Голубев А.С., Коколев С.А. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов // Дефектоскопия. 2009. №2. С. 18–32.
10. Chatillon S., Fidahoussen A., Iakovleva E., Calmon P. Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models // NDT in Canada 2009 National Conference. 25–27 August, 2009.
11. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. №2. С. 29–41.
12. Bulavinova A., Dalichow M., Kröning M., Kurzf. H., Walte F., Reddy K., Quantitative Ultrasonic Testing of Pressurized Components Using Sampling Phased Array // Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation. 7–9 December, 2006. Hyderabad. P. 437–448.
13. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // NDT&E International. 2005. Vol. 38. P. 701–711.
14. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решёток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. №1. С. 64–70.
15. ЦФА-дефектоскоп A1550 IntroVisor.
URL: <http://www.acsys.ru/production/detail/a1550-introvisor/> (дата обращения: 24.06.2014).
16. ЦФА-дефектоскоп АВГУР АРТ.
URL: <http://www.echoplus.ru/prodykciya/28-avgur-art.html> (дата обращения: 24.06.2014).
17. ЦФА-дефектоскоп Gekko.
URL: <http://www.m2m-ndt.com/products/Gekko.htm> (дата обращения: 24.06.2014).
18. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решётки или фазированные антенные решётки // Дефектоскопия. 2013. №7. С. 51–75.
19. Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решётками // Дефектоскопия. 2014. №3. С. 12–22. DOI: 10.1134/S1061830914030036
20. Пространственно-временная обработка сигналов/И.Я. Кремер [и др.]; Под ред. И.Я. Кремера. М.: Радио и связь, 1984. 223 с.
21. Базулин Е.Г. Контроль заварок Ду800 антенными решётками методом тройного сканирования // Дефектоскопия. 2010. №7. С. 30–41. DOI: 10.1134/S106183091007003X
22. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей по ультразвуковым эхосигналам методом максимальной энтропии // Дефектоскопия. 2013, №1. С. 33–60. DOI: 10.1134/S1061830913010038
23. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.
24. Буров В.А., Шмелёв А.А. Численное и физическое моделирование процесса томографирования на основе акустических нелинейных эффектов третьего порядка // Акуст. журн. 2009. №4/5. С. 466–480.
25. Solodov I.Yu., Zheng Y., Maev R.G. Nonlinear acoustic application for material characterization: A review // Canadian Journal of Physics. 1999. №12. P. 927–967.

Сканирующие устройства автоматизированного УЗК

Scanning Devices for Automated Ultrasonic Testing

В статье приводятся основные принципы формирования технических требований к сканирующим устройствам для автоматизированного УЗК. Основными факторами, определяющими конструктивные особенности сканирующих устройств, являются конструктивные особенности самого объекта контроля, методология и условия проведения контроля. На примерах рассматривается разработка некоторых типов сканирующих устройств для систем АВГУР 5.2 и АВГУР-АРТ.

Приведены общие виды и основные технические характеристики наиболее широко используемых сканеров, разработанных в НПЦ «ЭХО+».

The paper presents the basic principles of technical requirements for the scanning devices for automated ultrasonic testing. The main factors accounting for the design features of scanning devices are the design features of the control object, methodology and conditions of the testing. The examples seen the development of some types of scanning devices for systems AUGUR 5.2 and AUGUR-ART. Are the general types and basic technical characteristics of the most widely used scanner developed in SPC ECHO+. Examples of application and technologies measurement results on test blocks are given in the article. The development perspectives of methods using digital antenna focusing for visualization and measurement of bottom surface profile are described

Введение и история

Сканирующие устройства решают две главные задачи для ультразвукового контроля, которые лежат в основе автоматизации всего процесса, — это замена ручного перемещения преобразователей механическим сканированием и обеспечение записи эхо-сигналов на пространственной сетке, привязанной к системе координат объекта контроля. Попутно с решением этих задач сканеры выполняют много полезных функций, существенно повышающих качество контроля. Так сканеры обеспечивают равномерное прижатие к поверхности металла от одного до нескольких преобразователей, на сканерах размещают преусилители УЗ сигналов, что позволяет удалить аналого-цифровое преобразование от объекта контроля и повысить качество сигнала. Кроме того, сканеры обеспечивают электрическое подключение нескольких преобразователей и, при необходимости, распределенную подачу контактной жидкости.

Основными факторами, определяющими конструктивные особенности сканирующих устройств, являются конструктивные особенности самого объекта контроля, методология его контроля и, конечно же, условия проведения контроля.

В начале своей истории (1990–1994 гг.) НПЦ «ЭХО+», решая задачу получения голографических изображений, использовал сканеры только для того, чтобы зарегистрировать поле лишь на

небольшой части поверхности объекта контроля. Шаг регистрации данных для восстановления таких изображений довольно мал (0,2–0,6 мм) и изображения рассчитывались долго. Неподъемным для такой технологии был даже объем данных соответствующий одному кольцевому шву на трубах Ду300.

Впоследствии, когда когерентное (голографическое) восстановление 3D-изображений больших областей контроля стало возможным, возникла необходимость применения сканеров способных сканировать сварные соединения полностью. Первый такой сканер для кольцевых сварных соединений аустенитных труб Ду300 был создан в 1996 г. Он обеспечивал, вместе с возможностью получения высококачественных изображений, также и сплошное двухстороннее сканирование по всей длине шва.

На этом пути совмещения автоматизации сканирования и сплошной записи данных для восстановления изображений была создана целая серия сканирующих устройств для различных объектов контроля.

Следующим важным этапом развития автоматизации контроля стала возможность совмещения механического и электронного сканирования пространства с применением антенных решёток. В ряде случаев это позволило отказаться от одной из двух осей сканирования и снизить требования

к точности обработки шагов сканирования по другой оси. Сканеры для антенных решёток легче, проще и удобнее в работе. Однако не всегда. Для некоторых задач контроля, требования к сканеру для антенных решёток лишь немногим менее жёсткие, чем для мало-элементных преобразователей, не имеющих возможности электронного сканирования. В статье рассматривается такой пример, когда требование высокой разрешающей способности контроля по всем координатным осям изображения, установленное для большого диапазона толщин контроля (от 0 до 200 мм) приводит к необходимости применения сканера с двумя координатами сканирования с высокой точностью обработки шага по обеим осям.

Так эволюция методов сбора и обработки данных ультразвукового контроля оказала наиболее существенное влияние на конструктивные решения для сканирующих устройств. Этот важнейший фактор, а также многообразие объектов, условий и методов контроля породило целую серию сканирующих устройств для решения самых разнообразных задач АУЗК. Описанию этих и задач и сканеров, с помощью которых они решаются, и посвящена данная статья.

Основные требования к сканирующим устройствам для АУЗК

Сканер = Объект контроля + Схемы контроля + Аппаратура контроля

Требования к сканирующему устройству для автоматизированного УЗК (АУЗК), полностью определяющие его технические характеристики и внешний образ, можно разделить на три основные группы. Первая группа требований определяет точную конфигурацию объекта контроля и условий, в которых должен проводиться контроль, вторая группа — относится к схемам и параметрам самого сканирования по методике контроля и третья группа требований относится к аппаратуре контроля, в составе которой должен работать этот сканер. Конечно же, технические характеристики готового сканера также подчинены этой простой классификации.

Объект контроля

Для разработки хорошего сканера необходимы очень точные знания параметров объекта контроля. Наибольшая часть проблем, связанных с эксплуатацией сканирующих устройств определенного назначения связана именно с тем, что параметры объекта определены не точно или неизвестны. Оказавшись на объекте со сканером, дефектоскописты подчас узнают об объекте контроля много

нового, такого, о чём не догадывались постановщики задачи разработки сканера — трубы обладают излишней эллипсностью, конусные переходы слишком длинны, валики усиления и волнистость поверхности выходят за допустимые пределы. Эти отклонения могут привести к тому, что работа со сканером на таком объекте становится невозможной. Поэтому крайне важны не только параметры объекта контроля по исходной конструкторской документации, но и всевозможные отклонения от неё, допущенные при монтаже. Также существенно знание об ограничениях доступа — размещение объекта, конструкции и другие объекты, препятствующие сканированию и расположенные в непосредственной близости от сканера, возможное влияние работ проводимых параллельно с контролем.

В качестве примера описания объекта контроля для разработки сканера приводим в таблице 1 параметры углового сварного соединения приварки патрубка к днищу большого сосуда.

Параметры и условия сканирования

Данный набор требований должен определять конструкцию и условия подключения перемещаемых преобразователей, их количество, схему их размещения и сканирования на объекте контроля, необходимость и параметры взаимной регулировки положений преобразователей. При этом должны быть определены минимальное разрешение кодировщика положения, диапазон измерения координаты вдоль осей перемещения, погрешность измерения координаты преобразователей при перемещении на заданное расстояние по каждой из осей координат. На рис. 1 приведена схема сканирования для объекта контроля из таблицы 1.

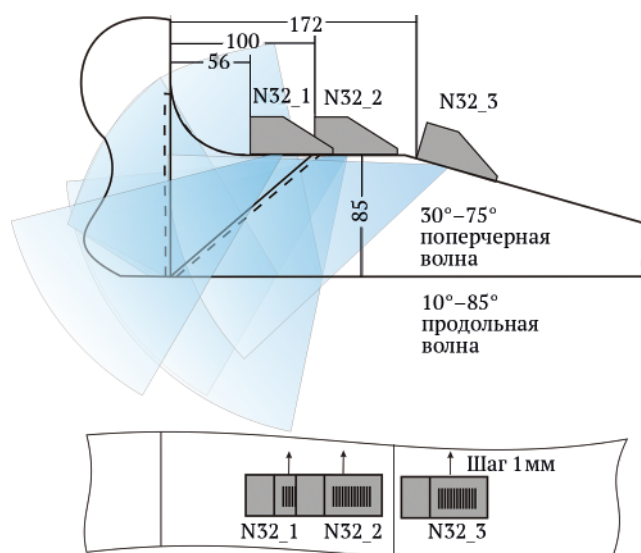
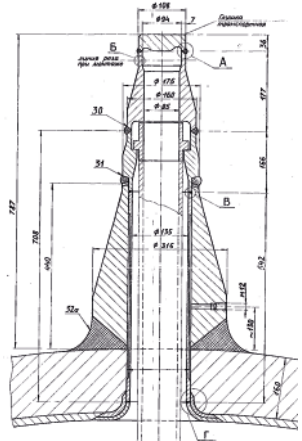


Рис. 1. Схема контроля: три положения призмы с антенной решёткой

Таблица 1. Пример задания параметров объекта контроля

Параметр	Единица измерения	Значение
Название объекта контроля	-	Угловое сварное соединение приварки патрубка к днищу большого сосуда
Внешний диаметр патрубка	мм	315
Основные размеры	эскиз	
Материалы		патрубки впрыска и сброса пара, днище компенсатора объема изготовлены из стали 22К, марка сварочного материала — электроды УОНИ 13/55
Шероховатость поверхности сканирования, не более	мкм	6,3
Волнистость поверхности, не более	Отношение максимальной стрелы прогиба к периоду волнистости	0,015
Условия проведения контроля: <ul style="list-style-type: none"> температура окружающего воздуха, не более; температура поверхности металла контролируемого сварного соединения, не более; относительная влажность воздуха; давление воздуха; радиационный фон, не более 	<ul style="list-style-type: none"> °С; °С; при 35°С в %; кПа; мР/ч 	<ul style="list-style-type: none"> 40; 40; 90; от 84 до 107; 200

Также должны быть определены требования, касающиеся способа привязки системы координат сканирующего устройства к системе координат объекта контроля, масса, время установки сканирующего устройства на объект, время сбора данных (скорость сканирования по всем осям), необходимость подачи под призму контактной жидкости, тип контактной жидкости.

Одним из важнейших параметров является усилие прижима преобразователей к поверхности объекта контроля. Многочисленные опыты позволили определить оптимальное значение этого параметра для контактного способа ввода ультразвука при ис-

пользовании воды и глицерина в качестве контактных жидкостей. Так для преобразователей размерами 20x30 мм это усилие должно составлять 0,8–1,2 кг.

Аппаратура контроля

Данная группа требований полностью определяет технические средства контроля, в составе которых должен работать данный сканер. Типы разъёмов подключения питания и управления сканером, размещение на нём дополнительных, например, коммутационных элементов и пр.

Одно из возможных конструктивных решений сканирующего устройства для объекта контроля,

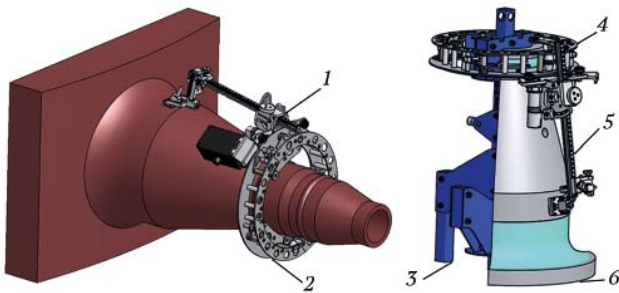


Рис. 2. Сканирующее устройство для контроля углового шва приварки патрубка к днищу сосуда: на объекте контроля (слева) и настроечном стенде (справа).

1 — сканер 128-350; 2 — трек 128-175; 3 — стенд ИО 31-32а; 4 — трек 128-175; 5 — сканер с длинной веткой; 6 — СОП ИО 31-32а

приведённого в таблице 1 и схем контроля на рис. 1 показано на рис. 2.

Здесь мы рассмотрели только специфические требования, касающиеся разработки сканирующих устройств для АУЗК. Безусловно, важны и общие требования, касающиеся любого разрабатываемого изделия по ГОСТ Р 15.2010-2000 [1], такие как требования метрологического обеспечения, требования безопасности, маркировки, транспортировки, хранения и т.д.

Сканирующие устройств для некоторых задач АУЗК

Сканер СК426Т для АУЗК кольцевых сварных соединений диаметрами от 426 мм

Наиболее широко применяемый сканер СК426Т предназначен для контроля кольцевых и продольных сварных соединений трубопроводов и другого оборудования диаметром от 426 мм. Сканер предназначен для работы в составе системы АУЗК АВГУР 5.2 и имеет несколько модификаций для различных задач контроля. Он представляет собой двухкоординатный позиционирующий механизм предназначенный для точного перемещения преобразователей и их сорок в окрестности сварного соединения в соответствии с методикой контроля (рис. 3).

Сканер состоит из трека, неподвижно закреплённого на объекте контроля, механизма сканирования, обеспечивающего перемещение преобразователей вдоль и поперек сварного соединения, комплектов сменных частей, обеспечивающих проведение АУЗК на объектах контроля. Механизм сканирования состоит из приводов Y (перемещение вдоль оси шва) и X (перемещение поперек оси шва). На механизме сканирования закреплён блок электроники сканера. Привод Y представляет собой механизм, предназначенный для установки сканера на трек и обеспечивающий движение сканера по оси Y. На раме привода Y размещены опор-

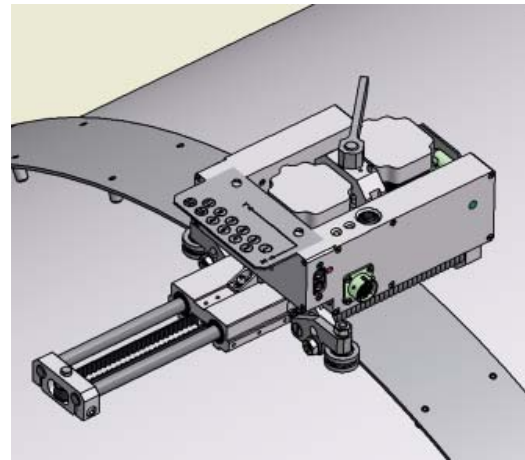


Рис. 3. Сканирующее устройство СК426Т без устройств прижима преобразователей

ные катки сканера, механизм установки сканера на трек и двухступенчатый редуктор с приводом от шагового двигателя и ведущим роликом. Привод X крепится на привод Y и состоит из одноступенчатого редуктора с приводом от шагового двигателя и ведущим зубчатым шкивом; двух направляющих круглого сечения по которым перемещается каретка; каретки с линейными подшипниками к которой крепятся сменные части сканера (направляющие, прижимы); зубчатого ремня.

Блок электроники сканера предназначен для предварительного усиления сигналов, снижения относительного уровня шумов и помех в усилительном тракте и коммутации 12-ти каналов с одним приемо-передающим трактом системы.

Модификации сканера СК426Т обычно связаны с удлинением ветки X для контроля толстостенных объектов контроля (рис. 4) и различными конфигурациями устройств прижима преобразователей. Различные устройства прижима обеспечивают контроль с использованием от двух до восьми различно ориентированных преобразователей.

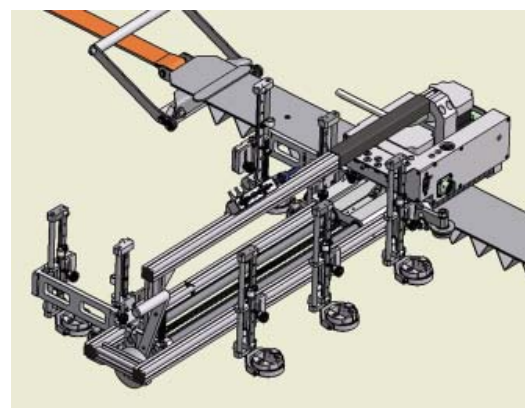


Рис. 4. Сканер СК426Т с удлинённой веткой X и устройствами прижима преобразователей

Сканирующее устройство СКУ-МТД.850-3000. М.ДП.2 для ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений диаметрами 2000–6000 мм

Этот сканер предназначен для проведения контроля методом цифровой фокусировки антенны с механическим сканированием по двум осям (здесь имеется в виду метод ЦФА-ХУ рассмотренный в статье [2, 3]) толстостенных сварных соединений роторов с ограничением доступа к сварному соединению в виде дисков, расположенных рядом со швом (рис. 5). Сканер предназначен для работы в составе систем автоматизированного неразрушающего ультразвукового контроля АВГУР-АРТ, работающих с антенными решётками.

Сканер обеспечивает двухкоординатное сканирование двух пар антенных решёток с точностью, которая необходима для когерентного сложения УЗ при различных положениях антенных решёток, что составляет около 0,2 мм (10% от величины основного шага сканирования). Схема сканирования с использованием продольно и поперечно ориентированных антенных решёток приведена на рис. 6. Именно благодаря этому сканеру удалось добиться беспрецедентной для ультразвукового контроля разрешающей способности по всей толщине сварного соединения ротора.



Рис. 5. Сканирующее устройство СКУ-МТД.850-3000. М. ДП.2

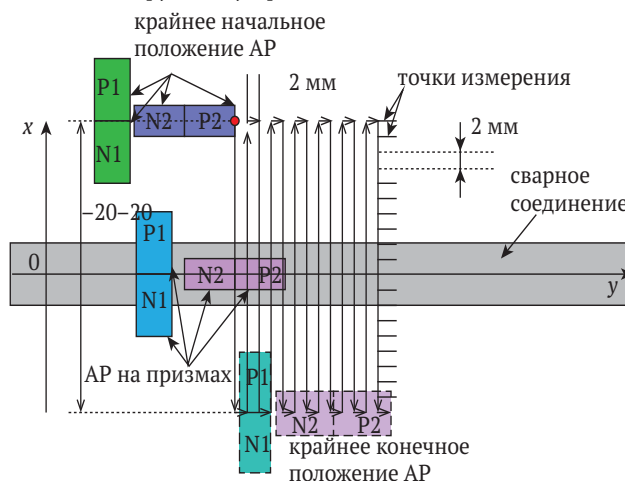


Рис. 6. Схема сканирования сварного соединения ротора

Основные сканеры ЭХО+

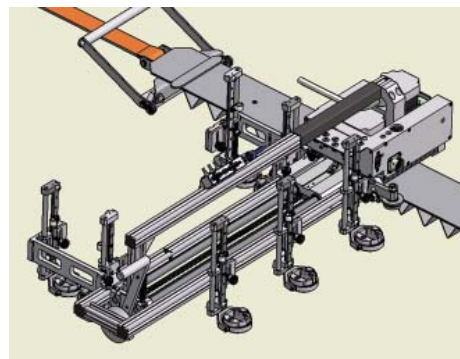
В таблице 2 приведены общие виды и основные технические характеристики наиболее широко используемых сканеров, разработанных в НПЦ «ЭХО+».

Таблица 2. Сканирующие устройства НПЦ «ЭХО+»

№	Назначение и основные технические характеристики	Рисунок и обозначение		
1	Сканер СК426Т4 для кольцевых СС диаметром от 426 мм до плоскости, контроль кольцевых и продольных сварных соединений. Применяется в составе систем АВГУР 5.2.	 <p>СК426Т4</p>		
№	Наименование параметра		Единицы измерений	Значение
1	Максимальная апертура по оси X		мм	130
2	Максимальная апертура по оси Y		мм	По длине трека
3	Элементарный расчётный шаг по оси X		мм	0,103193
4	Элементарный расчётный шаг по оси Y (по треку)		мм	0,08208
6	Габаритные размеры		мм	420×210×160
7	Масса без трека		кг	10,0

2 Сканер СК426Т4.1 для АУЗК кольцевых СС диаметром от 426 мм до плоскости, контроль кольцевых и продольных толстостенных сварных соединений. Применяется в составе систем АВГУР 5.2.

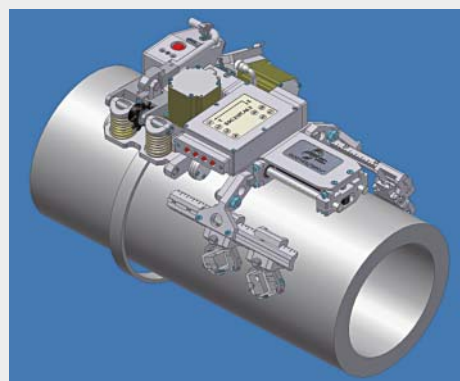
№	Наименование параметра	Единицы измерений	Значение
1	Максимальная апертура по оси X	мм	360
2	Максимальная апертура по оси Y	мм	По длине трека
3	Элементарный расчётный шаг по оси X	мм	0,103193
4	Элементарный расчётный шаг по оси Y (по треку)	мм	0,08208
6	Габаритные размеры	мм	750×260×160
7	Масса без трека	кг	12,0



СК426Т4.1

3 Сканер СК.219Т для АУЗК кольцевых СС диаметром от 219 мм до 426, контроль кольцевых сварных соединений. Применяется в составе систем АВГУР.

№	Наименование параметра	Единицы измерений	Значение
1	Максимальная апертура по оси X	мм	130
2	Максимальная апертура по оси Y	мм	-
3	Элементарный расчётный шаг по оси X	мм	0,103193
4	Элементарный расчётный шаг по оси Y (по треку)	мм	0,08208
6	Габаритные размеры	мм	350×280×120
7	Масса без трека	кг	10,0



СК219Т

4 Сканер СК590П для АУЗК гибов трубопроводов ГЦТ РУ ВВЭР-440 (ВВЭР-1200).

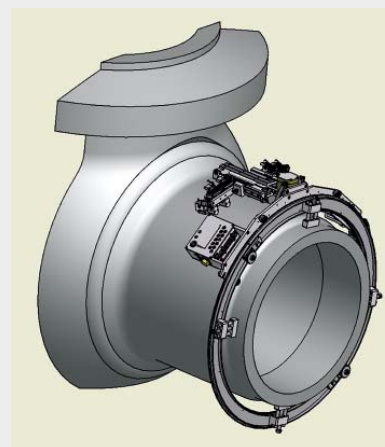
№	Наименование параметра	Единицы измерений	Значение
1	Максимальная апертура по оси X	град	180
2	Максимальная апертура по оси Y	град	90
3	Элементарный расчётный шаг по оси X	мм	0,1
4	Элементарный расчётный шаг по оси Y (по треку)	мм	0,1
6	Габаритные размеры	мм	720×800×1350
7	Масса с треком в сборе	кг	46,0



СК590П

5 АУЗК кольцевых СС ГЦТ Ду500. Применяется в составе систем АВГУР.

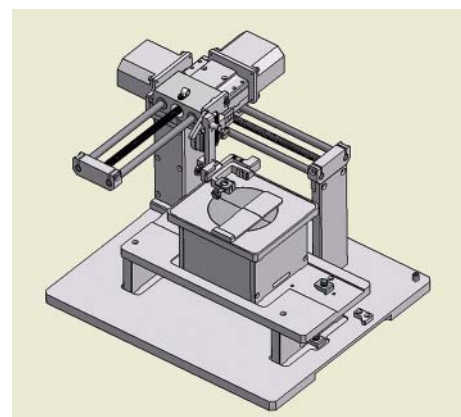
№	Наименование параметра	Единицы измерений	Значение
1	Максимальная апертура по оси X	мм	130
2	Максимальная апертура по оси Y	град	180
3	Элементарный шаг по оси X	мм	0,1
4	Элементарный шаг по оси Y (по треку)	мм	0,1
6	Габаритные размеры	мм	130×270×790
7	Масса без трека	кг	21,0



СК560

6 Планшетный сканер для объектов размерами до 200 × 200 × 200 мм, в том числе для АУЗК в иммерсионном режиме.

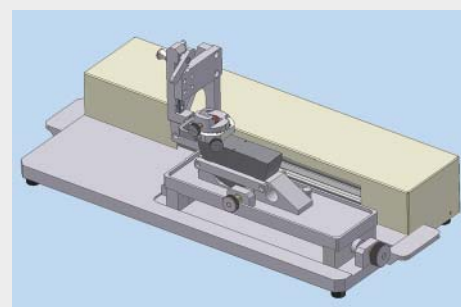
№	Наименование параметра	Единицы измерений	Значение
1	Максимальная апертура по оси X	мм	
2	Максимальная апертура по оси Y	мм	
3	Элементарный шаг по оси X	мм	
4	Элементарный шаг по оси Y (по треку)	мм	
6	Габаритные размеры	мм	340×440×560
7	Масса комплекта	кг	37,0



СУА5.4

7 Сканирование для системы калибровки преобразователей АВГУР 5.4.

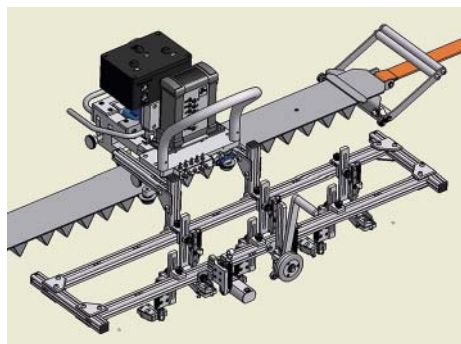
№	Наименование параметра	Единицы измерений	Значение
1	Максимальная апертура по оси X	мм	
2	Элементарный шаг по оси X	мм	
3	Габаритные размеры	мм	240×250×570
4	Масса комплекта	кг	19,0



Система калибровки АВГУР 5.4

8 Сканирующее устройство для ультразвукового контроля кольцевых и продольных сварных соединений, с наружными диаметрами 2000–6000 мм, методом TOFD, предназначено для работы в составе систем автоматизированного неразрушающего ультразвукового контроля А5.2-TOFD.

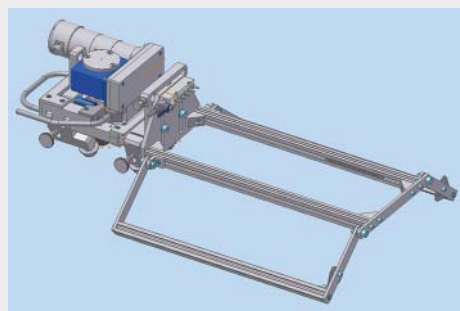
№	Наименование	Единицы измерений	Значение
1	Наружный диаметр контролируемых трубопроводов	мм	2000...6000
2	Максимальная высота от поверхности трубы (продольный шов на трубе диаметром 2000 мм)	мм	550
3	Наибольший габарит вдоль оси трубы	мм	1300
4	Диапазон регулировки расстояния между передними гранями преобразователей	мм	20...200
5	Масса сканера в сборе	кг	12,5
6	Масса кольцевого трека в сборе	кг	9,5
	Масса продольного трека в сборе	кг	15,5
7	Масса сканирующего устройства в сборе с прижимами	кг	15
8	Число импульсов датчика пути при перемещении сканера на фиксированное расстояние $L = 200$ мм	шт	407 ± 1
9	Разрешающая способность датчика пути,	мм/импульс	$0,4909 \pm 0,003$
10	Относительная погрешность измерения перемещения	—	$\pm 0,5\%$



СК.TOFD

9 АУЗК кольцевых СС диаметром от 150 мм до плоскости, контроль продольных сварных соединений.

№	Наименование	Единицы измерений	Значение
1	Габаритные размеры в сборе	мм	760×450×200
2	Габаритные размеры каретки	мм	300×250×180
3	Габаритные размеры рамы	мм	480×440×180
4	Масса каретки	кг	7,62
5	Масса рамы	кг	1,58
6	Скорость линейного перемещения	мм/сек	10...100
7	Тяговое усилие привода	Н	300
8	Минимальный диаметр трека	мм	280
9	Минимальный диаметр трубопровода	мм	152
10	Величина регулировки положения рамы по высоте	мм	60
11	Угол поворота боковых кронштейнов рамы	град	90
12	Угол поворота направляющей бокового кронштейна	град	± 20
13	Диаметр ролика приводного	мм	32
14	Передаточное число привода	-	67,5
15*	Тип применяемого трека:		80
	Ширина полосы	мм	3,0
	Толщина полосы	мм	18
	Высота от поверхности трубы	-	
	Материал		Нерж. сталь



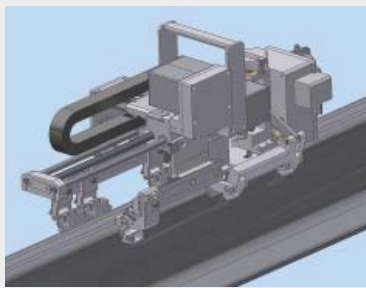
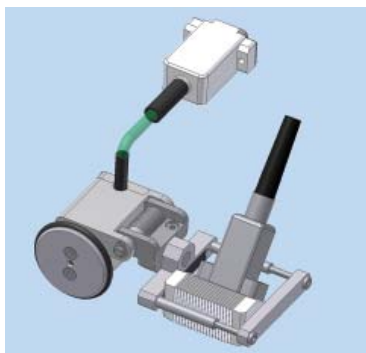
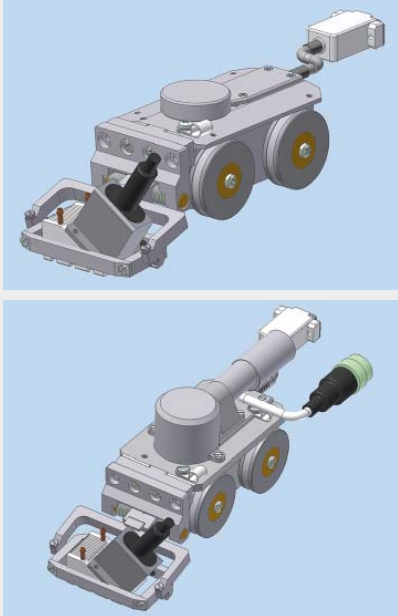
CK.PAS

10 Сканирующее устройство для ультразвукового контроля кольцевых и продольных сварных соединений.

№	Наименование	Единицы измерений	Значение
1	Минимальный наружный диаметр трубопроводов на которые устанавливаются скан	мм	426
2	Максимальная высота от поверхности трубы в зоне установки сканера	мм	180
3	Максимальная высота от поверхности трубы в зоне установки прижимов	мм	90
4	Наибольший габарит в поперечном направлении относительно сканируемого шва:	мм	704
5	Максимальная скорость движения сканера	мм/сек	79
6	Минимальная скорость движения сканера	мм/сек	3,95
7	Число импульсов датчика положения при перемещении сканера по треку на 1 мм.	шт	1,63
8	Число импульсов датчика положения при перемещении сканера на 100 мм.	шт	163±2
9	Относительная погрешность измерения перемещения	—	±1%
10	Разрешающая способность датчика пути,	мм/импульс	0,6136±0,002
11	Масса сканера в сборе с двумя прижимами	кг	4,5

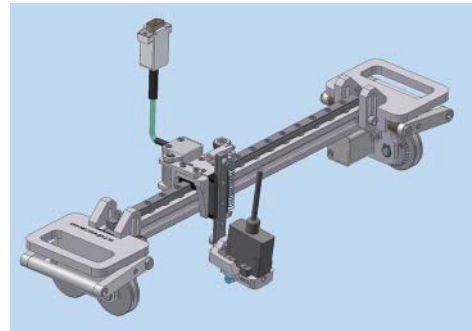


СКУ-МП.ПЛМ.ДП.1 Скорпион

11	Сканирующее устройство для ультразвукового контроля рельс.	 <p style="text-align: center;">СК.Рельс</p>																												
12	<p>Датчик пути предназначен для измерения пройденного пути при работе в составе системы неразрушающего УЗ контроля совместно с дефектоскопом ультразвуковым многоканальным типа Omniscan.</p> <table border="1" data-bbox="220 652 933 1300"> <thead> <tr> <th>№</th> <th>Наименование</th> <th>Единицы измерений</th> <th>Значение</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Разрешающая способность датчика пути</td> <td>мм/импульс</td> <td>0,46±0,005</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Относительная погрешность измерения перемещения</td> <td>—</td> <td>±1%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Число импульсов датчика пути при перемещении на 200мм</td> <td>шт</td> <td>434±4</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Тип разъема датчика пути</td> <td>—</td> <td>Совместим с Omniscan MX (DB15)</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Масса датчика пути (без призмы и ФАР)</td> <td>кг</td> <td>0,14</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Длина кабеля датчика пути</td> <td>м</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	№	Наименование	Единицы измерений	Значение	1	Разрешающая способность датчика пути	мм/импульс	0,46±0,005	2	Относительная погрешность измерения перемещения	—	±1%	3	Число импульсов датчика пути при перемещении на 200мм	шт	434±4	4	Тип разъема датчика пути	—	Совместим с Omniscan MX (DB15)	5	Масса датчика пути (без призмы и ФАР)	кг	0,14	6	Длина кабеля датчика пути	м	2	 <p style="text-align: center;">ИП-150-ПЛ.Р. ДП.1 Муха</p>
№	Наименование	Единицы измерений	Значение																											
1	Разрешающая способность датчика пути	мм/импульс	0,46±0,005																											
2	Относительная погрешность измерения перемещения	—	±1%																											
3	Число импульсов датчика пути при перемещении на 200мм	шт	434±4																											
4	Тип разъема датчика пути	—	Совместим с Omniscan MX (DB15)																											
5	Масса датчика пути (без призмы и ФАР)	кг	0,14																											
6	Длина кабеля датчика пути	м	2																											
13	Универсальный сканер-мышь с магнитными колесами для перемещения преобразователей на антенных решетках по трубопроводам от 426 мм до плоскости.	 <p style="text-align: center;">СКУ-МП.210-ПЛ.М. ДП.1 Мышь с ручным приводом и мотором</p>																												

14 Сканирующее устройство для ультразвуковой толщинометрии основного металла перлитных трубопроводов с применением технологии фазированных решёток, предназначено для работы в составе системы неразрушающего УЗ контроля совместно с дефектоскопом ультразвуковым многоканальным типа Omniscan. Механизированное сканирующее устройство имеет два датчика положения.

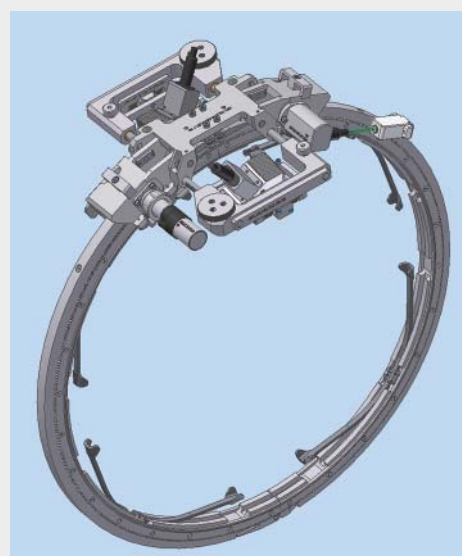
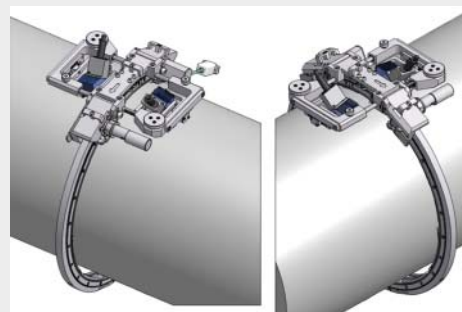
№	Наименование	Единицы измерений	Значение
1	Минимальный наружный диаметр трубопроводов на которые устанавливаются сканер: — ось X Хорошо бы где-то обозначить — что такое ось X и Y — ось Y	мм	900 150
2	Максимальная высота от поверхности трубы в зоне установки сканера	мм	115
3	Наибольший габарит по оси X:	мм	467
4	Максимальная зона перемещения по оси X	мм	250
5	Разрешающая способность датчика пути оси Y,	мм/импульс	0,32±0,002
6	Разрешающая способность датчика пути оси X,	мм/импульс	0,32±0,002
7	Относительная погрешность измерения перемещения	—	±1%
8	Число импульсов датчика положения при перемещении сканера на 200мм	шт	624±4
9	Тип разъема датчика положения	—	Совместим с Omniscan MX (DB15)
10	Масса сканера	кг	1,9



СКУ-МП.ПЛ.Р. ДП.2

15 АУЗК кольцевых СС диаметром от 159 до 426 мм с применением АР.

№	Наименование	Единицы измерений	Значение
1	Наружный диаметр контролируемых трубопроводов	мм	159±5 219±6 226±6 245±7 273±8 325±9 351±10 377±10 400±10 426±12
2	Максимальная высота от поверхности трубы	мм	80
3	Наибольший габарит вдоль оси трубы:	—	—
4	— при двустороннем контроле	мм	380
5	— при одностороннем контроле	мм	274
6	Диапазон регулировки расстояния между передними гранями преобразователей	мм	30...79
7	Масса сканера Т219–426 в сборе	кг	2,8
8	Масса трека 426 в сборе	кг	2,6
9	Масса трека 273 в сборе	кг	1,9
10	Масса сканирующего устройства в сборе	кг	4,5
11	Число импульсов датчика пути при перемещении сканера на фиксированное расстояние L = 110 мм	шт	527±5
12	Разрешающая способность датчика пути,	мм/импульс	0,209±0,002
13	Относительная погрешность измерения перемещения	—	±1%



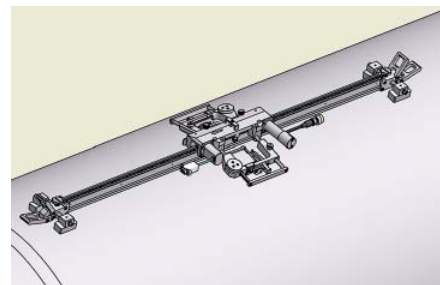
СКУ-ТД,219–426. М. ДП.1

16 Сканирующее устройство для ультразвукового контроля кольцевых и продольных сварных соединений трубопроводов условным диаметром 800 мм.

Наименование	Единицы измерений	Значение
Наружный диаметр контролируемых трубопроводов Ду800	мм	824 ± 4
Максимальная высота от поверхности трубы при кольцевом сканировании	мм	70
Максимальная высота от поверхности трубы при продольном сканировании	мм	78
Наибольший габарит в поперечном направлении относительно сканируемого шва:		
— при двустороннем контроле	мм	310
— при одностороннем контроле	мм	220
Диапазон регулировки расстояния между передними гранями преобразователей	мм	53...129
Наибольший габарит продольного трека вдоль контролируемого шва	мм	1220
Масса сканера Т820 в сборе	кг	2,8
Масса сканера Т820П в сборе	кг	2,8
Масса кольцевого трека в сборе	кг	3,2
Масса продольного трека в сборе	кг	3,2
Масса сканирующих устройств в сборе	кг	5
Масса блока управления сканером	кг	1,5



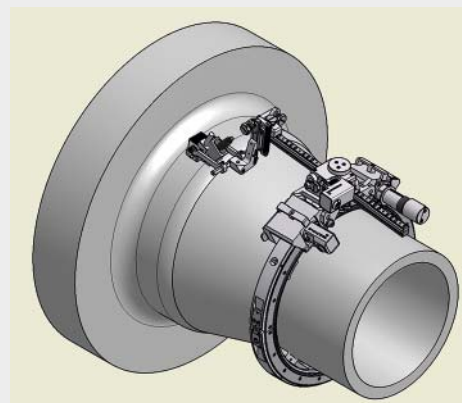
СК.Т820



СК.Т820П

17 Сканирующее устройство для ультразвукового контроля (УЗ) кольцевых сварных соединений, с установкой в стороне от сварного шва.

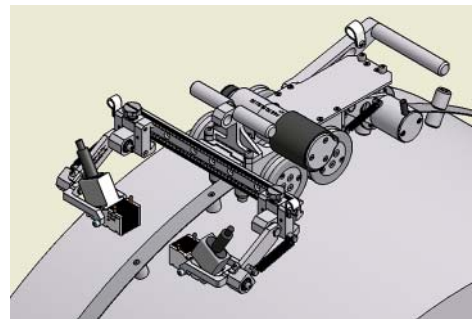
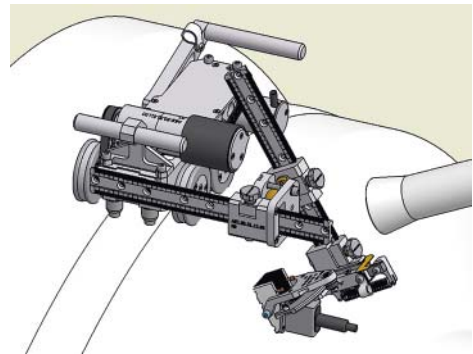
№	Наименование	Единицы измерений	Значение
1	Наружный диаметр трубопроводов на которые устанавливаются треки: ТР 273 ТР 108	мм	273±15
			108±12
2	Максимальная высота от поверхности трубы в зоне установки сканера	мм	110
3	Максимальная высота от поверхности трубы в зоне установки прижимов	мм	115
4	Наибольший габарит в поперечном направлении относительно сканируемого шва:	мм	470
5	Максимальный ход каретки X для регулировки положения прижимов вдоль трубы	мм	250
6	Дискретность хода каретки X	мм	1
7	Число импульсов датчика положения X при перемещении каретки X на 1 мм	-	4
8	Максимальная скорость движения сканера по треку	мм/сек	16,4
9	d — шаг зубца	мм	3,14159
10	Число импульсов датчика положения Y при перемещении сканера по треку на 1 мм	-	4,8
11	Число импульсов датчика положения Y при перемещении сканера по треку на 35 зубьев	-	527
12	Масса сканера Т108-273М в сборе с прижимом	кг	3,1
13	Масса трека 273	кг	3,5
	Масса трека 108	кг	1,8
14	Масса сканирующего устройства в сборе с треком 273/108	кг	6,9/5,2



SKU-TD.273.M.EN.2

18 Сканирующее устройство для ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений трубопроводов с наружными диаметрами от 530 до 1440 мм, предназначено для работы в составе систем автоматизированного неразрушающего ультразвукового контроля совместно дефектоскопом ультразвуковым многоканальным ДУМ АВГУР-АРТ.

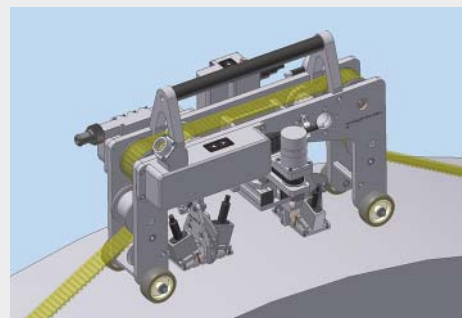
№	Наименование	Единицы измерений	Значение
1	Наружный диаметр контролируемых трубопроводов	мм	530...1440 мм
2	Максимальная высота от поверхности трубы	мм	120
3	Наибольший габарит вдоль оси трубы	мм	290
4	Диапазон регулировки расстояния между передними гранями преобразователей	мм	0...220
5	Масса сканера в сборе	кг	4,2
6	Масса трека локального в сборе	кг	1,3
7	Масса трека замкнутого в сборе	кг	1,0
8	Длина кабеля датчика положения	м	7
9	Длина кабеля подключения двигателя	м	7
10	Масса сканирующего устройства в сборе с прижимами	кг	5
11	Число импульсов датчика пути при перемещении сканера на фиксированное расстояние $L = 200$ мм	шт	325 ± 2
12	Разрешающая способность датчика пути	мм/импульс	$0,614 \pm 0,002$
13	Относительная погрешность измерения перемещения	—	$\pm 0,5\%$
14	Степень защиты датчика положения, двигателя и блока электроники при подключенных разъемах не хуже	—	IP65



СКУ-МТ.530–1440.М.ДП.1

19 Сканирующее устройство для ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений, с наружными диаметрами 2000–6000 мм, методом ХУ-ЦФА, предназначено для работы в составе систем автоматизированного неразрушающего ультразвукового контроля АВГУР-АРТ. SKU-МТД.850–3000. М. ДП.2.

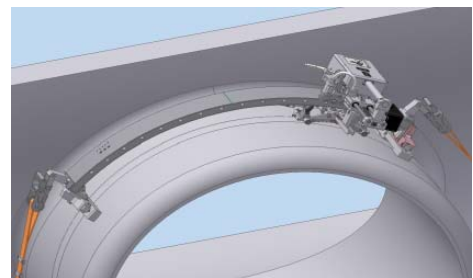
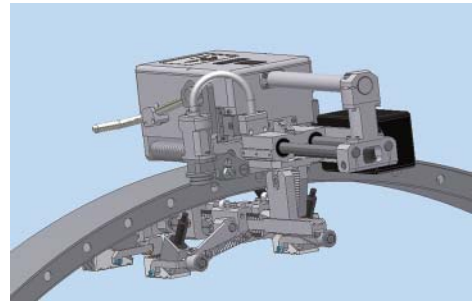
№	Наименование	Единицы измерений	Значение
1	Наружный диаметр контролируемых трубопроводов	мм	850...3000
2	Максимальная высота от поверхности объекта контроля	мм	300
3	Наибольший габарит вдоль контролируемого шва	мм	460
4	Наибольший габарит поперёк контролируемого шва (без учёта хода прижимов)	мм	200
5	Скорость перемещения по оси X	мм/мин	1,7...26
6	Скорость перемещения по оси Y	мм/мин	2,8...44
7	Разрешающая способность датчика пути привода X	мм/импульс	0,0794±0,003
8	Разрешающая способность датчика пути привода Y	мм/импульс	0,172±0,003
9	Максимальное перемещение по оси X (поперёк шва)	мм	106
10	Максимальное перемещение по оси Y (вдоль шва), определяется длиной направляющего ремня	мм	2200
11	Масса сканера в сборе	кг	11



SKU-МТД.850–3000. М. ДП.2

20 АУЗК кольцевых СС диаметром от 426 мм до плоскости, контроль кольцевых и продольных сварных соединений. Применяется в составе систем АВГУР-АРТ.

№	Наименование параметра	Единицы измерений	Значение
1	Максимальная апертура по оси X	мм	130
2	Максимальная апертура по оси Y	мм	По длине трека
3	Габаритные размеры	мм	420×210×160
4	Масса без трека	кг	10,0



СК.426С

Список литературы

1. ГОСТ Р15.201-2000. «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство».
2. 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. 46–65.
3. Базулин Е. Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решётки или фазированные антенные решётки // Дефектоскопия, 2013, №7, с. 51–75.

Авторы

Authors

Вопилкин Алексей Харитонович



Генеральный директор ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва, д.т.н., профессор. Научные интересы: методы и средства определения параметров дефектов, разработка ультразвуковых автоматизированных систем с когерентной обработкой данных.

e-mail: vopilkin@echoplus.ru

Бенитес Хорхе



Ведущий менеджер DEKRA Industrial AB (Швеция).

e-mail: jorge.benitez@dekra.com

Бадалян Владимир Григорьевич



Заместитель директора ООО «НПЦ ЭХО+» по научной работе, доктор техн. наук, III уровень по акустическим методам контроля. Научные интересы — разработка когерентных методов и средств ультразвукового контроля.

e-mail: bvg@echoplus.ru

Гордеев Юрий Леонидович



Начальник лаборатории электроники.

e-mail: gordeev@echoplus.ru

Базулин Андрей Евгеньевич



Начальник лаборатории ООО «НПЦ ЭХО+», кандидат тех. наук. Научные интересы — разработка и применение автоматизированных систем контроля с визуализацией дефектов.

e-mail: android@echoplus.ru

Козлов Василий Львович



Зам. начальника отдела информационных технологий ООО «НПЦ «ЭХО+». Окончил Белорусский государственный университет в 2001 году по специальности «Физика» и в 2002 году специальный факультет бизнеса и информационных технологий Белгосуниверситета по специальности переподготовки информатика. Научные интересы: создание программных комплексов автоматизированных средств управления.

e-mail: kozlov@echoplus.ru

Базулин Евгений Геннадьевич



Начальник научно-методического отдела ООО «НПЦ «ЭХО+». К.ф.-м.н. Закончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики в 1980 г. С 1990 г. работает в ООО «НПЦ «ЭХО+». Научные интересы: разработка новых алгоритмов восстановления ультразвуковых изображений.

e-mail: bazulin@echoplus.ru

КокOLEV Сергей Анатольевич



Научный сотрудник ООО «НПЦ «ЭХО+». Окончил Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана в 2006 году с отличием по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». Научные интересы: разработка новых алгоритмов восстановления ультразвуковых изображений.

e-mail: kokolev@echoplus.ru

Кузнецов Константин Алексеевич



Начальник конструкторского бюро ООО «НПЦ «ЭХО+». Закончил станко-инструментальный институт в 1998 г. Научные интересы: конструирование электромеханических устройств для автоматизированного УЗК.

e-mail: kuznetzov@echoplus.ru

Тихонов Дмитрий Сергеевич



Заместитель генерального директора ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва, к.т.н. Родился в 1964 г. Закончил Московский институт радиоэлектроники и автоматики в 1987 г. С 1990 г. работает в ООО «НПЦ «ЭХО+». Научные интересы: разработки оборудования, методик и алгоритмов когерентной обработки данных автоматизированного ультразвукового контроля. Автор ряда работ по методам ультразвукового контроля.

e-mail: dtikh@echoplus.ru

Пронин Виталий Владимирович



Научный сотрудник ООО «НПЦ «ЭХО+».

e-mail: pronin@echoplus.ru

Ромашкин Сергей Владимирович



Начальник лаборатории систем автоматизированного ультразвукового контроля для нефте- и газопроводов ООО «НПЦ «ЭХО+». Закончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. Ульянова (Ленина), к.т.н., II уровень по УЗ методу контроля. Научные интересы: разработка автоматизированных систем ультразвукового контроля.

e-mail: romashkin@echoplus.ru

Шнель Олег Оскарович



Старший мастер ОДМиТК Ленинградской АЭС.

e-mail: ojb-shoo@laes.ru

Самарин Павел Федорович



Руководитель группы, к. ф.-м. н., II уровень по акустическому методу НК.

e-mail: samarin@echoplus.ru

Штерн Андрей Михайлович



Начальник отдела информационных технологий.

e-mail: anst@echoplus.ru

СОДЕРЖАНИЕ

А.Х. Вовилки. Введение	3
А.Х. Вовилкин. Без истории нет будущего	4
В.Г. Бадалян, А.Х. Вовилкин. 25-летний опыт диагностики сварных соединений объектов повышенной опасности системами Авгур	15
В.Г. Бадалян, А.Х. Вовилкин. Радиография или ультразвук — что лучше?	26
В.Г. Бадалян, А.Е. Базулин, А.Х. Вовилкин. Методическое обеспечение приборов ультразвукового контроля, использующих метод синтезированной апертуры	33
Е.Г. Базулин, А.Х. Вовилкин, Д.С. Тихонов. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решётками	43
Е.Г. Базулин, А.Х. Вовилкин, Д.С. Тихонов. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 2. Повышение отношения сигнал/шум	57
А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, А.Х. Вовилкин, С.А. Коколев, Д.С. Тихонов. Применение метода фронтальной проекции в спектральном пространстве для ультразвукового контроля трубопроводов	71
А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, Ю.Л. Гордеев, В.Л. Козлов, С.А. Коколев, К.А. Кузнецов, С.В. Ромашкин, Д.С. Тихонов, А.М. Штерн. Система автоматизированного контроля АВГУР-АРТ — от искусства применения новых возможностей к практической диагностике	76
А.Х. Вовилкин, С.В. Ромашкин, Д.С. Тихонов. Опыт применения автоматизированного ультразвукового контроля технологических трубопроводов из аустенитных сталей взамен радиографического контроля на примере строительства комплекса каталитического крекинга ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез»	86
В.Г. Бадалян, А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, П.Ф. Самарин, Д.С. Тихонов. Разработка и аттестация методик АУЗК с использованием программного комплекса CIVА	92
А.Е. Базулин, Х. Бенитес, В.В. Пронин, Д.С. Тихонов, О.О. Шнель. Сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла и сварных швов	101
Е.Г. Базулин, А.Х. Вовилкин, Д.С. Тихонов. Сравнение изображений, восстановленных ФАР- и ЦФА-дефектоскопами	108
К.А. Кузнецов, Д.С. Тихонов. Сканирующие устройства автоматизированного УЗК	118

CONTENTS

A.Kh. Vopilkin. Introduction	3
A.Kh. Vopilkin. Without history there is no future	4
V.G. Badalyan, A.Kh. Vopilkin. 25 years of experience diagnosis welds high-risk facilities systems AUGUR	15
V.G. Badalyan, A.Kh. Vopilkin. Radiography or ultrasound – which is better?	26
V.G. Badalyan, A.E. Bazulin, A.Kh. Vopilkin. Methodological background of ultrasonic testing equipment using the method of synthetic aperture	33
E.G. Bazulin, A.Kh. Vopilkin, D.S. Tikhonov. Improved reliability of ultrasonic inspection. Part 1: Determine the type of discontinuity flaws during ultrasonic testing using antenna arrays. Improved reliability of ultrasonic inspection	43
E.G. Bazulin, A.Kh. Vopilkin, D.S. Tikhonov. Part 2. Improving the signal/noise ratio	57
A.E. Bazulin, E.G. Bazulin, A.Kh. Vopilkin, S.A. Kokolev, D.S. Tikhonov. Application of the frontal projection in the spectral space method for ultrasonic inspection of pipelines	71
A.E. Bazulin, E.G. Bazulin, U.L. Gordeev, V.L. Kozlov, S.A. Kokolev, K.A. Kuznetsov, S.V. Romashkin, D.S. Tikhonov, A.M. Stern. Application of the method frontal projection in the spectral space for ultrasonic inspection of pipelines	76
A.Kh. Vopilkin, S.V. Romashkin, D.S. Tikhonov. The experience of technological austenitic pipelines AUT in lieu of RT based on construction of catalytic cracking complex LLC «Nizhegorodnefteorgsintez»	86
V.G. Badalyan, A.E. Bazulin, E.G. Bazulin, P.F. Samarin, D.S. Tikhonov. Development and certification of ultrasonic inspection procedures with the use of software CIVA	92
A.E. Bazulin, H. Benites, V.V. Pronin, D.S. Tikhonov, O.O. Shnel. Continuous Ultrasonic Thickness Measurement of Main Metal and Welded Joints	101
E.G. Bazulin, A.Kh. Vopilkin, D.S. Tikhonov. Comparison of the images reconstructed by Phased Array- and DFA-defectoscope	108
K.A. Kuznetsov, D.S. Tikhonov. Scanning Devices for Automated Ultrasonic Testing	118

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ – 25 ЛЕТ Юбилейный сборник трудов

Под ред. А. Х. Вopilкина

Издательство «СВЕН»
Арт-директор *Д. В. Гаенко*
Дизайн, верстка, препресс *М. Е. Гольдфарб*

Подписано в печать **??.03.2015. Формат**

Печать офсетная

Тираж 1000 экз. Бесплатно

Отпечатано в типографии «L-PRINT»

Санкт-Петербург, ул. Сабиpовская, 37

Адрес

Издательство «СВЕН»
Россия, 197022, Санкт-Петербург
ул. Инструментальная, 3
Тел.: (812) 336-37-15, 336-37-16
<http://www.ndtworld.com>
e-mail: editor@ndtworld.com
dm@ndtworld.com