

На правах рукописи



БУЙ ВАН ДОНГ

**АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
МАЛОРАКУРСНЫМ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ**

Специальность:

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

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена на кафедре промышленной и медицинской электроники института неразрушающего контроля ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: Солдатов Алексей Иванович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Воробьев Николай Павлович,
д.т.н., профессор кафедры
«Электрификация производства и быта»
Алтайского государственного
технического университета

Тенитлов Евгений Сергеевич,
к.т.н., доцент кафедры «Электротехника,
диагностика и сертификация»
Сибирского государственного
университета путей сообщения

Ведущая организация: Томский государственный архитектурно-
строительный университет

Защита состоится «16» февраля 2016г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д212.269.09 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, пер. Савиных, 3, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «15» декабря 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доцент, к.т.н.

Васендина Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Теоретические исследования и практическое применение теневого метода в неразрушающем контроле с применением ультразвукового излучения известно давно. В основном, использование ограничивалось акустическим трактом, образованным одним излучателем и одним приёмником. Однако, начиная с семидесятых годов прошлого столетия, делались многочисленные попытки разработки и исследования аппаратуры, основанной на линейных антенных решётках. В работе Цехановского С.А. исследовался теневой акустический тракт, предназначенный для контроля резинотехнических изделий. Излучающая и приемная антенные решетки при этом располагались взаимно перпендикулярно, образуя пиксел изображения.

Дальнейшее развитие данный метод получил в работах Макарова В.С. Он использовал этот подход для контроля колец железнодорожных подшипников с целью обнаружения областей пережогов при термообработке колец. Основным преимуществом предлагаемых решений являлась только высокая производительность контроля по сравнению с одиночным каналом. Ограничение вычислительных ресурсов электроники не позволяли определять глубину залегания дефектов.

Активное совершенствование теневого метода контроля началось с внедрением реконструктивной томографии, вычислительный аппарат которой основан на преобразовании И. Радона. Самые значительные достижения наблюдаются в медицинской диагностике, основанной на рентгеновской томографии. В ультразвуковом неразрушающем контроле применение реконструктивной томографии, основанной на преобразовании И.Радона, используется не так широко, что обусловлено вполне объективными обстоятельствами. В первую очередь, это сложности получения необходимого набора проекций. Зачастую возможность получения необходимого набора проекций ограничена размерами и конфигурацией контролируемого изделия и антенной решетки. Например, весьма эффективен теневой контроль для исследования многослойных композиционных материалов. Однако их плоскостная конфигурация вообще исключает почти все проекции кроме проекций по нормали к поверхности за исключением малоракурсных.

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

состоит в анализе возможностей акустической томографии именно в таком, втором значении.

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

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

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

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

Методы исследований. Для решения основных задач диссертации использовано компьютерное моделирование на основе метода обратных проекций и теории дифракции Кирхгофа. Экспериментальные же исследования выполнены с использованием метода физического эксперимента и последующей обработкой данных статистическими методами.

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

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

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

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

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

Практическая значимость.

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

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

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

Основные положения, выносимые на защиту:

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

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

3. Предельная чувствительность малоракурсного трансмиссионного дефектоскопа на основе эквидистантных линейных антенных решеток и обработкой первичной информации по методике обратных проекций является аналитической функцией, зависящей от геометрических характеристик акустического тракта и позволяющая детектировать дефект, с размером $0,9 \text{ мм}^2$ при использовании антенных решеток из 16 элементов и толщине образца 400 мм в центре зоны контроля.

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

Апробация работы и публикации.

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

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

Использование результатов работы

Результаты исследований и разработанные приборы используются на предприятии HSTM Vietnam construction consulting company, Вьетнам.

Публикации.

По результатам выполненных исследований опубликовано 9 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ и 5 докладов и тезисов в материалах Международных и Всероссийских научных конференций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 145 страниц, 77 рисунков и 5 таблиц. Обзор литературных источников содержит 100 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, обозначено современное состояние исследований малоракурсной ультразвуковой томографии при теневом методе контроля, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведена характеристика современных полимерных композитных материалов (ПКМ) которые широко применяются в различных сферах народного хозяйства. В настоящее время для разных задач техники создается огромное количество композитов, основное технологическое преимущество которых заключается в процессе одновременного получения и материала, и конструкции. Кроме того, такие композиты обладают высокой удельной прочностью (3500 МПа), жесткостью (модуль упругости в композиционных материалах колеблется от 130 до 240 ГПа), износостойкостью, легкостью и усталостной

прочностью. Следует заметить, что разные композиты, как правило, имеют разные преимущества, т.к. довольно сложно добиться одновременного получения нескольких характеристик высокого уровня. Несмотря на то, что композиционные материалы имеют множество положительных сторон, у них есть и масса крупных недостатков, которые сдерживают их распространение. Среди них можно отметить наличие дефектов при производстве и появление дефектов в процессе эксплуатации, плохую повторяемость свойств ПКМ от образца к образцу, низкую ударную вязкость, что приводит к высокой повреждаемости изделий из композиционных материалов при эксплуатации, большой удельный объем, гигроскопичность, выделение токсичных паров при эксплуатации. Кроме того, такие материалы обладают низкой эксплуатационной технологичностью, низкой ремонтпригодностью и высокой стоимостью эксплуатации. Как правило, готовые изделия из композиционных материалов не подлежат модернизации и ремонту. При классификации наиболее опасных дефектов их разделяют на четыре группы. К первой группе относится низкая степень отверждения связующего при формовании, хотя в практике этот вид дефекта встречается довольно редко, так как является следствием грубых нарушений технологического процесса производства. Чаще встречаются дефекты типа расслоений, трещин и локальных несоответствий норме состава материала.

Традиционно результаты контроля при трансмиссионном методе отображались в виде теневой картины зоны контроля. Это не позволяло определять глубину залегания дефекта. Этот недостаток устраняется путем применения ультразвуковой томографии, когда можно получать изображение внутренней структуры, что очень широко используется в рентгеновской томографии. А вот исследования по применению ультразвуковой томографии в теневом методе контроля практически отсутствуют. Это связано с особенностями получения первичных данных с различных ракурсов, что является сложной задачей с учетом обеспечения хорошего акустического контакта. Однако, в последнее время стали появляться работы по малоракурсной рентгеновской томографии, когда угловое отличие ракурсов не превышает 90 градусов. Применение этого подхода возможно и в акустике с использованием акустических многоэлементных решеток, одна из которых работает в режиме излучения, а другая в режиме приема.

Для контроля композиционных материалов в настоящее время применяют различные методы: термографию, рентгеновский метод и ультразвуковой. Наиболее перспективно применение термографии для контроля сотовых конструкций, толщина композитного материала в которых не превышает 10 мм. Рентгеновские методы позволяют контролировать только нарушения упорядоченной структуры композитных материалов. Ультразвуковые эхо-методы позволяют

контролировать только небольшие толщины, как, впрочем, резонансный, импедансный, велосиметрический методы и метод свободных колебаний. Для контроля дефектов в композиционных материалах с большой толщиной используют теневой метод. Теневой метод дефектоскопии наиболее предпочтителен т.к. может обнаруживать более мелкие дефекты при больших толщинах заготовки. Наиболее часто он используется для обнаружения расслоений, инородных включений, раковин и пр. дефектов.

Многие мировые производители ультразвуковой дефектоскопической аппаратуры выпускают современные ультразвуковые дефектоскопы, позволяющие контролировать композиционные материалы. Однако все они имеют недостатки. Во-первых, приборы, позволяющие определять глубину залегания дефекта не позволяют контролировать изделия толщиной более 20 мм. Во-вторых, приборы, которые позволяют контролировать изделия толщиной более 20 мм не позволяют определять глубину залегания дефектов. Выявление глубины залегания дефекта с целью устранения нарушений в технологическом процессе является важной народнохозяйственной задачей. Поэтому возникла необходимость исследовать возможности малоракурсной ультразвуковой томографии для контроля композиционных материалов, определить предельные технические характеристики метода и выполнить техническую реализацию действующего макетного образца прибора.

Во второй главе проведено теоретическое исследование малоракурсной ультразвуковой томографии при теневом методе контроля с использованием акустических решеток. Термин «малоракурсная» по отношению к томографии может иметь два значения. Во-первых, это может означать, что имеется всего две проекции, которые сдвинуты на угол 90° . Во-вторых, это может отражать ситуацию, когда имеется ограниченный набор проекций, причём диапазон углов, под которыми они получены, составляет значительно меньше 90° . Именно такое положение возникает при контроле многослойных композиционных материалов. Задача исследования состоит в анализе возможностей акустической томографии именно в таком, втором значении. На рис. 1 показан акустический тракт для теневого метода контроля с использованием акустических антенных решеток.

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

$$(x_n - x_i)(y_j - y_i) = (x_j - x_i)(y_n - y_i), \quad (1)$$

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

Однако количество лучей, проходящих через различные области объекта контроля, будет различным. Результаты расчета количества лучей

через различные области прямоугольного объекта контроля приведены на рис.2.

При расчете были выбраны следующие параметры: расстояние между соседними излучателями в антенной решетке равно 10 мм, расстояние между приемной и излучающей антенными решетками $h=400$ мм, расстояние между соседними приемниками в антенной решетке равно 10 мм, размер излучателя равнялся размеру приемника и составлял 6 мм.

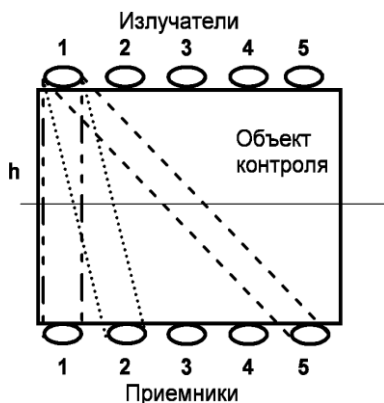


Рис. 1. Акустический тракт теневого метода контроля с использованием акустических антенных решеток

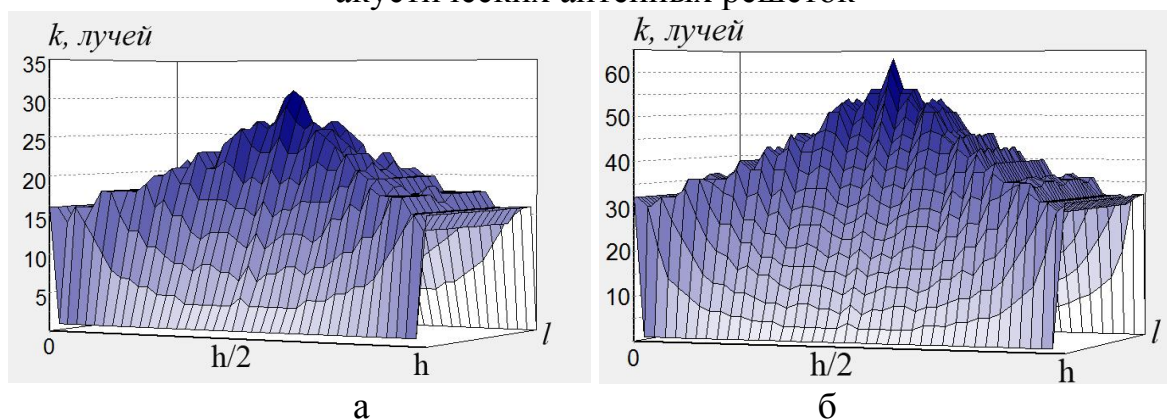


Рис.2. Распределение количества лучей, проходящих через различные зоны объекта контроля, а – количество элементов в антенной решетке равно 16, б – количество элементов в антенной решетке равно 32, l –длина антенной решетки

При указанных параметрах в центре зоны контроля количество лучей составляет 31, на краях зоны контроля на той же глубине (слева и справа от центра) – 1 (рис.2.а). Из рисунка 2 видно, что количество лучей в центре зоны контроля существенно превышает количество лучей на краях зоны контроля. Кроме того, распределение количества лучей по зоне контроля крайне неравномерное, поэтому распределение амплитуды сигнала в зоне контроля будет также неравномерным даже при отсутствии дефектов. Это необходимо учитывать при реконструкции томографического изображения.

Для количественной оценки выявляемости дефектов при теновом ме-

тоде контроля используют коэффициент k_D , который определяется отношением амплитуды сигнала на приемнике при наличии дефекта к амплитуде сигнала на приемнике при отсутствии дефекта при неизменном зондирующем сигнале:

$$k_D = \frac{A_D}{A_0}, \quad (2)$$

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

Коэффициент k_D изменяется от 0 до 1, значение его тем меньше, чем больше дефект, и оно не зависит от номинального значения амплитуды сигнала A_0 . При моделировании будет использоваться коэффициент k_D , как основа для построения томографического изображения. Алгоритм работы акустического тракта основан на принципе: элементы излучающей решетки излучают последовательно один за другим, а все элементы приемной решетки принимают одновременно. В результате формируется множество, состоящее из n^2 данных измерения, где n – число элементов в антенной решётке. Условия функционирования моделируемого акустического тракта предполагают акустикогеометрическую нотацию траекторий излучения. На основании теории дифракции Кирхгофа и предположении о наличии абсолютно плоских волн в данном акустическом тракте можно утверждать, что дифракционный интеграл (интеграл Рубиновича) в области тени очень быстро стремится к нулю. Таким образом, данная модель акустического тракта справедлива для высокочастотного случая соотношения длины волны и периметра модели дефекта. Кроме того, следует подчеркнуть, что расстояние между излучателем и приёмником предполагается достаточно большим. Следовательно, пьезопреобразователи, составляющие антенные решётки, располагаются в зоне дифракции Фраунгофера, а их рабочая поверхность значительно меньше первой зоны Френеля. Это позволяет считать распределение ультразвукового давления на элементарном приёмном элементе равномерным, а амплитуду принятого сигнала прямо пропорциональной «озвученной» поверхности. Кроме того, линейный размер элементов решёток больше длины волны излучения. Поэтому каждая пара элементов излучатель-приемник формирует лучевую трубку, форма и размеры которой определяются элементами антенных решёток и расстоянием между приёмником и излучателем.

Моделирование томографической реконструкции теневого метода контроля состоит из двух этапов. Первый этап содержит процедуру создания множества нормированных сигналов приёмной антенны при условии расположения заданной модели дефекта в зоне контроля. Вторым этапом заключается в реконструкции по этим исходным данным двумерного томографического изображения. На первом этапе задается дефект в виде одного или двух дисков. Расположение его в декартовой системе

координат показано на рис.3. Очевидно, что дефект, закрывающий лучевую трубку пары элементов, влияет на амплитуду сигнала, принимаемого приемником, и амплитуда приемного сигнала линейно зависит от площади приемника незакрытой дефектом. Если дефект полностью закрывает лучевую трубку, то на приёмник не поступает сигнал, т.е. коэффициент $k_D = 0$, если дефект частично закрывает лучевую трубку, то коэффициент:

$$k_D = 1 - \frac{S_D}{S_0}, \quad (3)$$

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

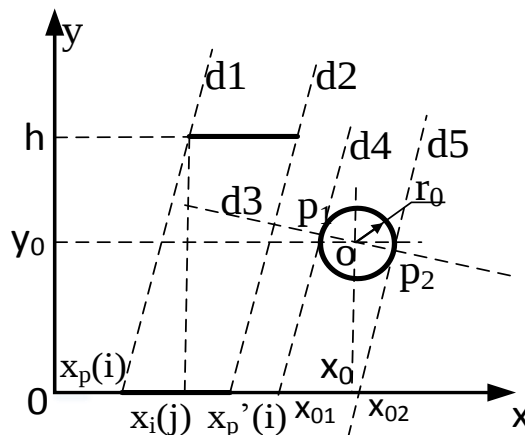


Рис.3. Акустический тракт с одним дефектом круглой формы
 d – размер пьезоэлементов, pd – количество пьезоэлементов в каждой решетке, h – расстояние между решетками, $k_D [i,j]$ – коэффициент пары: излучатель i и приемник j .

Если в лучевой трубке отсутствует дефект, то $k_D = 1$. Множество сигналов приёмной антенны рассчитывается в соответствии с выражением (3) с помощью методов аналитической геометрии. При расчете координат x_{01} и x_{02} возможны следующие случаи:

- Если $x_{01} > x_p'(i)$ или $x_{02} < x_p(i)$, то дефект не закрывает лучевую трубку пары излучатель j - приёмник i и $k_D(i, j) = 1$.

- Если $x_{01} \leq x_p(i)$ и $x_{02} \geq x_p'(i)$, то дефект полностью закрывает лучевую трубку пары излучатель j - приёмник i и $k_D(i, j) = 0$.

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

- Если $x_{01} \leq x_p(i)$ и $x_{02} \leq x_p'(i)$, то дефект частично закрывает лучевую трубку пары излучатель j - приёмник i и $k_D(i, j) = 1 - \frac{x_{02} - x_p(i)}{d}$.

- Если $x_{01} \geq x_p(i)$ и $x_{02} \geq x_p'(i)$, то дефект частично закрывает лучевую трубку пары излучатель j - приёмник i и $k_D(i, j) = 1 - \frac{x_p'(i) - x_{01}}{d}$.

Описанный выше алгоритм был реализован в виде моделирующей программы, которая позволяет задать несколько дефектов в зоне контроля.

Второй этап моделирования содержит процедуру реконструкции томографического изображения двумерной области, представляющей собой зону контроля между приёмной и передающей антенными решётками. Реконструкция основана на несколько модифицированном методе обратных проекций. Реконструктивная томография строится таким образом: контролируемая область, находящаяся в пространстве между решетками, разбивается на конечные элементы. Для декартовой системы координат удобно использовать квадраты, которые в дальнейшем играют роль пикселей изображения. Затем, методами аналитической геометрии, определяются все лучевые трубки, пересекающие данный элемент. Степень контрастности вычисляется путём суммирования коэффициентов k_d , найденных предварительно на предыдущем этапе моделирования. Как было показано выше, количество лучевых трубок, проходящих через различные области объекта контроля, будет различным, поэтому полученное множество данных нормируется к единице. Результаты компьютерных вычислений выводятся в графической форме, причём амплитудные значения представлены цветовой гаммой.

Интерфейс пользователя показан на рис.4. Графическая часть интерфейса разделена на две части. На верхней части отображается модель дефекта в виде диска в декартовой системе координат. Её размеры и положение полностью соответствуют выбранным исходным параметрам. На второй нижней части воспроизводится томографическое изображение, полученное в результате моделирования по методу обратных проекций. На рисунке видно, что изображение позволяет определять координаты дефекта.

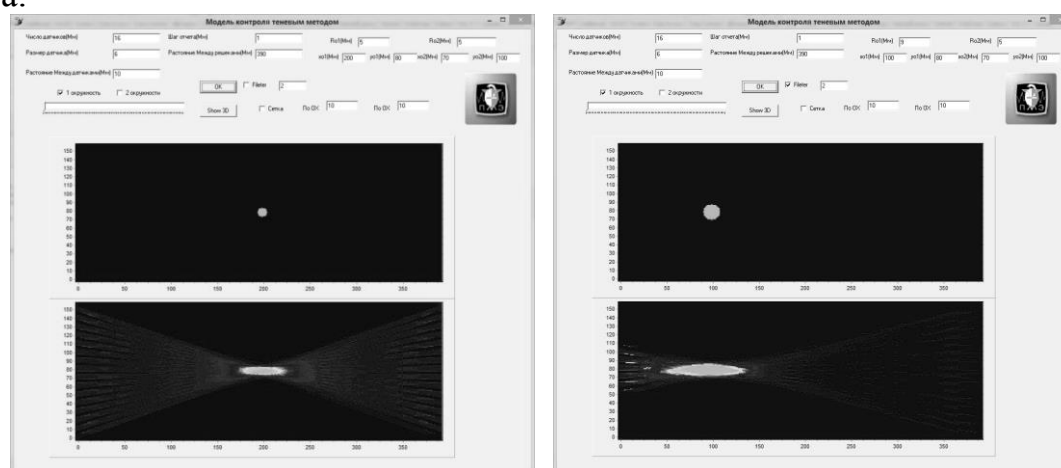


Рис. 4. Графический интерфейс программы моделирования.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению координат дефектов представлены на рис.5. Анализ графиков на рис.5 показывает, что малоракурсная ультразвуковая томография позволяет определять координаты залегания дефектов с погрешностью не

более 6% от толщины контролируемого объекта при использовании антенных решеток из 16 элементов.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяет сделать вывод о хорошем соответствии модели реальному акустическому тракту.

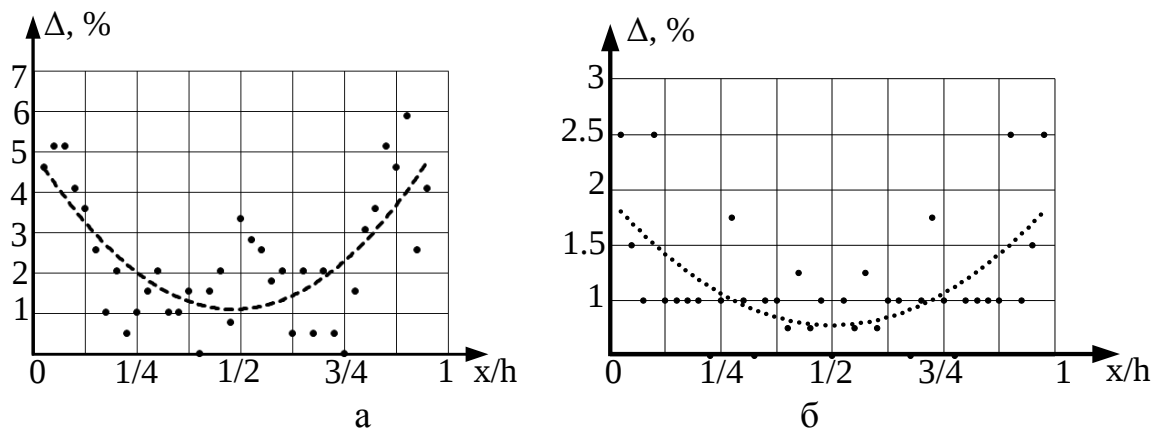


Рис.5. Зависимость погрешности определения координат залегания дефекта от его положения в зоне контроля

а – результаты экспериментальных исследований, б – результаты теоретических исследований

Разрешающая способность является одной из основных характеристик любого метода контроля. В случае томографического изображения, в отличие от традиционной теневой картины, добавляется ещё одно измерение, направленное вдоль акустических лучей. Способность фиксации двух дефектов отдельно именно в этом направлении требует дополнительных исследований. На рис. 6 показан акустический тракт с дефектом в виде черного круга, который имеет меньшие размеры, чем размеры пьезопреобразователей, составляющих эквидистантные антенные решётки. Считаем, что дефект полностью поглощает или отражает акустическое излучение, создавая "тень" на рабочей плоскости приёмной антенны. Дефект, попадая одновременно в несколько "лучевых трубок" создаёт зону, которая формируется их пересечением. Эта зона показана штриховкой. Она характеризуется максимальным уровнем сигналов, которые соответствуют выражению (3). Следовательно, реконструкция томографического изображения, основанная на методе обратных проекций, выделит эту область как зону возможного расположения дефекта. Таким образом, заштрихованный участок можно классифицировать как аналог функции рассеяния точки (PSF), но только для теневого метода контроля при использовании антенных решёток в качестве излучателя и приёмника излучения. Тогда, фронтальная и продольная разрешающие способности будут равны соответствующим размерам PSF. Анализ геометрических построений рис. 6 показывает, что фронтальная разрешающая способность равна, примерно, размеру элемента антенной решётки.

Продольная разрешающая способность, характеризующая качество томографического изображения, будет равна большей диагонали заштрихованной области. В данном случае качество изображения следует понимать как степень соответствия размера дефекта его реконструированному виду.

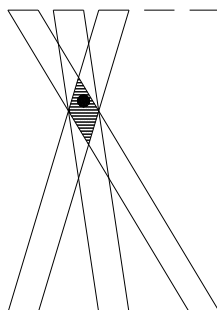


Рис.6. Формирование аналога PSF для теневого метода контроля.

Наименьшая величина продольной разрешающей способности R_y будет наблюдаться в центре зоны контроля и определяется выражением:

$$R_y = \frac{h \cdot d}{r \cdot (n - 1) + d} \cdot \quad (4)$$

Обозначения в формуле (4) соответствуют обозначениям, приведённым на рис. 3.

Отклонение дефектной зоны от центра акустического тракта приводит к ухудшению продольной разрешающей способности. Происходит это вследствие уменьшения числа ракурсов и снижения численных значений углов обзора. Другими словами, снижается количество активных элементов антенной решётки и её длина как бы уменьшается. Используя выражение (4) нетрудно установить зависимость продольной разрешающей способности при перемещении дефектной зоны от края решётки к её центру вдоль образующей. Весьма наглядным является графическое представление такой зависимости. На рис. 7 приведён график для следующих конкретных параметров акустического тракта: количество элементов $n=16$, размер элемента $d=6$ мм, расстояние между центрами элементов $r=10$ мм, расстояние между антенными решетками $h=400$ мм.

Дискретизованный вид зависимости связан с тем, что разрешение в пределах дефектной зоны неизменно. Отсчёт по оси абсцисс указан в миллиметрах и начало его совпадает с краем антенной решётки. Очевидно, что на данном графике зависимость охватывает область от начала до центра акустического тракта. Вторая половина будет полностью симметрична относительно центра.

График на рис. 7.а иллюстрирует характер изменения продольной разрешающей способности вдоль рабочей поверхности линейных антенных решёток. В ортогональном направлении, т.е. вдоль направления излучения аналогичная зависимость будет иметь несколько иной вид. Опуская

несложные вспомогательные геометрические построения, приведём конечный результат исследования зависимости продольной разрешающей способности в данном измерении. Эта зависимость показана на рис. 7.б.

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

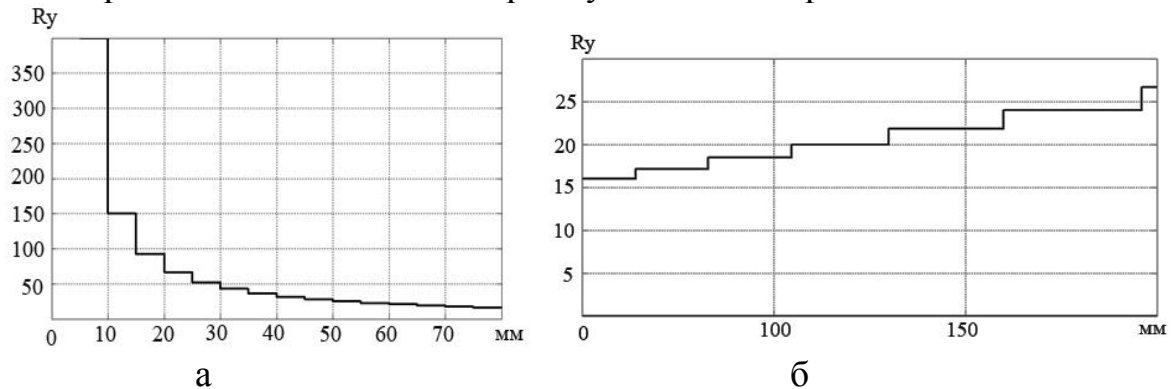


Рис.7. Зависимость разрешающей способности от положения в акустическом тракте.

Чувствительность системы контроля является одной из важнейших характеристик систем неразрушающего контроля. Определение чувствительности системы акустического контроля малоракурсным теневым методом проведем с использованием теории дифракции Кирхгофа, в соответствии с которой, луч попадающий в край препятствия будет распространяться во все стороны (рис.8).

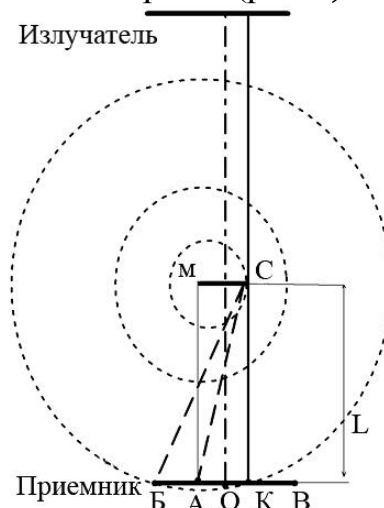


Рис.8. Дифракционная картина по методу Кирхгофа

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

$$A_{\text{рез}} = \int_B^A (F_{\text{пр}} + F_{\text{диф1}} + F_{\text{диф2}}) dx + \int_A^K (F_{\text{диф1}} + F_{\text{диф2}}) dx + \int_K^B (F_{\text{пр}} + F_{\text{диф1}} + F_{\text{диф2}}) dx \quad (5)$$

Решение выражения (5) для частного случая, когда расстояние между

излучающим и приемным преобразователями превышает пять длин ближней зоны а размеры дефекта меньше длины волны, было найдено в работе Баранова В.М.:

$$k_D = 1 - 4 \cdot S_D S_{пр} / (\lambda \cdot h)^2 \quad (6)$$

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

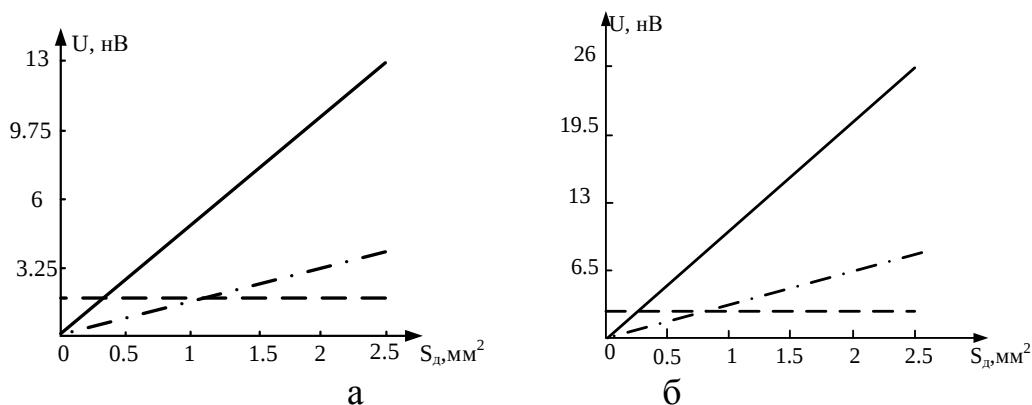
Выражение (6) не учитывает уровень шумов в электронном тракте системы контроля и при их наличии чувствительность будет определяться минимальным уровнем изменения полезного сигнала, который можно зафиксировать при данном уровне шумов при теневом контроле.

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

$$U_{пр} = \frac{U_{изл}}{l} \cdot k_{пр1} \cdot k_{пр2} \cdot e^{-\alpha l} \frac{S_{пр}}{S_0}, \quad (7)$$

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

На рис.9 представлены результаты расчета амплитуды сигнала на приемнике при наличии дефекта в соответствии с выражением (7).



Ри.9. Зависимость уменьшения амплитуды сигнала на приемнике от площади дефекта в зоне контроля, сплошная линия – на дистанции 30 см, штрихпунктирная линия - на дистанции 40 см., пунктирная линия – уровень шумов, а – количество элементов в антенной решетке равно 16, б – количество элементов в антенной решетке равно 32

Из рисунка 9.а видно, что при реконструкции изображения на дистанции 40 см удастся обнаружить дефект размером более 1,3 мм². Из

рисунка 9.б видно, что при реконструкции изображения на дистанции 40 см удается обнаружить дефект размером более $0,9 \text{ мм}^2$.

В третьей главе описана экспериментальная установка и представлены результаты экспериментов. В состав экспериментальной установки входят две эквидистантные антенные решетки с 16 пьезопреобразователями, иммерсионная ванна с жидкостью, блок электроники и персональный компьютер.

На рис. 10 приведены результаты экспериментальных исследований разрешающей способности при различных положениях дефектов в зоне контроля.

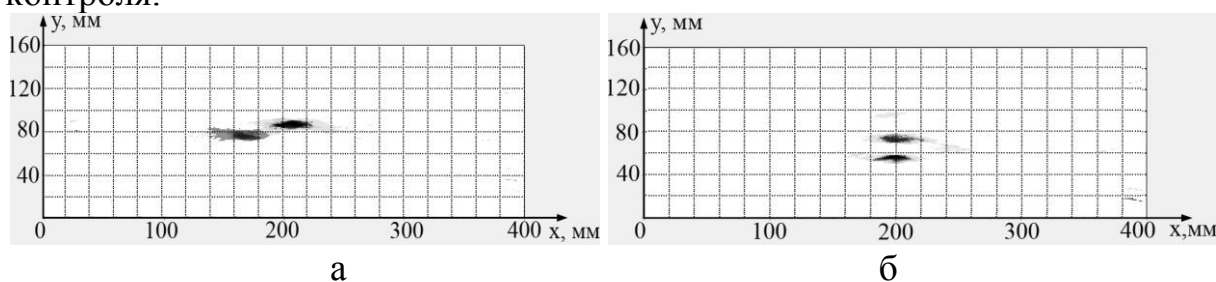
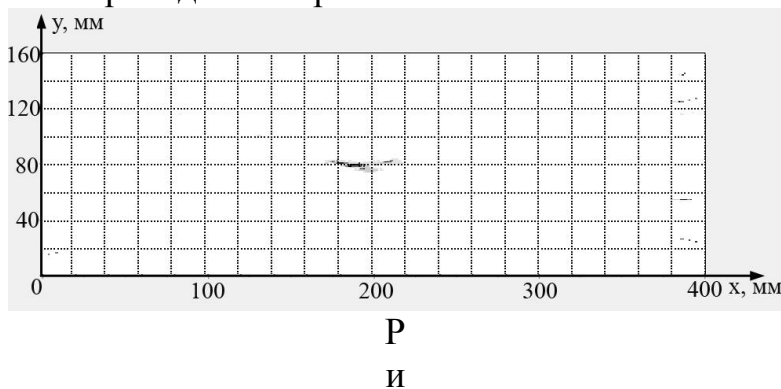


Рис. 10. Экспериментальная томограмма

Из рис. 10 видно, продольная разрешающая способность составляет 18 мм, а фронтальная – 16 мм, что соответствует результатам теоретических исследований.

Результаты экспериментальных исследований предельной чувствительности приведены на рис.11.



Из рисунка 11 видно, что реальная чувствительность системы контроля оказалась чуть выше. Это объясняется тем, что в расчетах использовались максимальные значения уровня шумов электронного тракта, который в зоне контроля с дефектом $0,9 \text{ мм}^2$ при расстоянии между антенными решетками 400 мм не превышает 10^{-10} В . Реальный уровень шумов не превышает 10^{-11} В .

Результаты экспериментальных исследований были использованы при разработке макетного образца многоканального малоракурсного акустического теневого дефектоскопа. Поэтому в разработанном дефектоскопе был реализован новый способ определения коэффициента k_d : при сканировании если путь сканирования достаточно длинный, то всегда будет такое положение антенных решеток, в которых в лучевой

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

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

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

После получения опорной матрицы $A_0(i, j)$, матрица коэффициентов для построения томографического изображения вычисляется по выражению 2.

С использованием многоканального малоракурсного акустического теневого дефектоскопа «Multi-channel acoustic shadow flaw detector» и предложенного подхода были проведены лабораторные испытания на композитах с искусственно изготовленными дефектами, предоставленных заказчиком. Результаты показаны на рис.12.

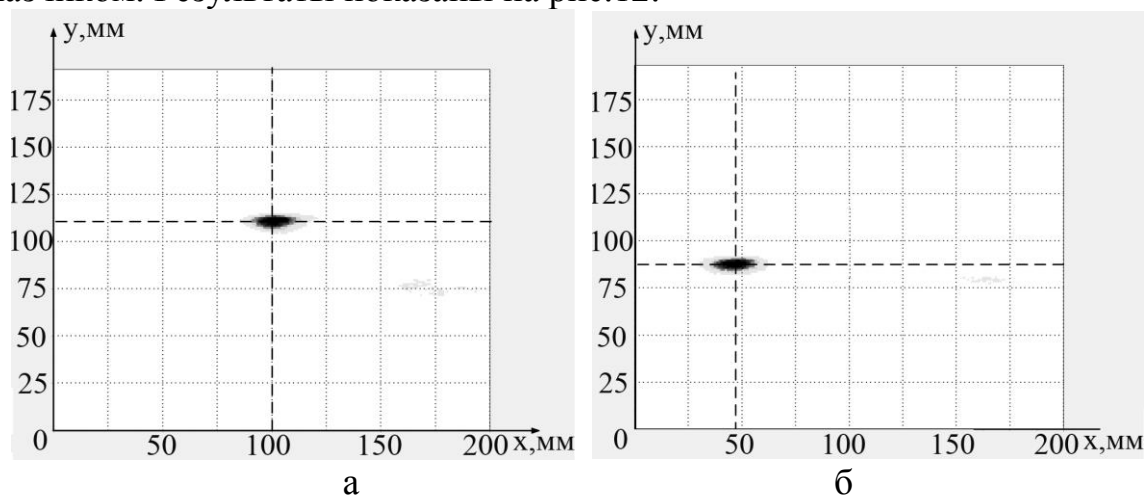


Рис.12. Результаты исследования определения глубины залегания дефекта в контролируемом объекте, а- двухслойный образец, б- многослойный образец.

Глубина залегания искусственного дефекта в двухслойном образце составила 100 мм, что соответствует результатам испытаний. Глубина залегания искусственного дефекта в многослойном образце составила 50 мм, по результатам испытаний глубина составила 47 мм, что входит в 10% погрешность прибора.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

В приложении приведены результаты внедрения проведенных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполненной работы получила дальнейшее развитие теория малоракурсной ультразвуковой томографии, основанная на методе обратных проекций. На основе созданной модели проведен анализ предельной чувствительности, разрешающей способности и точности определения координат залегания дефектов в объекте контроля. Проведенный анализ показал, что наивысшая чувствительность и разрешающая способность наблюдаются вблизи антенных решеток, а точность определения координат дефектов – в центре зоны контроля.

Получил дальнейшее развитие теневой метод контроля, основанный на применении многоэлементных акустических антенных решеток, позволяющий определять глубину залегания дефектов.

Для повышения качества реконструируемого томографического изображения предложен, исследован и внедрен алгоритм реконструкции томографического изображения с автоматической калибровкой всех каналов системы контроля.

Разработанный прибор был внедрен в республике Вьетнам на предприятии HSTM Vietnam construction consulting company, где получил высокую оценку потребителей.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в центральных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Д.В.Буй. Трехмерная реконструкция объектов контроля методом SAFT во временной области с использованием корреляционной функции / Д.В.Буй, А.И. Солдатов, Д.А. Солдатов, Е.С. Хаскова. // Контроль. Диагностика. 2014, №13, с 128-132.
2. Д.В.Буй. Система количественного учета жидких продуктов в герметичных резервуарах / Д.В.Буй, П.В. Сорокин, А.И. Солдатов, Д.А. Солдатов, Е.С.Хаскова, К.Г.Квасников. // Контроль. Диагностика. 2014, №13, с 136-141.
3. Д.В.Буй. Моделирование акустического тракта для малоракурсной ультразвуковой томографии при теневом контроле / В.Д. Буй, В.С. Макаров, А.И. Солдатов, А.А. Солдатов. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015, №12, с 216-220.
4. D.V. Buy. Resolution of the Acoustic Synthetic Aperture Array / D.V. Buy, V.S. Makarov, A.I. Soldatov, A.A. Soldatov, K.G. Kvasnikov. // Journal of Nondestructive Evaluation. 2016, (в печати).

Публикации в других изданиях

5. Буй Ван Донг, Исследование разрешающей способности системы контроля по методу SAFT / Буй Ван Донг; науч. рук. А. И. Солдатов // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов

и молодых ученых, Томск, 15-19 апреля 2013 г. в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2013. — Т.1. — [С. 133-134].

6. Буй Ван Донг, Трехмерная реконструкция объектов контроля методом SAFT / Буй Ван Донг; науч. рук. А. И. Солдатов // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 24-26 апреля 2013 г. в 2 т. / Ассоциация иностранных студентов в России (АИС); Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт международного образования и языковой коммуникации (ИМОЯК). — 2013 . — Т. 1 . — [С. 173-177]

7. Буй Ван Донг, Трехмерная реконструкция объектов контроля методом SAFT в временной области / Буй Ван Донг; науч. рук. А. И. Солдатов // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14-18 апреля 2014 г. в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2014 . — Т. 3 . — [С. 72-73].

8. Буй Ван Донг, Программа для трехмерной реконструкции объектов контроля методом SAFT во временной области/ Буй Ван Донг // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г.Томск, 23-24 апреля 2014 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт кибернетики; ред. кол. А. В. Лиепиныш и др. — Томск; Изд-во ТПУ , 2014 . — [С. 73-76]

9. Буй Ван Донг, Применение линейной фазированной решетки для трехмерной реконструкции объектов контроля методом SAFT во временной области/ Буй Ван Донг; науч. рук. А. И. Солдатов // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 23-25 апреля 2014 г. в 3 т. / Ассоциация иностранных студентов в России (АИС); Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт международного образования и языковой коммуникации (ИМОЯК). — 2014 . — Т. 1 . — [С. 97-103]