

На правах рукописи

Солдатов Алексей Иванович

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АППАРАТУРА С ВОЛНОВОДНЫМ
АКУСТИЧЕСКИМ ТРАКТОМ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Евтушенко Геннадий Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Тимошенко Владимир Иванович

доктор технических наук Воробьев
Николай Павлович

доктор технических наук, профессор
Смирнов Геннадий Васильевич

Ведущая организация: Институт физики прочности и материаловедения сибирского отделения
Академии наук РФ

Защита состоится 24.05.2011 г. в 15-00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212 269 09 при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу Россия, 634028, г.Томск, ул.Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу г.Томск, ул.Белинского, 55.

Автореферат разослан « » апреля 2011 г.

Ученый секретарь Совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
Д 212 269 09, к.т.н., доцент

Б.Б.Винокуров

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Ультразвуковая технология – одна из немногих технологий, позволяющая проводить измерения в любых средах: твердых телах, жидкостях и газах. Поэтому ультразвуковые измерительные приборы: уровнемеры, глубиномеры, газоанализаторы, расходомеры, термометры, дефектоскопы, толщиномеры, измерители длины труб, измерители внутренних каналов артиллерийских стволов и плотномеры получили очень широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства. Объясняется это тем, что ультразвуковые приборы имеют ряд существенных преимуществ перед остальными средствами измерения. Когда при выборе того или иного метода измерения в качестве приоритетных ставятся такие критерии, как высокая точность, повторяемость, простота калибровки, то предпочтение, как правило, отдают именно ультразвуковому методу. Интенсивное развитие промышленности и энергетики в сочетании с наблюдающимся уменьшением мировых запасов нефти и газа подталкивают производителей во всем мире к дальнейшему совершенствованию средств учета расхода жидких и газообразных сред и, соответственно, к развитию мирового рынка этих средств. Поэтому задачи последующего повышения эффективности ультразвукового метода, в частности, точности, актуальны и по сей день, особенно, когда речь идет об измерении очень дорогих сегодня энергоресурсов. Перспективы повышения точности измерений в основном кроются в особенностях метода измерений и технологии производства приборов, реализующих этот метод.

Традиционным методом, применяемым для повышения точности акустических измерений, является повышение частоты ультразвуковых колебаний. Однако такой способ не всегда является приемлемым, т.к. затухание ультразвуковых колебаний в некоторых средах резко возрастает с увеличением частоты. Поэтому в последнее время стали развиваться методы обработки акустических сигналов, позволяющие существенно повысить точность измерения. Классический метод определения времени прохождения УЗ импульса основывается на использовании триггера для формирования так называемых «временных ворот» и подсчете количества импульсов в цуге, соответствующем определяемому времени. Начало измеряемого интервала устанавливается по переднему фронту возбуждающего импульса, окончание определяется в момент равенства опорного напряжения и мгновенного значения напряжения ультразвукового импульса, подаваемых на входы порогового устройства. Главным недостатком этого метода является наличие большого, неконтролируемого интервала времени между началом ультразвукового импульса и срабатыванием порогового устройства, особенно сильно проявляющемся при волноводном распространении ультразвукового импульса, когда изменяется не только его амплитуда, длительность, но и крутизна огибающей переднего фронта. Такие изменения носят случайный характер, так как параметры среды, заполняющей волновод, как правило, не являются постоянными. Дневные и сезонные колебания температуры и влажности, расслоение жидких продуктов при длительном хранении на фракции, смешивание нефтепродуктов одного сорта, но разных производителей, наличие градиента акустического импеданса среды по сечению волновода

все это приводит к изменению скорости распространения ультразвука в контролируемой среде и соответственно к изменению интерференционной картины поля внутри волновода. В свою очередь это приводит к изменению неконтролируемого интервала времени между началом ультразвукового импульса и срабатыванием порогового устройства и соответственно к невозможности учета этого временного интервала при калибровке.

Таким образом, существует актуальная задача, заключающаяся в необходимости повышения точности ультразвуковых локационных устройств, акустический тракт которых представляет собой волновод круглого сечения.

Значительный вклад в развитие теории волноводного распространения внесли такие известные ученые как Стретт Дж. В. (лорд Рэлей), Lamb W.E., Bergman E. I., Мэзон У.П., Завадский В.Ю., Молотков Л.А., Моллюженец Г.Д., Lee D., Hardin R.H., Kennet B.L., Haskell N.A. и другие.

Вместе с тем, несмотря на определенные успехи в этом направлении, проблема низкой точности ультразвуковых локационных устройств с волноводным акустическим трактом, вызванная многомодовым характером распространения ультразвуковых колебаний, а также отсутствием научно обоснованных методов точного определения времени распространения акустических колебаний в волноводном акустическом тракте продолжает оставаться актуальной. Разобщенность выполняемых в данном направлении исследований, безусловно, снижает тот эффект, который уже получен от внедрения законченных научно-исследовательских работ. Поэтому необходимость разработки новых методов обработки эхо-сигналов, распространяющихся в ограниченных средах, является требованием сегодняшнего дня.

Целью диссертационной работы является создание высокоточных ультразвуковых локационных устройств путем оптимизации параметров акустического тракта и разработка новых методов и технических средств для высокоточного определения временной координаты начала эхо-импульса.

Для достижения поставленной цели исследований необходимо решить следующие **основные задачи**:

1. Определить технические и эксплуатационные требования, предъявляемые к ультразвуковым локационным устройствам с волноводным акустическим трактом.
2. Исследовать распространение акустических импульсов в круглых волноводах:
 - с постоянным акустическим импедансом;
 - с градиентным характером распределения акустического импеданса по радиусу волновода;
 - при вводе колебаний с боковой поверхности волновода.
3. Разработать новые методы обработки акустических сигналов для повышения точности измерения.
4. Осуществить аппаратную реализацию способов точного определения временного положения (момента прихода) акустического эхо-импульса.

5. Создать действующие образцы ультразвуковых локаторов для решения задач ультразвуковой локации и акустического управления внутритрубными устройствами.

Методы исследования. Для решения основных задач диссертации использованы метод геометрической акустики, принцип Гюйгенса-Френеля, решение волнового уравнения в приближении Кирхгофа в виде интеграла Гюйгенса-Рэлея при анализе волноводного распространения акустических колебаний, метод численного решения трансцендентных уравнений, метод Крамера. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием метода физического эксперимента с последующей обработкой данных статистическими методами, основанными на использовании соотношений Стьюдента обеспечивающие всестороннее исследование вопросов создания высокоточных ультразвуковых локационных устройств.

Научная новизна работы.

1. Впервые на основе анализа волноводного распространения ультразвуковых колебаний методом геометрической акустики получены аналитические выражения:

- позволяющие численным методом рассчитать объемное распределение акустического поля внутри волновода для сред с постоянным акустическим импедансом как для непрерывного, так и для импульсного режима с учетом характеристик излучателя;
- позволяющие определить траекторию акустического луча и время распространения волны в средах с градиентным характером изменения акустического импеданса. Впервые проведен анализ возникновения погрешности в определении времени распространения сигнала, обусловленной несоосным расположением излучателя и приемника, что позволяет оценить погрешность в определении твердости материала изделий.

2. Впервые показано непостоянство групповой скорости распространения ультразвуковых колебаний по длине волновода, обусловленное специфическим механизмом ввода упругих колебаний в волновод на основе исследования характера распределения акустического поля в круглом волноводе для сред с постоянным акустическим импедансом при вводе колебаний с боковой поверхности волновода.

3. Предложены новые способы ультразвуковой локации внутритрубных устройств с активным ответом при вводе колебаний с боковой поверхности волновода, защищенные патентами РФ №2392641 и №2315335.

4. Для сред с градиентным характером распределения акустического импеданса по радиусу волновода создана модель для расчета акустического поля и предложен метод ультразвукового контроля на примере металлических изделий цилиндрической формы, прошедших термообработку.

5. Впервые предложены новые способы определения временного положения начала эхо-импульса, защищенные патентами РФ :

- способ, основанный на зависимости длительности импульсов на выходе порогового устройства от амплитудного значения сигнала в соответствующем периоде для длин волн более 50 мм, позволяющий существенно

уменьшить погрешность измерения (для предложенных технических решений в три раза при условии использования первых трех импульсов на выходе компаратора по сравнению с традиционным методом), защищенный патентом РФ №2389982,

- способ, основанный на аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом первой степени для длин волн менее 1 мм, позволяющий уменьшить погрешность измерения (для предложенных технических решений в два раза при отношении амплитуд опорных напряжений пороговых устройств в диапазоне 0.1...0.4 по сравнению с традиционным), защищенный патентом РФ №2358243,
 - способ, основанный на аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом второй степени для длин волн от 1 до 50 мм, позволяющий существенно уменьшить погрешность измерения (для предложенных технических решений в три раза при условии получения не менее 5 отсчетов за период принимаемого сигнала по сравнению с традиционным), защищенный патентом РФ №2380659.
6. Созданы устройства обработки акустических сигналов, защищенные патентами РФ: №75034, №2396521, №2384822 и ультразвуковые локаторы, защищенные патентами РФ: №2253093, №48629, №47098, №71450, №86759, №87543, №87494.

Практическая значимость результатов исследований. Результаты проведенных исследований позволили развить теорию волноводного распространения с использованием метода геометрической акустики для решения трехмерных задач и численного решения трансцендентных уравнений для волноводов круглого сечения при вводе колебаний с боковой поверхности волновода и для волноводов с градиентным характером распределения акустического импеданса по радиусу волновода.

Создан макетный образец ультразвукового локатора внутритрубных устройств, нашедший практическое применение в ООО «НПП ТЭК», г.Томск.

Опытная партия ультразвуковых уровнемеров, с применением метода огибающей для определения временного положения эхо-импульса, выпущена на предприятии ОАО «НПЦ «ПОЛЮС», г.Томск, ультразвуковой уровнемер установлен в резервуаре котельной ООО «Городская типография», г.Томск, в форфасном цехе ОАО «Томское пиво», на АЗС №32 г.Томска.

Ультразвуковой измеритель твердости роликов железнодорожных подшипников после термообработки используется на ООО «Степногорский подшипниковый завод», республика Казахстан.

Ультразвуковой скважинный глубиномер прошел успешные испытания на предприятии ОАО «Евразруда» Таштагольский филиал», г.Таштагол.

Ультразвуковой газоанализатор-расходомер бинарных газов внедрен в Сибирском государственном медицинском университете, г.Томск.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре промышленной и медицинской электроники Томского политехнического университета в курсах «Электронные промышленные устройства» и

«Применение ультразвука в технике и медицине», а также при подготовке магистерских диссертаций.

Предложенные способы определения временного положения начала эхо-импульса позволили в несколько раз повысить точность измерения ультразвуковых локаторов.

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в соответствии с договорами: х/д 1-197/2002, х/д 1-171/2001, х/д 1-88/2000, х/д 1-138/2000, х/д 1-213/2001, х/д 12-173/2002 «К», х/д 4-1/2009, х/д 5-2/2009 и поддержана грантами ГК №1.314.2009, ГК 1.423С-2009, ГК 5.621С.2010.

Апробация результатов исследований.

Основные положения и результаты работы были доложены и одобрены на 25 конференциях и совещаниях:

- на международной конференции «Датчик-93», Барнаул, 1993,
- на научно-технической конференции «Физические методы и приборы неразрушающего контроля для технической и медицинской диагностики» Севастополь, 1993,
- на 13 международной конференции по неразрушающему контролю, Санкт-Петербург, 1993,
- на научно-технической конференции «Радиотехнические и информационные системы и устройства», Томск, 1994,
- на 2 международной конференции «Датчик-96», Барнаул, 1996.
- на V областной научно-практической конференции «Современная техника и технологии», Томск, 1999,
- на VI международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии», Томск, 2000,
- на VI международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск, 2000,
- на всероссийской научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 2003,
- на IX международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии СТТ'2003», Томск, 2003,
- на XII международной научно-практической «Современные техника и технологии СТТ'2006», Томск, 2006,
- на международной научно-технической конференции «МИС-2006», Таганрог, 2006,
- на всероссийской конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», Томск, 2008,
- на международной научно-технической конференции «МИС-2008», Таганрог, 2008,
- на VIII международной IEEE-Сибирской конференции по управлению и связи «SIBCON-2009», Томск, 2009,

- на всероссийской научно-технической конференции «Перспективы фундаментальной и прикладной науки в сфере медицинского приборостроения», Таганрог, 2009,
- на XV международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии СТТ-2009», Томск, 2009,
- на всероссийской конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», Томск, 2010,
- на международной научно-технической конференции «МИС-2010», Таганрог, 2010,
- на XVI международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии СТТ-2010», Томск, 2010,
- на международной научной конференции «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники», Шарм-Эль-Шейх (Египет), 2010,
- на международной научной конференции «Физические основы диагностики материалов и изделий, и приборов для ее реализации», г.Тюмень, 2010.
- на II международной конференции «Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений», г.Томск, 2010.

На защиту выносятся:

1. Модель волноводного акустического тракта на основе метода геометрической акустики для решения 3-х мерных задач, позволяющая исследовать амплитудно-фазовое распределение поля в поперечном сечении, рассчитать форму сигнала в любой его точке или интегрированный сигнал любой области, что позволяет прогнозировать результат применения излучателей и приёмников акустических колебаний практически любой конфигурации.

2. Способ ультразвуковой локализации внутритрубных устройств и его техническая реализация с использованием активного ответа, позволяющие определять координаты внутритрубного устройства с точностью не хуже $\pm 0,5\%$.

3. Модель волноводного акустического тракта с градиентом акустического импеданса среды, используемая при контроле качества термообработки металлических изделий цилиндрической формы, позволяющая определить траекторию и время распространения волн с использованием впервые полученных выражений. Для достижения погрешности измерения твердости в области требуемых эксплуатационных параметров (59...65 HRC), не превышающей 0,5%, необходимо обеспечить точность положения датчика на объекте контроля с погрешностью не более 10% от радиуса объекта контроля.

4. Новые способы определения временного положения начала эхо-импульса позволяющие:

- при использовании способа, основанного на зависимости длительности импульсов на выходе порогового устройства от амплитудного значения сигнала в соответствующем периоде для длин волн более 50 мм уменьшить погрешность измерения в три раза при условии применения первых трех импульсов на выходе компаратора;

- при использовании способа, основанного на аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом первой степени для длин волн менее 1 мм уменьшить погрешность измерения в два раза при отношении амплитуд опорных напряжений пороговых устройств в диапазоне $0,1 \dots 0,4$;
- при использовании способа, основанного на аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом второй степени для длин волн от 1 до 50 мм уменьшить погрешность измерения в три раза при условии получения не менее 5 отсчетов за период принимаемого сигнала.

5. Технические решения устройств компенсации погрешности измерения ультразвуковых локаторов.

6. Комплекс разработанных ультразвуковых локаторов для локации внутритрубных устройств.

Достоверность теоретических положений и выводов подтверждена результатами экспериментальных исследований, компьютерного моделирования и эксплуатации внедренных устройств в производственных условиях.

Публикации. По материалам проведенных исследований опубликовано 58 печатных работ, включая 12 статей, опубликованных в журналах по перечню ВАК РФ, 18 патентов РФ на изобретения и монографию. Полный список публикаций приведен в конце диссертации.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, основных выводов, библиографического списка из 202 источников и приложения. Общий объем диссертации составляет 291 страницу, включая 120 рисунков и 17 таблиц.

Содержание работы

Во введении к диссертации обоснована актуальность разработки высокоточных ультразвуковых локационных устройств, сформулированы цель, задачи и методы исследований, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость работы, а также отражены вопросы апробации и реализации полученных научных результатов. Приводится краткое содержание каждого из разделов.

В первой главе проведен анализ современного состояния проблемы повышения точности измерения ультразвуковых локационных устройств. Ситуация, которая складывается на сегодняшний день в связи с постоянным ростом цен на энергоресурсы, сырье, и соответственно на всю номенклатуру выпускаемой продукции, все более ужесточает требования к точности их коммерческого учета. Сегодня во всем мире возрастает не только спрос на средства измерения объема и расхода, но и требования к их метрологическим характеристикам. В связи с этим наблюдается повышение потребности в высококачественных средствах измерения, широко используемых на самых разных объектах — пищевой и нефте-химической промышленности, котельных и ТЭЦ, очистных сооружениях водоканалов, насосных станциях, водопроводных сетях и т.п..

Ориентировочная потребность в расходомерах *,

* С.И. Покрас. Ультразвуковая расходометрия: как и зачем повышать точность измерений. / Покрас С.И. и др. // Датчики и системы, 2007. — №7. — с. 2-9.

устанавливаемых на трубы диаметром более 300 мм, только по России составляет 5,5...6,5 тыс. в год. Из приемлемых по метрологическим показателям подходят лишь электромагнитные и ультразвуковые. Но электромагнитные расходомеры, как правило, на трубы диаметром более 300—400 мм не выпускаются в связи с резким усложнением конструкции и увеличением металлоемкости прибора. Поэтому альтернативы ультразвуковым приборам в этом сегменте рынка просто нет. Следует отметить, что согласно маркетинговым исследованиям рынок ультразвуковых измерительных приборов растет намного быстрее, чем рынки других типов приборов учета. Так до конца 2010 г., согласно исследованиям ARC Advisory Group (США), прогнозируется расширение рынка почти до 720 млн долл..

Аналогичная ситуация наблюдается и на рынке ультразвуковых уровнемеров, которые находят широкое применение в системах автоматизации производственных объектов нефтегазовой, нефтехимической, химической энергетической, металлургической, пищевой и других отраслей промышленности, что связано с их высокой надежностью в работе, бесконтактному способу и высокой точностью измерений. В настоящее время разработано множество схем и конструкций дискретных и непрерывных ультразвуковых уровнемеров, использующих особенности распространения упругих колебаний. Это методы локации через жидкость или газ, а также использование принципа волноводного распространения ультразвуковых волн по специальным волноводам или по стенкам сосудов.

Еще одна сфера применения ультразвуковых приборов с волноводным акустическим трактом – это акустические локаторы внутритрубных устройств магистральных нефтепроводов. Существующие в настоящий момент комплексы для определения координат внутритрубных устройств имеют высокую погрешность. В связи с этим разработка системы, объединяющей в себе высокую точность и большой радиус действия, является актуальной.

Еще одним классом ультразвуковых приборов, использующих волноводный акустический тракт являются скважинные глубиномеры, которые используются для исследования скважин и определения их глубины и состояния. Существующие в настоящее время акустические скважинные глубиномеры имеют малый диапазон измеряемых глубин и диаметров скважин, а так же высокую стоимость и массу приборов, которая не позволяет упростить работу маркшейдерской службы.

Таким образом, существует целый класс ультразвуковых приборов, акустический тракт которых представляет собой волновод круглого сечения. Однако точность измерения этих приборов остается довольно низкой. Повышение точности измерений ультразвуковых измерительных приборов возможно на основе оптимизации параметров акустического тракта: геометрических размеров волновода, выбора оптимальной частоты излучения, пространственного положения датчика, учета характеристик пьезокерамических датчиков. Поставленные задачи можно решить путем проведения анализа волноводного распространения акустических колебаний и получения пространственного распределения акустического поля внутри волновода.

В настоящее время задачи о звуковых полях в волноводах находят широкое применение в самых различных областях акустики, в том числе в волноводной технике, в гидроакустике, в строительной и архитектурной акустике и т.д. Как правило, такие задачи не имеют строгого решения, поэтому для нахождения волновых полей используются асимптотические и численные методы, часто дополняющие друг друга. Среди которых можно отметить:

- метод нормальных волн;
- матричный метод;
- метод сеток;
- метод геометрической акустики.

Метод нормальных волн предполагает решение волнового уравнения методом разделения переменных. Поле нормальных волн в цилиндрическом волноводе описывается суперпозицией частных решений волнового уравнения.

Метод сеток нашел основное применение для расчета акустического поля в морских и океанических волноводах для определения источника звука и его идентификации. Метод сеток заключается в замене области непрерывного изменения аргументов, в которой ищется решение уравнения, дополненного, если необходимо, краевыми и начальными условиями, дискретным множеством точек (узлов).

Не менее широкое распространение получил матричный метод, который заключается в том, что каждая упругая среда характеризуется определенной матрицей, а вся система описывается матрицей, получающейся при перемножении в определенном порядке характеристических матриц всех сред.

Весь ультразвуковой контроль основан на том, что вначале на излучатель подается электрический импульс возбуждения, который преобразует его в ультразвуковой сигнал и передает в исследуемый объект. Ультразвуковой сигнал взаимодействует с объектом, принимается приемником и анализируется отклик на выходе приемника в виде электрического сигнала. Поэтому считается, что все изменения акустического сигнала происходят только в объекте контроля. Считается, что при подаче электрического сигнала на пьезодатчик, толщинные колебания пластины происходят синхронно по всей поверхности. Однако на практике при изготовлении датчика боковые грани пьезопластины в той или иной мере связываются с корпусом или элементами крепления. Поэтому деформация пьезопластины происходит по более сложному закону. Исследуем поведение датчика при ударном возбуждении (этот режим используется наиболее часто). Аналогом колебаний датчика могут служить колебания круглой мембраны, края которой либо жестко закреплены, либо на краю мембраны действует упругая сила, пропорциональная величине отклонения мембраны. Рассмотренные варианты соответствуют краевым условиям задачи о колебании мембраны. Если $U(r,t)$ - амплитуда колебаний точек мембраны, то уравнение свободных колебаний мембраны с жестким закреплением краев будет иметь вид:

$$U_{tt} = c^2 \Delta U ,$$

где U_{tt} - вторая производная амплитуды колебаний по времени; c – скорость распространения изгибных колебаний; ΔU - оператор Лапласа;

при начальных условиях:

$$U|_{t=0} = A, \quad U_t|_{t=0} = 0,$$

и граничном условии:

$$U|_{r=b} = 0,$$

где A – остаточная амплитуда после снятия возбуждения; U_t – первая производная по времени; r – текущая координата по радиусу; b – радиус мембраны.

Для свободных колебаний мембраны с упругим закреплением краев изменяются только граничные условия:

$$G \cdot U_r|_{r=b} = K \cdot U|_{r=b} \Rightarrow U_r + H \cdot U|_{r=b} = 0,$$

где G – модуль сдвига; $G \cdot U_r$ – упругая сила; U_r – первая производная по радиусу.

Решение уравнения будет иметь вид:

$$U(r, t) = 2 \cdot A \cdot b \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_k^2} \cdot J_1(\alpha_k) \cdot J_0\left(\alpha_k \cdot \frac{r}{b}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha_k \cdot c}{b} \cdot t\right), \quad (1)$$

где α_k – положительные корни уравнения $J_0(x) = 0$.

Используя полученные значения корней, были проведены расчеты амплитуды продольных колебаний мембраны от времени. Результаты расчетов выражения (1) представлены на рис. 1.

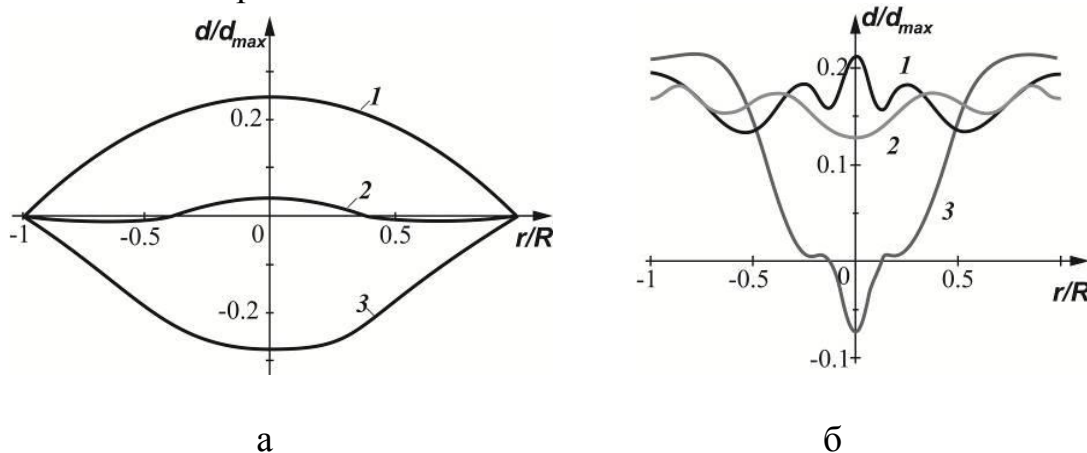


Рис. 1. Колебания мембраны: а – с жестко закрепленными краями, б – с упруго закрепленными краями; 1 – начало возбуждения, 2 – через 1/4 периода, 3 – через 1/2 периода

Полученные результаты можно использовать при анализе акустического поля, создаваемого датчиком в волноводе.

Экспериментальные исследования деформации поверхности пьезокерамических датчиков подтвердили правильность проведенных расчетов (рис. 2).

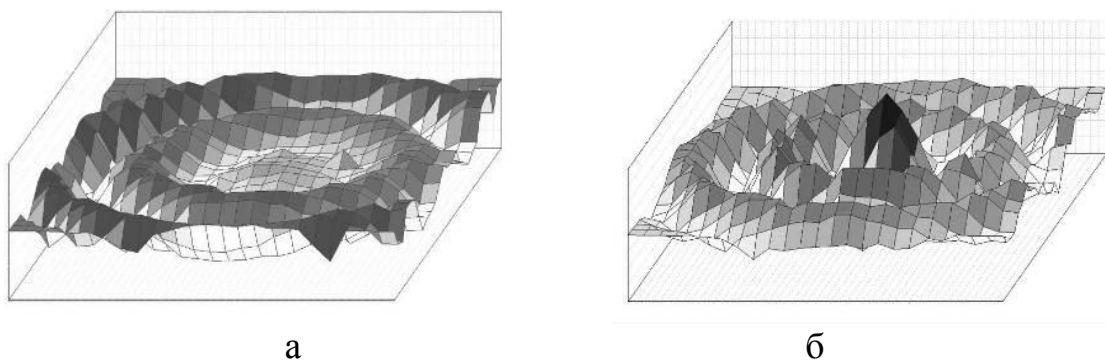


Рис. 2. Псевдообъемное изображение колебаний поверхности датчика: а – второй период, б– третий период

Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что точность измерения ультразвуковых приборов, акустический тракт которых представляет собой волновод круглого сечения, остается довольно низкой. Повышение точности измерений ультразвуковых измерительных приборов возможно на основе оптимизации параметров акустического тракта: геометрических размеров волновода, выбора оптимальной частоты излучения, пространственного положения датчика, учета характеристик пьезокерамических датчиков. Поставленные цели можно достичь путем проведения анализа волноводного распространения акустических колебаний и получения пространственного распределения акустического поля внутри волновода. Рассмотренные методы анализа акустического поля довольно трудоемки. Кроме того они не позволяют проводить анализ распространения акустических колебаний в средах с градиентным характером распределения акустического импеданса, в волноводах со щелью а также при вводе колебаний с боковой поверхности волновода. В большинстве случаев акустические задачи можно решить проще, пользуясь так называемой геометрической акустикой и понятием луча, а не волны. Геометрическая акустика исходит из законов отражения, преломления и независимости распространения акустических лучей.

Во второй главе проведено теоретическое исследование волноводного акустического тракта, на основе следующих исходных положений и принципиальных допущений:

1. Стенки волновода абсолютно жёсткие. Поперечное сечение постоянно на всём его протяжении и представляет собой круг. Длина волновода бесконечна, что исключает из анализа дифракционные процессы на краях.
2. Среда, заполняющая волновод, передаёт звук без потерь, является гомогенной, а все амплитудные изменения поля обусловлены только волновым характером распространения. Потери в конкретных средах как диссипативные, так и релаксационные могут быть учтены позднее вводом специальных коэффициентов.
3. Размеры излучателя превышают несколько длин волн, а сам он заключён в абсолютно жесткий экран, полностью заполняющий поперечное сечение волновода. В результате, поле может отличаться от нуля только в полупространстве волновода в направлении к приёмнику. Поверхность излучателя совершает

осциллирующие колебания, вектор смещения которых совпадает с осью волновода.

Сформулированные допущения являются, по существу, приближением Кирхгофа при решении волнового уравнения. Поэтому звуковое давление в произвольной точке волновода имеет вид:

$$p = \frac{j \cdot k \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \iint_S V \cdot \frac{e^{-jkr}}{r} \cdot dS, \quad (2)$$

где ρ – плотность среды; V – векторное распределение амплитуды колебательной скорости по поверхности излучателя; k – волновое число; S – площадь поверхности излучателя; r – расстояние от произвольной точки на поверхности излучателя до произвольной точки в полупространстве волновода.

Формула (2) является интегралом Гюйгенса – Рэлея и описывает зависимость звукового давления в произвольной точке волновода.

4. Суммарный сигнал аддитивно складывается из парциальных сигналов каждой точки поверхности приёмника. Приёмный пьезопреобразователь заключён в абсолютно жёсткий экран, совпадающий с поперечным сечением волновода. Следовательно, краевые дифракционные процессы отсутствуют и из дальнейшего анализа на данном этапе могут быть исключены. Электрический выходной сигнал пьезоэлектрического приёмника возникает в результате прямого пьезоэффекта. Опуская второстепенные составляющие, можно записать:

$$E = h \cdot U, \quad (3)$$

где E – напряжённость электрического поля, возникающая при воздействии звукового давления; U – механическое напряжение; h – пьезоконстанта материала датчика.

В общем случае все величины, входящие в уравнение (3), представляют собой тензоры соответствующего ранга. Однако для большинства применений волноводной локации решающее значение приобретает компонента, совпадающая по направлению с осью волновода. Поэтому будем полагать, что выражение (3) содержит только скалярные величины. Механическое напряжение в данном случае является звуковым давлением, представленным выражением (2), что вытекает из второго условия. Кроме того, будем полагать зондирующие воздействия такого уровня, который однозначно сохраняет линейность аналитических зависимостей (2) и (3). Возникающие в результате такого допущения погрешности не превышают величин второго порядка малости.

5. Определение акустического луча предполагает отсутствие геометрических параметров, кроме длины, а его распространение подчиняется принципу Ферма.

6. Механизм отражения и образования направленных лучей описывается законами Снелиуса. Количественные соотношения вычисляются с помощью формул Френеля для наклонного падения.

На основе метода геометрической акустики в поперечной проекции волновода была получена система уравнений для определения углов падения и отражения акустического луча на стенку волновода круглого сечения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tan a_1^2 + 4 \cdot \tan a_1 \cdot [R \cdot (\cos(2 \cdot a_1) + \sin(2 \cdot [a_1 + \alpha])) - r_i \cdot (\cos(a_1 + a_i) + \\ + \sin(a_1 + 2 \cdot \alpha + a_i))] + 2 \cdot R \cdot (\cos(2 \cdot [a_1 + \alpha]) - \sin(2 \cdot a_1)) + \\ + 2 \cdot r_i \cdot (\sin(a_1 + a_i) - \cos(a_1 + 2 \cdot \alpha + a_i)) = 0 \\ \tan \left(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - 2) + \frac{\pi}{2} \cdot (3 - n) \right)^2 + 2 \tan \left(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - 2) + \frac{\pi}{2} \cdot (3 - n) \right) \times \\ \times \left(R \cdot \cos \left(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - 2) + \frac{\pi}{2} \cdot (3 - n) \right) - r_p \cdot \cos a_p \right) \cdot (R \cdot \cos(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - \\ - 4) + \frac{\pi}{2} \cdot (4 - n)) - R \cdot \cos \left(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - 2) + \frac{\pi}{2} \cdot (3 - n) \right)) - (R \cdot \sin(a_1 + \alpha \times \\ \times (2 \cdot n - 4) + \frac{\pi}{2} \cdot (4 - n)) - R \cdot \sin \left(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - 2) + \frac{\pi}{2} \cdot (3 - n) \right)) \cdot (R \cdot \times \\ \times \sin \left(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - 2) + \frac{\pi}{2} \cdot (3 - n) \right) - r_p \cdot \sin a_p) \Big) / \Big((R \cdot \sin(a_1 + \alpha \times \\ \times (2 \cdot n - 4) + \frac{\pi}{2} \cdot (4 - n)) - R \cdot \sin \left(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - 2) + \frac{\pi}{2} \cdot (3 - n) \right)) \cdot (R \times \\ \times \cos \left(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - 2) + \frac{\pi}{2} \cdot (3 - n) \right) - r_p \cdot \cos a_p) + (R \cdot \sin(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - 2) + \\ + \frac{\pi}{2} \cdot (3 - n)) - r_p \cdot \sin a_p) \Big) \cdot \left(R \cdot \cos \left(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - 4) + \frac{\pi}{2} \cdot (4 - n) \right) - \\ - R \cdot \cos \left(a_1 + \alpha \cdot (2 \cdot n - 2) + \frac{\pi}{2} \cdot (3 - n) \right) \right) - 1 = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

где α_1 - угловая координата точки первого отражения; α - поперечная проекция угла падения; R - радиус волновода; n - количество отражений; r_p , α_p координаты приемника; r_i , α_i - координаты излучателя.

Неизвестными величинами в полученной системе являются α_1 и α . Очевидно, что такая система, состоящая из двух трансцендентных уравнений, не имеет аналитического решения при наличии двух и более отражений.

Качественный анализ второго уравнения системы позволяет сделать важный вывод, что оно может иметь не более 2^n решений. Следовательно, акустический луч, исходящий из точки излучателя и заканчивающийся в точке приемника, может иметь 2^n различных траекторий. Единственно возможным способом решения полученной системы уравнений является численный метод. Для его реализации предлагается следующий алгоритм вычислений.

1. Задаём произвольное множество значений a_1 в виде вектора порядка n .
2. Задаём произвольное множество значений α в виде вектора порядка m .
3. Записываем исходную функцию в виде разности левых частей уравнений, входящих в систему (4).
4. Рассчитываем множество значений исходной функции в виде матрицы порядка $n \times m$.
5. Определяем комбинации значений a_1 и α , которые определяют моменты перехода этой функции через нулевое значение.

Рассчитанные пары значений a_1 и α полностью определяют поперечную проекцию хода лучей в волноводе.

Начальными условиями численного анализа являются координаты точек, лежащих на поверхности излучателя и приёмника, а также количество отражений луча в волноводе. Значения величин m и n определяют точность расчетов угловых параметров a_1 и α соответственно.

Вычисление интеграла (2) по поверхности излучателя возможно только численными методами. Замена операции интегрирования операцией суммирования приводит к появлению погрешности расчета, называемой погрешностью дискретизации. Для ее оценки предложен способ, основанный на анализе результатов вычислений, выполненных с различным количеством разбиений. Последовательно увеличивая число разбиений участков поверхности излучателя и производя вычисления, получаем набор значений составляющих сходящийся ряд, из которого определяем количество разбиений, задаваясь допустимой погрешностью расчета.

Суммирование ряда гармонических колебаний одной частоты, но разных фаз целесообразно производить методом квадратур. В комплексной форме это выражение принимает вид:

$$P(t) = V_i \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sin(k \cdot r_i)}{r_i} \cdot \cos a_{ni} + j \cdot V_i \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\cos(k \cdot r_i)}{r_i} \cdot \cos a_{ni}, \quad (5)$$

где V_i - векторное распределение амплитуды колебательной скорости по поверхности излучателя; r_i - расстояние от i точки на поверхности излучателя до произвольной точки в полупространстве волновода; a_{ni} - угол падения на стенку волновода.

На рис. 3.а показана зависимость погрешности расчёта амплитуды сигнала, вызванной квантованием поверхности излучателя, в произвольной точке волновода от количества точечных датчиков на различных расстояниях.

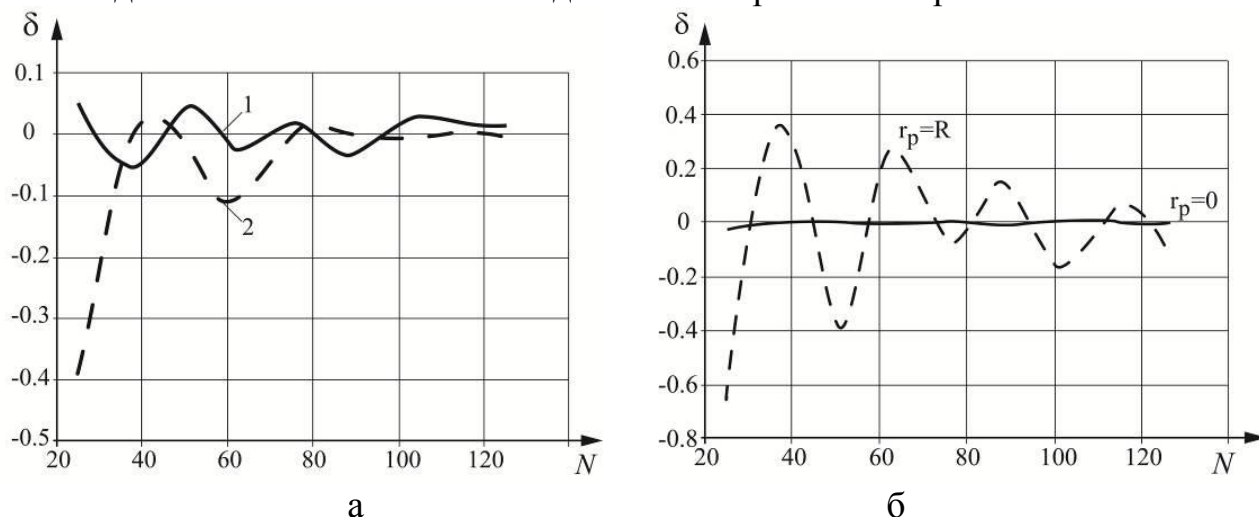


Рис. 3. Зависимость погрешности расчета относительной амплитуды сигнала: а – от количества точечных датчиков; б – от количества отражений; (1– длина волновода 1000 мм, 2– длина волновода 2000 мм)

Компьютерное моделирование позволило выявить закономерность изменения сигнала в зависимости от положения точки приёмника на радиусе волновода. Оказалось, что количество различных траекторий акустических лучей

возрастает при перемещении точек на поверхности приёмника от центра волновода к его боковой поверхности. В результате, значение амплитуды сигнала становится меньше, а вариации от числа отражений возрастают тем больше, чем ближе анализируемая точка к боковой поверхности волновода. В качестве примера на рис. 3.б приведена зависимость погрешности расчёта амплитуды сигнала в произвольной точке волновода от количества отражений для двух значений γ_p . Первая точка лежит практически в центре волновода, а вторая находится возле боковой стенки. Видно, что ряд по количеству отражений для второй точки сходится значительно медленнее.

Используя предложенный способ анализа волновых процессов, были проведены расчёты распределения амплитуды поля в поперечном сечении волновода. Результаты расчётов в виде псевдообъёмных графиков показаны на рис. 4.

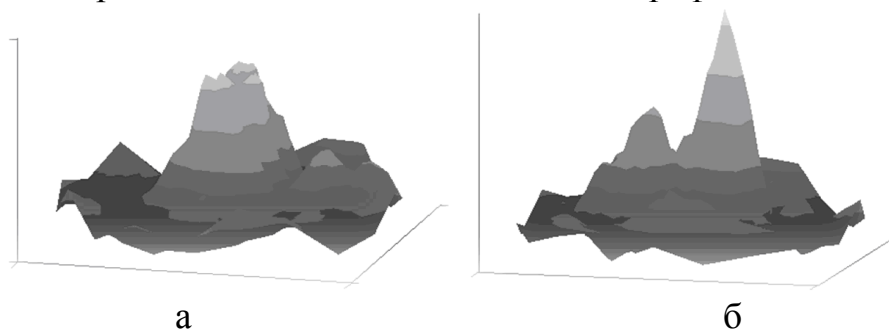


Рис. 4. Псевдообъемное изображение структуры поля в поперечном сечении волновода на различных расстояниях от излучателя: а – 1000 мм; б – 1200 мм

Существенный интерес представляет распределение амплитуды сигнала вдоль волновода. Рассчитанная зависимость приведена на рис. 5.

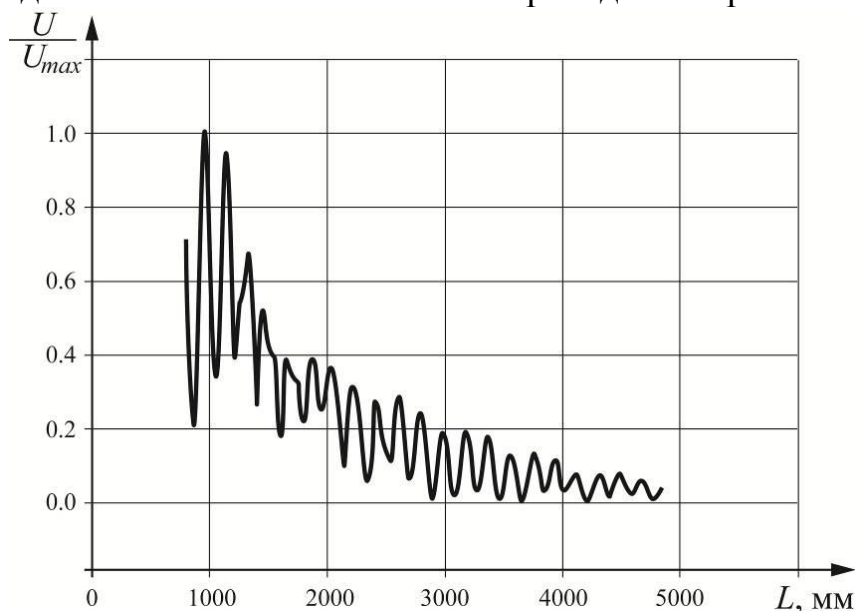


Рис. 5. Зависимость нормированной амплитуды сигнала на приемнике от длины волновода

Можно отметить две закономерности структуры поля вдоль волновода:
– монотонное уменьшение амплитуды поля при увеличении расстояния от излучателя до контролируемой точки поля, вызванное увеличением времени

распространения парциальных сигналов и как следствие увеличение длительности суммарного импульсного сигнала и формированием фазовых соотношений парциальных сигналов в контролируемой точке поля, способствующим снижению амплитуды суммарного сигнала;

- наличие резких флуктуаций амплитуды поля, достигающих $\pm 40\% \dots \pm 50\%$ от среднего значения, что вызвано не только изменением фазовых соотношений парциальных сигналов, но и изменением их количества в зависимости от геометрии акустического тракта. Особенно наглядно это проявляется на сравнительно небольших расстояниях от излучателя до контролируемой точки поля, где видны резкие отклонения от гармонического характера изменений.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Структура поля в сечении волновода, диаметр которого превышает длину волны излучения, обладает значительной степенью неравномерности.
2. Максимальная амплитуда поля наблюдается в области, прилегающей к продольной оси волновода.
3. Структура поля существенно изменяется от расстояния до контролируемого сечения.

Подавляющее большинство приборов акустического контроля, в том числе основанных на волноводном распространении поля, рассчитаны на импульсный режим работы. Расчёт акустического поля в импульсном режиме работы основан на решении волнового уравнения. Отличие от гармонического режима работы заключается в необходимости учёта временной зависимости векторного распределения амплитуды колебательной скорости по поверхности излучателя. В уравнении Гюйгенса-Релея (2) с этой целью в качестве функции V может использоваться сигнал максимально приближённый по форме к практическим сигналам.

Дальнейший алгоритм расчёта структуры акустического поля в волноводе с применением геометрической теории практически не отличается от расчёта при гармоническом режиме работы. Единственное различие состоит в том, что квадратурное суммирование заменено на непосредственное сложение мгновенных значений парциальных сигналов.

Очевидно, что импульсный процесс нестационарен во времени, поэтому распределение поля по поперечному сечению волновода также будет зависеть от времени. Наиболее полную информацию даёт анимация во времени изменения амплитуды поля, однако представить её в печатном виде невозможно. На рис.6 показаны результаты расчёта фрагментов амплитудно–фазовой зависимости акустического поля в поперечном сечении волновода в отдельные, фиксированные моменты времени. Более тёмные участки на рисунке соответствуют меньшим значениям амплитуды в положительной области и большим значениям в отрицательной области. Вид на рис. 6.а и рис. 6.б позволяет оценить распределение амплитуд по радиусу волновода. В центре волновода амплитуда в 3 раза больше, чем у стенки. Такое же распределение было получено экспериментально.

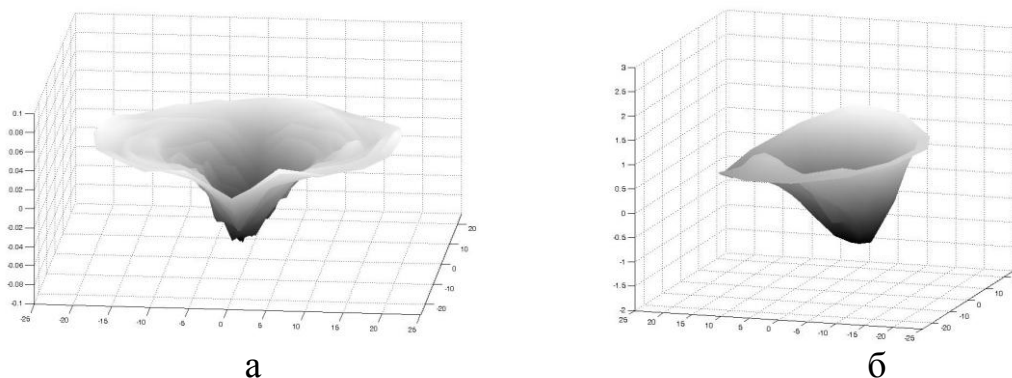


Рис. 6. Амплитудная характеристика акустического поля в поперечном сечении волновода: а – расчет; б – эксперимент

Определённый интерес представляет форма акустического сигнала, получаемого на приемном датчике, расположенном в некоторой области поперечного сечения. Выходной сигнал приёмника, размеры которого, как правило, существенно отличаются от точечного пьезопреобразователя, формируется путём аддитивного сложения сигналов точечных приемников. Результаты расчета формы импульса в двадцати равноотстоящих точках волновода представлены на рис. 7.

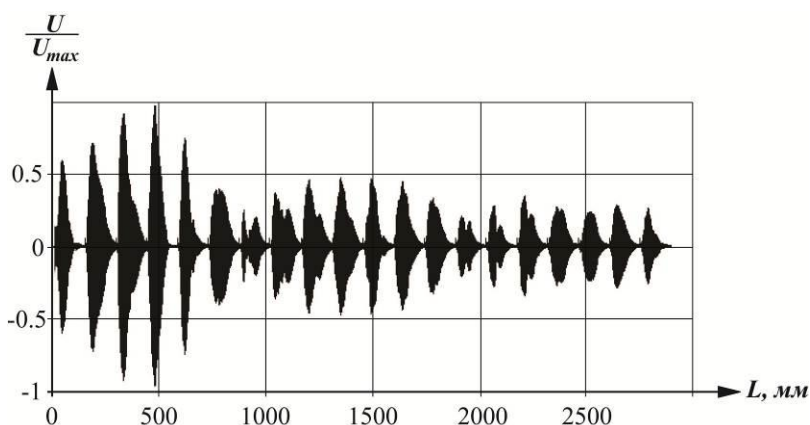


Рис. 7. Изменение формы импульса по мере его распространения по волноводу

Результаты экспериментальных исследований формы сигнала по длине волновода представлены на рис. 8. По мере распространения упругой волны вдоль волновода происходит изменение формы импульса.

Анализ полученных результатов применения геометрического метода расчёта процессов распространения акустических колебаний в волновое показывается высокую эффективность исследования. Особенно следует выделить численное моделирование импульсного режима работы. Данное направление, в отличие от волновой теории мод, даёт возможность получать данные не только об обобщённых параметрах, таких как распределение амплитуд, фазовых и групповых скоростей излучения вдоль оси волновода, но также позволяет исследовать амплитудно-фазовое распределение поля в поперечном сечении, рассчитывать форму сигнала в любой его точке или интегрированный сигнал лю-

бой области. Это позволяет прогнозировать результат применения излучателей и приёмников акустических колебаний практически любой конфигурации.

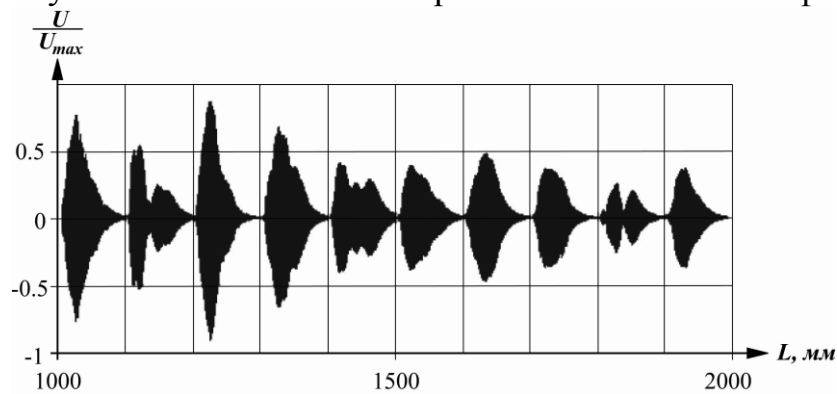


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований формы сигнала по длине волновода

Важное значение имеет информация о форме сигнала на приёмнике. Именно это служит необходимым условием оптимизации электронного приёмного тракта, имеющей целью получения высоких технических характеристик разрабатываемой аппаратуры с волноводным акустическим трактом. Геометрический метод с применением численного моделирования позволяет сравнительно простыми средствами, без привлечения спектрального анализа на основе преобразований Фурье, вычислять форму принятого сигнала. При этом следует учитывать, что форма зондирующего импульса может быть абсолютно произвольной и даже не описываться каким-либо аналитическим выражением.

В третьей главе проведен анализ акустического поля в круглом волноводе с мягкими стенками для градиентного характера изменения акустического импеданса по радиусу волновода, характерного для металлических изделий цилиндрической формы, прошедших стадию термообработки. Так как изменения твердости, и соответственно скорости распространения упругих колебаний, при малом изменении радиуса маленькие, то по закону Снелиуса можно записать:

$$\frac{\sin(\alpha + d\alpha)}{\sin \alpha} = \frac{V + dV}{V},$$

где V - скорость распространения ультразвука в первой среде; $V + dV$ - скорость распространения ультразвука во второй среде; α - угол падения; $\alpha + d\alpha$ - угол преломления.

После преобразования, с учетом малости приращения $d\alpha \rightarrow 0$ и введя обозначения $\operatorname{tg}(\alpha) = y$, получаем:

$$\int_{y_1}^y V(y) dy = C \cdot \int_{x_1}^x dx. \quad (6)$$

Полученное уравнение позволяет рассчитать траекторию распространения $y = y(x)$ акустического луча при известном законе изменения скорости звука $V = V(y)$.

Используя полученную зависимость, можно решить ряд актуальных задач, возникающих при оценке твердости изделий цилиндрической формы ультразвуковым методом. А именно:

- определение траектории звукового луча между излучателем и приемником в зависимости от градиента скорости и положений излучателя и приемника на торцах волновода;
- нахождение времени распространения луча по соответствующей траектории;
- определение траектории звукового луча с минимальным временем прохождения и определение этого времени;
- оценка погрешности в определении времени распространения луча, а следовательно, и погрешности в оценке твердости металла в зависимости от расположения излучателя и приемника на торцах волновода.

Экспериментальная зависимость скорости распространения ультразвука от твердости для высокоуглеродистых сталей, описывается следующим приближенным выражением:

$$\frac{V - V_0}{V_R - V_0} = \left(\frac{H - H_0}{H_R - H_0} \right)^2,$$

где V_R , V_0 – скорости ультразвука на поверхности и на оси волновода соответственно; V – значение скорости ультразвука в произвольной точке; H_R , H_0 – величина твердости на боковой поверхности ($r = R$) и на оси волновода соответственно; H – величина твердости в произвольной точке.

С учетом выражения (6) зависимость скорости ультразвука от радиуса волновода имеет вид:

$$V(\bar{r}) = V_0 \left[1 - (1 - \nu) \cdot \bar{r}^{2k} e^{2k(1-\bar{r})} \right],$$

где $\bar{r} = \frac{r}{R}$; $\nu = \frac{V_1}{V_0}$; k – коэффициент, учитывающий градиент акустического импеданса (способ закалки), R – радиус волновода.

С учетом различного положения излучателя на торце волновода были получены уравнения для определения лучевой траектории и времени распространения луча, которые имеют вид для осесимметричного расположения:

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{\rho} [1 - (1 - \nu) \cdot \bar{r}^{2k} e^{2k(1-\bar{r})}] d\bar{r}}{\int_0^{\Delta} [1 - (1 - \nu) \cdot \bar{r}^{2k} e^{2k(1-\bar{r})}] d\bar{r}},$$

$$\bar{t} = \int_0^{\Delta} \frac{dl}{V(r)} = \frac{L}{V_0} \cdot \int_0^{\Delta} \left(\sqrt{\frac{(R/L)^2}{V^2(\bar{r})} + \frac{1}{(\int_0^{\Delta} V(\bar{r}) d\bar{r})^2}} \right) d\bar{r}$$

и краевого положения:

$$\bar{x} = \frac{\int_1^{\rho} V(\bar{r}) d\bar{r}}{\int_1^{\Delta} V(\bar{r}) d\bar{r}},$$

$$\bar{t} = v \cdot \int_1^{\Delta} \sqrt{\frac{(R/L)^2}{V^2(\bar{r})} + \frac{1}{(\int_1^{\Delta} V(\bar{r}) d\bar{r})^2}} \cdot d\bar{r} . \quad (7)$$

где L - длина волновода; Δ - относительная величина смещения датчика по оси волновода; $\bar{r}$ - текущая координата.

Результаты расчета, выполненные в соответствии с выражением (7), представлены на рис. 9.

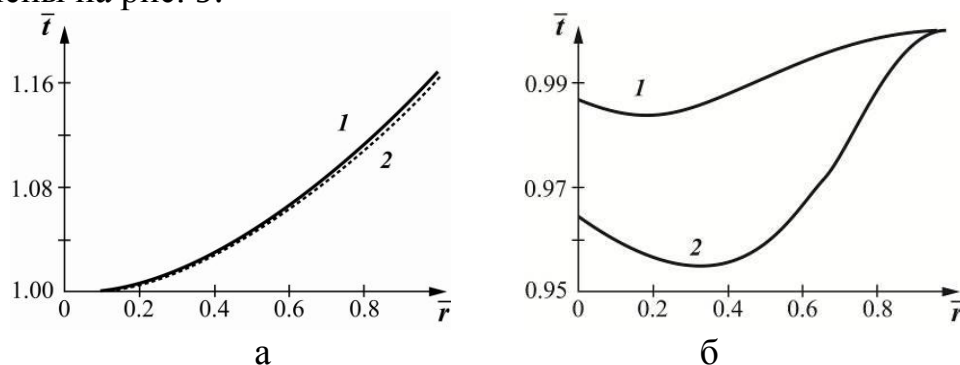


Рис. 9. Изменение времени $\bar{t}$ прохождения луча при смещении приемника по радиусу: а – излучатель в центре; б – излучатель на краю волновода; 1 – печной нагрев; 2 – индукционный нагрев

Изменение времени распространения ультразвукового луча при смещении приемника от центра волновода к краю составит 1,5% при печном нагреве и 4,5% при индукционном нагреве. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что существует такое положение приемника, при котором время распространения акустических колебаний от излучателя будет минимальным. Для печного нагрева минимум соответствует смещению $0,18\bar{r}$ от оси волновода, а для индукционного нагрева – $0,35\bar{r}$.

Для целей акустического контроля большой интерес представляет форма акустического сигнала, получаемого на датчике, расположенного в некоторой области поперечного сечения. Определим форму сигнала на приемнике. Используя выражения (7) для определения траекторий акустического луча и времени его распространения с использованием методики, представленной во второй главе диссертации, были проведены расчеты амплитуды сигнала на приемнике в зависимости от размеров датчика для различных значений градиента акустического импеданса и соответственно для различных значений градиента твердости (рис. 10.а).

При отсутствии градиента твердости амплитуда сигнала практически линейно увеличивается с увеличением радиуса датчика. При градиентах твердости превышающих 1% зависимость приобретает волнообразный характер, появляются экстремумы функции, что позволяет подобрать оптимальные размеры датчика.

Смещение положения датчика от продольной оси волновода приводит к уменьшению амплитуды сигнала на приемнике тем сильнее, чем больше градиент акустического импеданса. Расчетные зависимости изменения амплитуды

сигнала от смещения для различных градиентов акустического импеданса приведены на рис. 10.б. При градиентах акустического импеданса превышающих 3%, смещение датчика приводит к уменьшению амплитуды более чем в три раза.

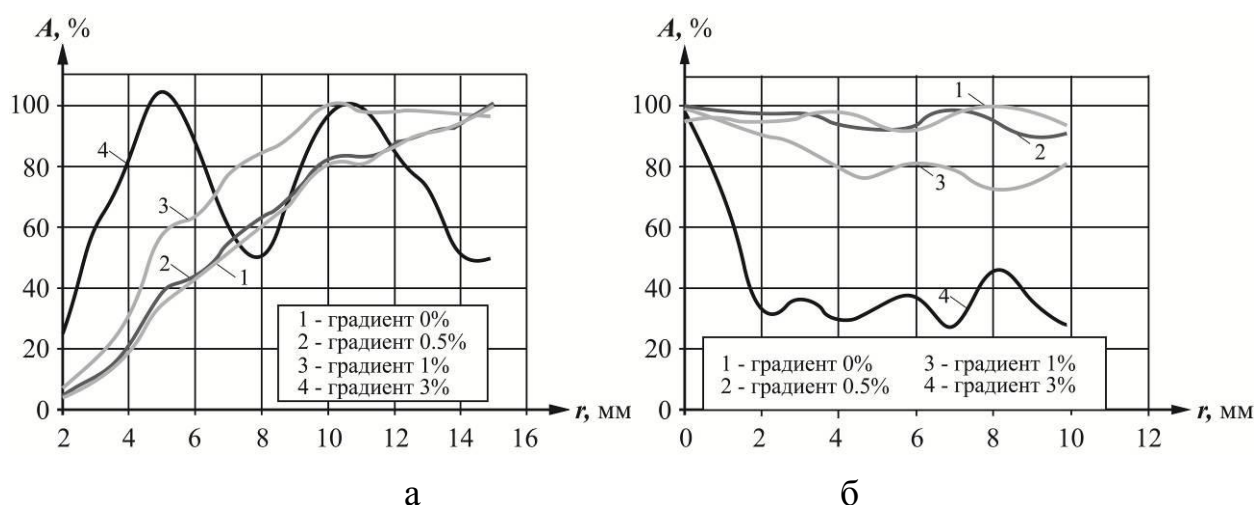


Рис. 10. Зависимость максимальной амплитуды сигнала: а – от размеров датчика; б - от смещения датчика относительно центра волновода

Результаты экспериментальных исследований изменения амплитуды сигнала от смещения датчика относительно продольной оси волновода и от размеров датчика хорошо коррелируют с расчетными. Среднеквадратичное отклонение не превышает 7 %.

Ход зависимостей показывает значительное влияние фронтальных размеров преобразователей на регистрируемый параметр. Причём, оно тем выше, чем больше градиент скорости звука в радиальном направлении волновода. Поэтому, калибровка аппаратуры должна осуществляться при тех же геометрических параметрах акустического тракта, что и контроль изделия. В противном случае будет наблюдаться значительная погрешность измерения групповой скорости, а следовательно, и интегральной твёрдости изделия.

В четвертой главе приведен анализ акустического поля в круглом волноводе с жесткими стенками при вводе колебаний с боковой поверхности. При ударном возбуждении возникают упругие колебания стенки трубы с собственными частотами, которые зависят от материала стенки и ее толщины.

При низких частотах в тонких пластинах, в которых выполняется условие ($\lambda \ll h$), распространяются только изгибные волны. Уравнение такой бегущей волны будет иметь вид:

$$U(z,t) = A \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\omega_n^2 - \omega_0^2} \cdot \left[e^{-q \cdot (t - L/V)} \cdot \sin(\omega_0 \cdot (t - L/V)) - \frac{\omega_0}{\omega_n} \cdot \sin(\omega_n \cdot (t - L/V)) \right],$$

где V - скорость распространения изгибной волны, ω_n - собственные частоты трубы, L - расстояние прошедшее изгибной волной, q - добротность системы датчик-стенка.

Скорость распространения изгибных волн определяется выражением:

$$V = k \cdot \sqrt{\frac{h^2 \cdot E}{3 \cdot \rho \cdot (1 - \sigma^2)}} , \quad (8)$$

где ρ – плотность материала стенки волновода; h – толщина стенки; E – модуль упругости; σ – коэффициент Пуассона; k – волновое число.

При распространении волны упругих колебаний происходит поглощение энергии волны, т.е. по мере удаления от источника происходит уменьшение амплитуды волны. Интенсивность ультразвуковых колебаний в среде уменьшается по экспоненциальному закону и зависит от частоты:

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha \cdot \omega^2 \cdot z} .$$

где α – коэффициент затухания, z – расстояние от излучателя до приемника.

Дисперсионный эффект распространения изгибных волн вызывает «разбегание» пакета, поэтому на приемник первыми придут волны, прошедшие самый короткий путь и имеющие самую высокую частоту.

Изгибные волны, бегущие вдоль волновода, являются источниками акустических колебаний передаваемых в среду, заполняющую волновод. Приемник первой регистрирует волну, имеющую минимальное время распространения и амплитуду, превышающую пороговый уровень. Эта волна прошла путь по металлу, а затем по среде заполняющей волновод. Это время можно определить, исследуя на минимум функцию:

$$t = \frac{L - x}{V} + \frac{\sqrt{r^2 + x^2}}{C} ,$$

где x – расстояние от произвольной точки, расположенной на внутренней стенке волновода, до приемника; L – проекция отрезка x на продольную ось волновода; C – скорость распространения ультразвука в среде заполняющей волновод; V – скорость распространения изгибных волн в стенке волновода; r – расстояние от стенки волновода до приемника;.

Приравнявая производную к нулю, определяем групповую скорость, зарегистрированного приемником сигнала:

$$\bar{V}(L, x, r) = \frac{L}{\frac{L - x}{V} + \frac{\sqrt{r^2 + x^2}}{C}} .$$

Результаты расчета групповой скорости регистрируемых волн, имеющих амплитуду, превышающую 0,1 от максимального значения, представлены на рис. 11. Анализ полученных данных показывает, что предложенный метод расчёта достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными, среднеквадратичное отклонение не превышает 5%, что позволяет утверждать о адекватности предложенной модели. Однако непостоянство групповой скорости распространения ультразвуковых колебаний требует проведения калибровки аппаратуры для различных диаметров волновода.

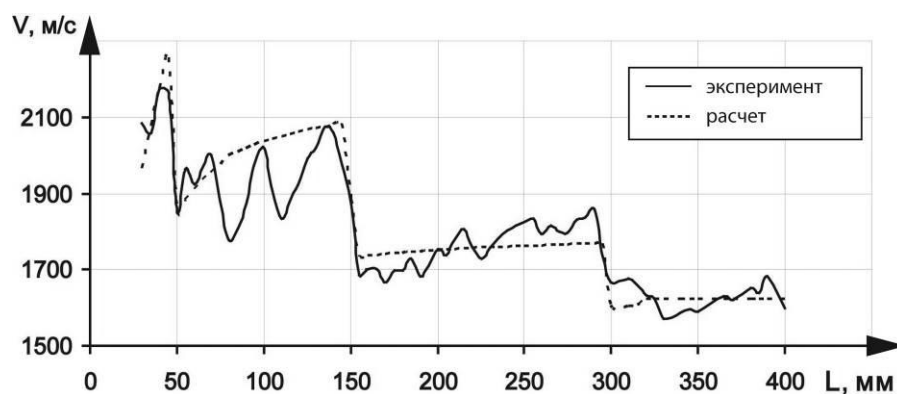


Рис. 11. Зависимость групповой скорости V распространения ультразвуковых колебаний от длины акустического тракта L , непрерывная линия – эксперимент, пунктирная линия – расчет

В пятой главе представлены способы обработки акустических сигналов, позволяющие повысить точность измерения ультразвуковых локаторов. Определение момента прихода сигнала является основой для решения большого круга задач, решаемых в областях, связанных с необходимостью измерения времени распространения сигнала в какой-либо среде. Существующий способ определения момента прихода импульса предполагает использование компаратора с фиксированным порогом срабатывания. В том случае, когда форма огибающей описывается медленно меняющейся функцией времени, возникают проблемы точности при изменении амплитуды сигнала. Если амплитуды соседних периодов, составляющих нарастающий фронт, изменяются на 10% ... 15%, вариация общей амплитуды в два раза приводит к ошибке, равной 4 ... 5 периодам колебаний несущей частоты. Более сложная ситуация имеет место при использовании волноводных акустических трактов. При этом наряду с изменением амплитуды сигнала, наблюдается также изменение формы его огибающей. Применение АРУ или компаратора со «следающим» порогом в данной ситуации не решают проблемы точности фиксации момента прихода импульса. Отношение длительности переднего фронта огибающей к максимальной амплитуде импульса характеризует величину методической погрешности ультразвуковых локаторов, причем характер кривой зависит от параметров акустического тракта: частоты излучения, диаметра волновода и пространственного положения датчика.

На рис. 12 приведена зависимость изменения длительности фронта огибающей эхо-импульса (в периодах несущей частоты) по длине волновода для частоты 800 кГц, диаметре волновода 52 мм и осесимметричном положении датчика.

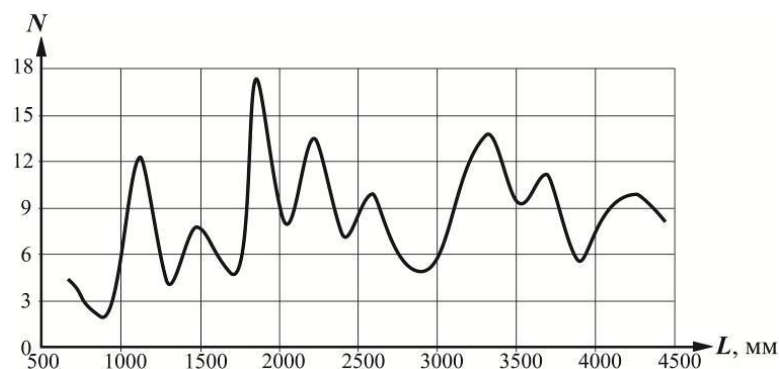


Рис. 12. График изменения длительности фронта огибающей эхо-импульса (в периодах N несущей частоты) по длине волновода для частоты 800 кГц, диаметре волновода 52 мм и осесимметричном положении датчика

Из приведенного графика видно, что зависимость имеет сложный характер, что ограничивает использование метода одного компаратора, получившего на сегодняшний день широкое распространение в ультразвуковых локационных приборах. Вследствие изменения длительности фронта огибающей эхо-импульса, изменяется и погрешность измерения с увеличением измеряемого расстояния.

Очевидно, что для обеспечения высокоточных измерений, необходимо использовать специальные способы определения момента прихода акустического импульса на приемник. Разработке таких способов способствует бурное развитие однокристалльных микропроцессоров с высоким быстродействием и значительным объемом памяти, что позволяет использовать сложные алгоритмы обработки информации. Одним из таких способов является способ, основанный на аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом первой степени, который защищен патентом РФ [22]. Устройство для реализации этого способа содержит два компаратора с отличающимися порогами срабатывания (рис. 13). Срабатывание первого компаратора, имеющего уровень U_1 , происходит в момент времени t_1 , срабатывание второго компаратора, имеющего уровень U_2 , происходит в момент времени t_2 . Построение прямой по координатам этих точек позволяет найти временную координату начала эхо-импульса t_p из выражения:

$$t_p = t_1 - \frac{U_1}{U_2 - U_1} \cdot (t_2 - t_1) .$$

Амплитудное значение напряжения в двух соседних периодах, для линейной зависимости, будет определяться выражением:

$$U_{i+1}^{\max} = U_i^{\max} + k \cdot U_1 ,$$

где $i = 0, 1, \dots$ - номер периода эхо-импульса; k - тангенс угла наклона огибающей эхо-импульса; U_1 - пороговое напряжение первого компаратора.

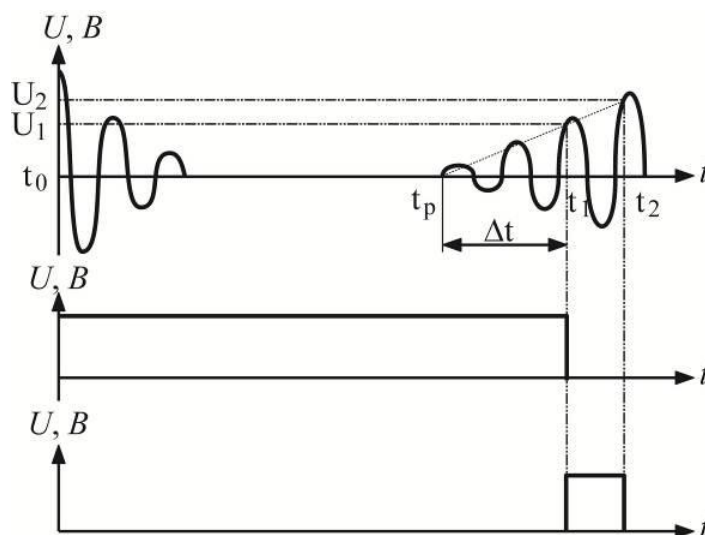


Рис. 13. Определение временного положения начала эхо-импульса методом двух компараторов

Построение огибающей переднего фронта эхо-импульса предполагает определение координат двух точек на этом импульсе и построение прямой по этим точкам. Идеальный вариант получается в случае, если уровни срабатывания компараторов равняются амплитудному значению напряжения в i периоде. В этом случае огибающая пройдет по пиковым значениям амплитуды напряжения в каждом периоде нарастающей части эхо-импульса. Максимальные погрешности получаются тогда, когда величины уровней U_1 и U_2 окажутся немного больше амплитудного значения напряжения предыдущих периодов. В этом случае произойдет перескок срабатывания компаратора на следующий период и появится погрешность Δ , которая определяется из выражения:

$$\frac{\Delta}{T} = \frac{1}{1-q} \cdot \left[1+q - \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\arccos \frac{1}{1+k} + q \cdot \arccos \frac{1}{1+k} \right) \right], \quad (11)$$

где T - период колебаний несущей частоты; $q = U_1/U_2$.

На рис. 14 показаны результаты расчета по выражению (11) для различных значений q .

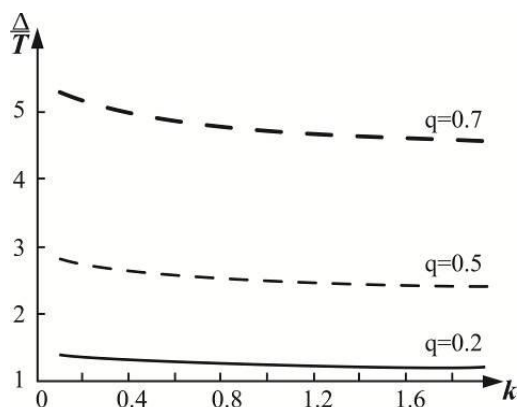


Рис. 14. Зависимость величины погрешности в определении времени от крутизны фронта огибающей

Чем больше угол наклона огибающей переднего фронта (чем больше k) тем меньше погрешность в определении времени начала эхо-импульса. С увеличением разницы в установлении порогов компараторов U_1 и U_2 (чем меньше q) уменьшается погрешность в определении времени начала эхо-импульса. Влияние разницы в порогах проявляется сильнее, чем влияние крутизны переднего фронта огибающей.

На рис. 15 приведены экспериментальные зависимости величины погрешности измерения от дальности, полученные с помощью устройства, реализующего предложенный способ обработки акустических сигналов. На устройство, реализующее предложенный способ, был получен патент РФ [20].

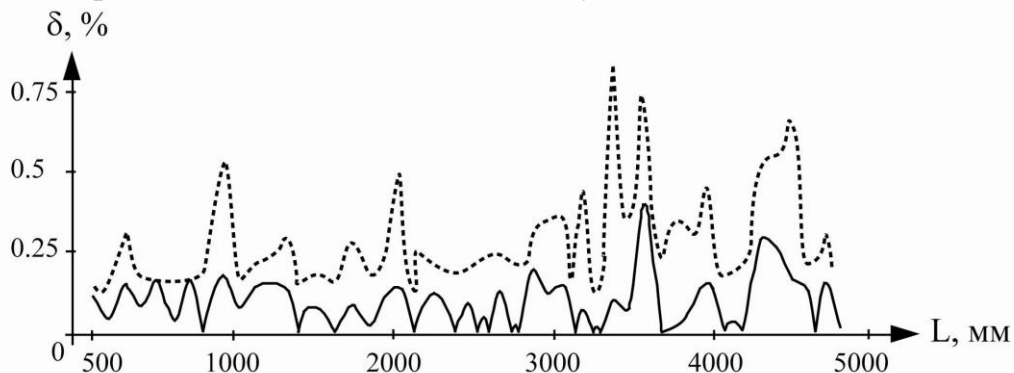


Рис. 15. Изменение погрешности измерения от дальности, пунктир – способ одного компаратора, сплошная линия – способ двух компараторов при $q = 0.25$

Применение этого способа для определения времени прихода эхо-импульса позволяет в два раза повысить точность измерения ультразвуковых приборов, использующих время-импульсный метод. Однако область применения этого способа ограничивается только случаем линейного нарастания огибающей эхо-импульса. При более сложных законах изменения нарастающей части огибающей эхо-импульса точность измерения увеличивается незначительно. В этом случае можно использовать способ, основанный на аппроксимации нарастающей части огибающей импульсного сигнала полиномом второй степени вида:

$$s = a \cdot t^2 + b \cdot t + c,$$

где s – амплитуда огибающей; t – время; a, b, c – коэффициенты полинома.

В реальных условиях на форму эхо-импульса существенно влияют помехи и шумы, которые приводят к погрешностям при расчёте уравнений огибающих. Чтобы уменьшить их влияние на результат расчёта, для нахождения коэффициентов уравнения используется метод наименьших квадратов. Коэффициенты аппроксимации находятся путём решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot s_i = a \cdot \sum_{i=1}^n t_i^4 + b \cdot \sum_{i=1}^n t_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 \\ \sum_{i=1}^n t \cdot s_i = a \cdot \sum_{i=1}^n t_i^3 + b \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^n t_i, \\ \sum_{i=1}^n s_i = a \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n t_i + c \cdot n \end{cases} \quad (12)$$

где n – количество точек, выбранных для полиномиальной аппроксимации; i – текущий номер экспериментальной точки.

Решается система уравнений (12) с помощью метода Крамера.

Предложенный способ определения временного положения эхо-импульса защищен патентом РФ [27]. Определим минимальную частоту дискретизации входного сигнала, обеспечивающую однозначное определение экстремумов в одном периоде входного сигнала. Если погрешность в определении максимальной амплитуды должна быть менее δ , то количество отсчетов определится из выражения:

$$N = \frac{\pi}{\arccos(1 - \delta)} . \quad (13)$$

Результат расчета, проведенный в соответствии с выражением (13), представлен на рис. 16.

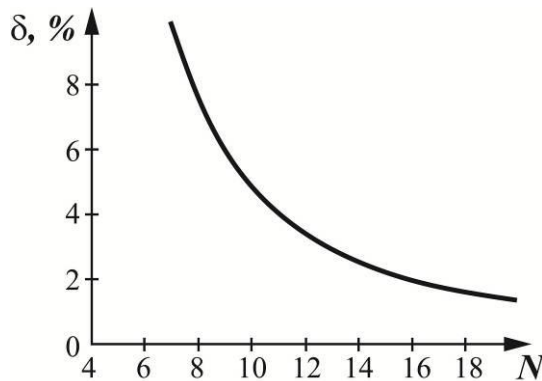


Рис. 16. Зависимость погрешности δ в определении максимальной амплитуды от количества отсчетов на одном периоде N

Экспериментальные исследования были проведены с использованием устройства, на которое получен патент РФ [31]. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 17.

Применение способа аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом второй степени для определения времени прихода эхо-импульса позволяет в три раза повысить точность измерения ультразвуковых приборов, использующих время-импульсный метод. Использование полинома третьей степени не дает существенного преимущества, однако сложность обработки возрастает.

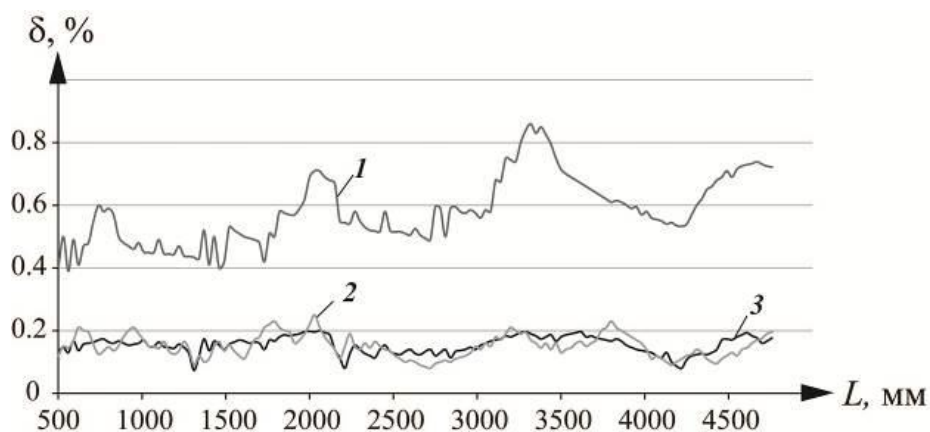


Рис. 17. Зависимость погрешности измерения уровня δ от уровня L :
 1 – способ одного компаратора; 2 – способ, основанный на аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом второго порядка; 3 – способ, основанный на аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом третьего порядка

Возможности современных однокристальных микропроцессоров с обширной периферией позволяют использовать сложные алгоритмы обработки информации с целью определения начала УЗ импульса. Одним из путей достижения этой цели является использование зависимости длительности импульса, получаемого с выхода компаратора при сравнении эхо-импульса с фиксированным уровнем, от амплитуды в каждом периоде эхо-сигнала $U_m = f(t_u)$. Амплитудное значение синусоидального сигнала на входе компаратора определяется через длительность импульса на его выходе по следующему выражению:

$$U_m = \frac{U_{\text{нор}}}{\sin\left(\pi \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right) / 2\right)}, \quad (14)$$

где Δt - длительность импульса на выходе компаратора; T - период входного сигнала; $U_{\text{нор}}$ - опорное напряжение на входе компаратора.

Для получения аппроксимирующего выражения огибающей импульсного сигнала необходимо использовать минимум 3 точки, координаты которых используются при расчете огибающей. Первая координата это амплитуда, которая рассчитывается по выражению (14), вторая координата – это время, которое определяется из выражения:

$$t = t_k + \left(\frac{T}{2} + \frac{\Delta t}{2}\right),$$

где t_k - временная координата срабатывания компаратора.

Используя методику, приведенную выше, составляется система уравнений, из которой определяются коэффициенты аппроксимации. Эти коэффициенты затем используются для расчета времени прихода эхо-импульса. Предложенный способ защищен патентом РФ [28]. Относительная погрешность в определении амплитуды может быть найдена из выражения:

$$\delta U_m = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\Delta \varphi}{2} \cdot \Delta(\Delta \varphi) ,$$

где $\Delta \varphi$ - фаза сигнала, при которой происходит срабатывание компаратора;
 $\Delta(\Delta \varphi)$ - погрешность в определении фазы.

Результаты расчета зависимости относительной погрешности в определении максимальной амплитуды δU_m от относительной длительности импульса на выходе компаратора приведены на рис. 18, из которого видно, что чем больше длительность импульса на выходе компаратора, тем выше погрешность в определении максимальной амплитуды и тем выше погрешность в определении времени прихода эхо-сигнала. Кроме того, погрешность в определении максимальной амплитуды возрастает с увеличением погрешности вычисления фазы синусоидального сигнала в момент срабатывания компаратора. Поэтому этот способ можно применять только для эхо-сигналов с малой крутизной переднего фронта огибающей эхо-сигнала и для расчета использовать только первые три импульса на выходе компаратора. Результаты экспериментальных исследований, проведенные с использованием устройства защищенного патентом РФ [29], представлены на рис. 19.

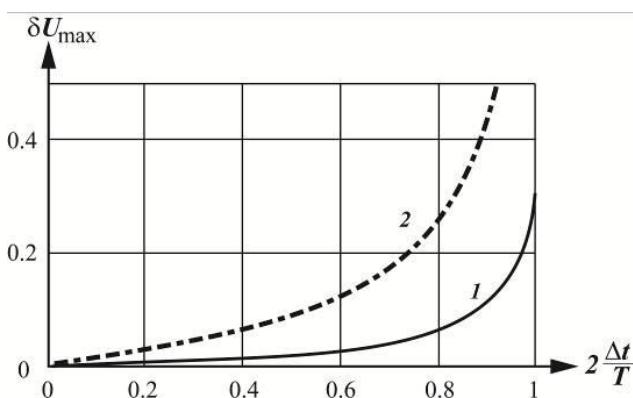


Рис. 18. Зависимость погрешности $\delta U_{\max}$ в определении максимальной амплитуды от длительности импульса на выходе компаратора: 1 – для погрешности определения фазы $\varphi = 5\%$; 2 - для погрешности определения фазы $\varphi = 20\%$

Из рис. 19 видно, что при изменении длительности фронта принятого сигнала в широких пределах погрешность измерения предложенным способом не превышает 5 периодов и слабо зависит от данного параметра. В тоже время для способа одного компаратора погрешность возрастает пропорционально увеличению длительности фронта сигнала и достигает значения 13 периодов. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что среднеквадратичное отклонение не превышает 10 %. Это подтверждает правильность выбора формы огибающей сигналов, достоверность полученных результатов и их практическую ценность.

Применение способа, основанного на измерении длительностей импульсов на выходе порогового устройства для определения времени прихода эхо-импульса позволяет в три раза повысить точность измерения ультразвуковых приборов, использующих время-импульсный метод. Однако этот способ при-

меним только для низкочастотных сигналов, имеющих большой период несущей частоты зондирующего сигнала, что позволяет измерять длительность импульсов на выходе порогового устройства с погрешностью не более 1% от периода несущей частоты зондирующего сигнала. Для получения высоких метрологических характеристик ультразвуковых локаторов необходимо использовать только первые 3 импульса на выходе порогового устройства, т.к. приращения длительности последующих импульсов уменьшаются по экспоненциальному закону.

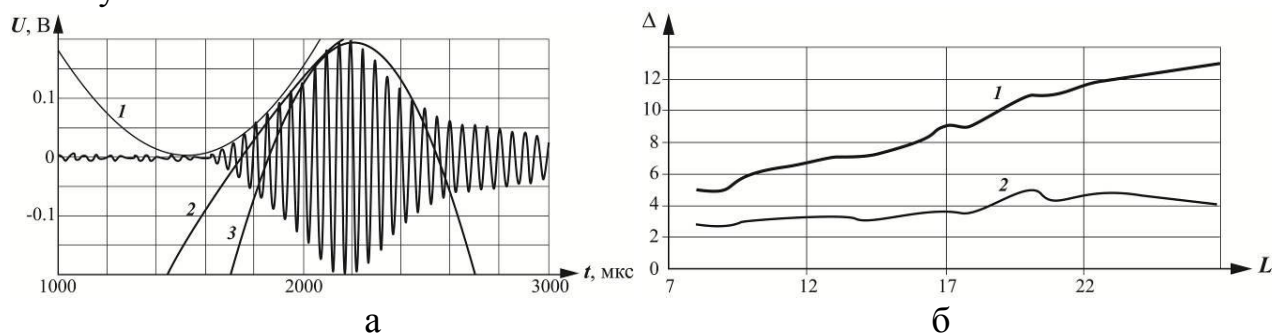


Рис. 19. Результаты экспериментальных исследований: а - осциллограмма эхо-сигнала с огибающими, построенными на уровнях 20 % (кривая 1); 50 % (кривая 2); 60 % (кривая 3) от максимальной амплитуды сигнала; б - зависимость погрешности Δ (в периодах несущей частоты) определения начала эхо-сигнала от длительности фронта его огибающей L (в периодах несущей частоты); 1 - способ одного компаратора; 2 – предложенный способ

Наличие постоянной составляющей в импульсном сигнале приводит к появлению погрешности в определении временного положения эхо-импульса. Выражение для сигнала с постоянной составляющей имеет вид:

$$U(t, \varphi) = U_0 + U_m(t) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi),$$

где $U_m(t)$ – переменная во времени амплитуда сигнала с линейной или квадратичной зависимостью; U_0 – постоянная составляющая; φ – случайный угол из интервала отсчета аналого-цифрового преобразователя, распределенный по равномерному закону.

Для оценки этой погрешности была найдена дисперсия величины U :

$$\sigma^2(U) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{U_0 - U_m}^{U_0 + U_m} U^2(\varphi, t) \cdot \frac{1}{\sqrt{U_m^2(t) - [U(t, \varphi) - U_0]^2}} \cdot du - U_0^2,$$

и вероятность попадания случайно измеренного значения амплитуд в интервал $U_0 \pm \delta$:

$$P = P(|U - U_0| < \delta) = \int_{U_0 - \delta}^{U_0 + \delta} \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{U_m^2(t) - [U(t, \varphi) - U_0]^2}} \cdot dU.$$

После вычисления интеграла получаем:

$$P = \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{\delta}{U_m}\right), \quad (15)$$

Результаты расчета вероятности попадания случайно измеренного значения амплитуды в соответствии с выражением (15) представлены на рис. 20.

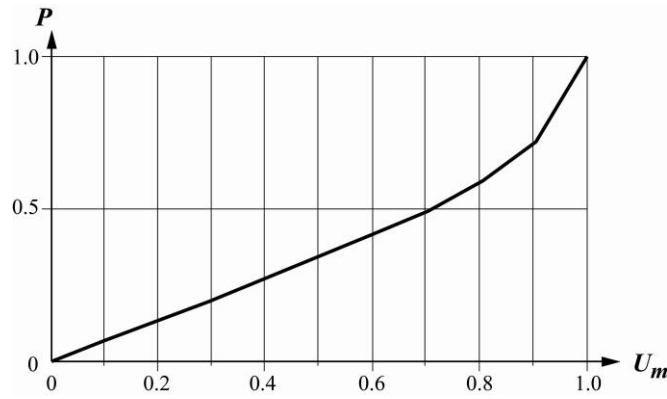


Рис. 20. Зависимость вероятности попадания измеренного значения амплитуды в заданный интервал от величины интервала

На точность определения временного положения эхо-импульса будет влиять и точность определения коэффициентов аппроксимирующего полинома. Для линейной регрессионной модели огибающей, описываемой уравнением:

$$t = b_0 + b_1 \cdot U,$$

где b_0, b_1 - коэффициенты аппроксимирующего полинома,

было получено выражение для определения погрешности коэффициентов аппроксимирующего полинома:

$$\Delta b_0 = t_{n-2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{U^2}{S_U^2}} = \frac{\sigma}{S_U} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{U^2},$$

где t_{n-2} - величина критической точки распределения Стьюдента для $(n-2)$ степеней свободы (2 оценочных параметра) и задаваемой доверительной вероятности; σ^2 - средний квадрат отклонения расчетных и экспериментальных данных; S_U^2 - выборочная дисперсия амплитуд сигнала; U - амплитуда сигнала в точке отсчета; n - количество отсчетов.

Используя таблицу критических точек распределения Стьюдента, оцениваем ошибку:

$$\Delta b_0 = t_{n-2} \cdot \sqrt{\frac{\sigma^2}{n \cdot S_U^2} \cdot U^2},$$

Отклонение величины регрессии Δt , связанное с погрешностью в определении коэффициентов аппроксимирующего полинома, записывается в виде:

$$\Delta t = \Delta b_0 + \Delta b_1 \cdot U$$

Дисперсия величины t может быть найдена из выражения:

$$\sigma^2 = \Delta b_0^2 + 2 \cdot \Delta b_0 \cdot \Delta b_1 \cdot \bar{U} + \Delta b_1^2 \cdot \bar{U}^2$$

Полученное уравнение определяет в системе координат Δb_0 и Δb_1 эллипс, главные оси которого повернуты относительно координатных на некоторый угол (рис. 21).

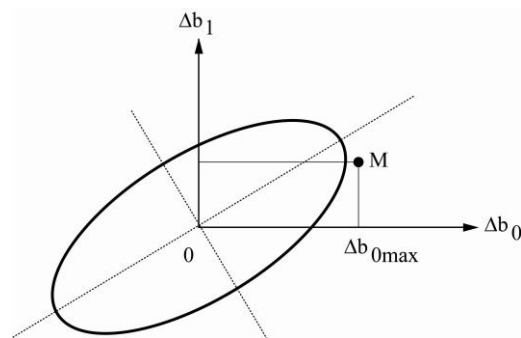


Рис. 21. Эллипс рассеяния для линейной регрессии

Квадратичная регрессионная модель, получаемая при использовании методов построения огибающей эхо-сигнала, описывается уравнением:

$$t = a_0 + a_1 \cdot U + a_2 \cdot U^2.$$

Отклонение расчетных результатов t_i от некоторых средних за счет погрешностей в оценке параметров a_0 , a_1 и a_2 для одних и тех же значений амплитуд U , можно найти из выражения:

$$\Delta t_i = \Delta a_0 + \Delta a_1 \cdot U_i + \Delta a_2 \cdot U_i^2.$$

Дисперсия будет равна:

$$\sigma^2 = \Delta a_0^2 + 2 \cdot \Delta a_0 \cdot \Delta a_1 \cdot \bar{U} + 2 \cdot \Delta a_0 \cdot \Delta a_2 \cdot \bar{U}^2 + 2 \cdot \Delta a_1 \cdot \Delta a_2 \cdot \bar{U}^3 + \Delta a_1^2 \cdot \bar{U}^2 + \Delta a_2^2 \cdot \bar{U}^4, \quad (16)$$

где $\bar{U}$ - среднее значение амплитуды из n отсчетов.

Уравнение (16) в системе прямоугольных координат Δa_0 , Δa_1 , Δa_2 представляет собой эллипсоид (рис. 22). По рисункам можно найти максимальную погрешность в определении начала эхо-импульса (например, точка М, расположенная на эллипсе рис.21 или на поверхности эллипсоида рис.22).

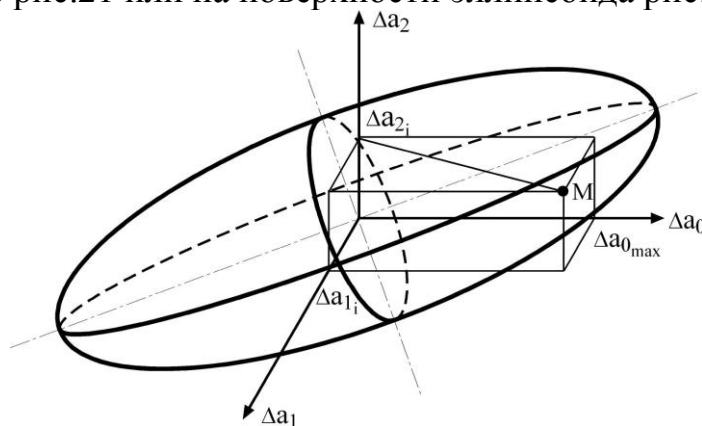


Рис. 22. Эллипсоид рассеяния для квадратичной регрессии

В шестой главе представлены результаты практического использования теоретических исследований в разработанных приборах.

Ультразвуковой уровнемер для резервуаров горизонтального типа, за счет использования способа обработки акустических сигналов, основанного на аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом второй степени, позволяет контролировать уровень жидких продуктов с погрешностью не более $\pm 0,3$ мм. Опытная партия этих уровнемеров была выпущена ОАО «НПЦ «ПОЛЮС».

Технические решения, используемые в уровнемере были защищены патентами РФ [13...16, 20, 26, 29].

Ультразвуковой локатор внутритрубных устройств был разработан с использованием способа активного ответа. Применение двух каналов локации, позволило получить погрешность в определении дальности не превышающей $\pm 0,5\%$. Макетный образец локатора был внедрен в ООО «НПП ТЭК». Технические решения, используемые в ультразвуковом локаторе были защищены патентами РФ [18, 19, 21, 23, 24, 30].

Результаты исследований волноводного акустического тракта с градиентным характером изменения акустического импеданса по радиусу волновода были использованы при разработке ультразвукового измерителя твердости роликов железнодорожных подшипников, который был внедрен в термическом цехе ООО «Степногорский подшипниковый завод». Внедрение прибора позволило проводить 100% контроль качества термообработки роликов железнодорожных подшипников. Применение метода двух компараторов для определения начала эхо-импульса позволило получить погрешность измерения ± 2 HRC во всем диапазоне контролируемых значений.

Ультразвуковой газоанализатора-расходомера бинарных газов, за счет использования способа обработки акустических сигналов, основанного на зависимости длительности импульсов на выходе порогового устройства от амплитудного значения сигнала, позволяет контролировать расход газовой смеси с погрешностью $\pm 0,1\%$, а концентрацию - $\pm 1\%$. Ультразвуковой газоанализатора-расходомер был внедрен в Сибирском государственном медицинском университете, г.Томск.

Ультразвуковой скважинный глубиномер разработан для определения глубины скважин при проведении маркшейдерских работ в горнорудных шахтах. Применение способа обработки эхо-сигналов, основанного на зависимости длительности импульсов на выходе порогового устройства от амплитудного значения сигнала позволило контролировать глубину скважины с погрешностью менее $0,3\%$.

Для контроля температуры светлых нефтепродуктов в подземных резервуарах горизонтального типа был разработан ультразвуковой термометр. Акустический тракт термометра выполнен в виде волновода круглого сечения. Технические решения, используемые в ультразвуковом термометре, были защищены патентом РФ [17]. Применение способа обработки акустических сигналов, основанного на аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом второй степени, позволяет контролировать температуру с погрешностью не более $\pm 0,1\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы:

- получила дальнейшее развитие теория волноводного распространения ультразвуковых колебаний с использованием метода геометрической акустики для решения трехмерных задач. На основе созданной модели проведен

анализ волноводного акустического тракта круглого сечения для сред с постоянным акустическим импедансом и сред с градиентным характером изменения акустического импеданса, а также исследован характер распределения акустического поля в круглом волноводе для сред с постоянным акустическим импедансом при вводе колебаний с боковой поверхности волновода. Проведенный анализ показал, что по мере распространения ультразвуковой волны по волноводу изменяется его форма, амплитуда и длительность, поэтому применение метода одного компаратора, наиболее широко применяемого в настоящее время в ультразвуковой аппаратуре, дает большую погрешность в измерении времени распространения ультразвуковых колебаний в волноводе;

- получила дальнейшее развитие теория и практика обработки акустических сигналов. Предложены, исследованы и внедрены новые способы определения начала эхо-импульса, основанные на аппроксимации нарастающей его части полиномами первого или второго порядков, что позволило уменьшить погрешность измерения времени распространения ультразвуковых колебаний в 2...3 раза. Предложенные способы обработки эхо-сигналов не требуют сложных вычислений и довольно просто реализуются на существующей элементной базе;
- предложен, исследован и внедрен способ локации с активным ответом, основанный на послыке зондирующего импульса с внешней боковой поверхности трубопровода, приеме этого импульса внутритрубным устройством и послыке ответного зондирующего импульса. Для уменьшения погрешности измерения был реализован двухканальный способ локации внутритрубных герметизаторов с активным ответом, позволяющий уменьшить погрешность измерения в два раза;
- Созданы и внедрены в различные отрасли народного хозяйства высокоточные системы акустической локации:
 - а. ультразвуковой уровнемер;
 - б. ультразвуковой локатор внутритрубных устройств;
 - в. ультразвуковой прибор контроля качества термообработки роликов железнодорожных подшипников;
 - г. ультразвуковой газоанализатор-расходомер бинарных газов;
 - д. ультразвуковой скважинный глубиномер;
 - е. ультразвуковой термометр.
- подготовлены и внедрены в учебный процесс методические материалы по промышленному и медицинскому применению ультразвука.

Основные научные результаты были получены при выполнении ряда хоздоговорных работ х/д 1-197/2002, х/д 1-171/2001, х/д 1-88/2000, х/д 1-138/2000, х/д 1-213/2001, х/д 12-173/2002 «К», х/д 4-1/2009, х/д 5-2/2009 и подержана грантами ГК №1.314-2009, ГК 1.423С-2009, ГК 5.621С-2010.

Таким образом, в результате выполнения диссертационной работы внесен весомый вклад в решение важной народно-хозяйственной задачи по созданию

высокоточных ультразвуковых локационных устройств для неразрушающего контроля.

В приложении приведены акты внедрения разработанных ультразвуковых приборов и методики проведения испытаний.

Список основных публикаций

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. Солдатов А. И. Ультразвуковая диагностика внутритканевого гипертензионного синдрома / А.И. Солдатов, С.А. Цехановский, А.И. Чирьев // Известия ТРТУ, 2006. – №11. – с. 151-152.
2. Солдатов А.И. Ультразвуковой газоанализатор для анестезии. / А.И. Солдатов, С.А. Цехановский, В.С. Макаров // Известия Южного федерального университета. – Технические науки, 2008. – № 5. – с. 159-163.
3. Солдатов А.И. Ультразвуковой расходомер с волноводным акустическим трактом. / А.И. Солдатов, С.А. Цехановский // Известия Южного федерального университета. – Технические науки, 2008. – № 5. – с. 163-167.
4. Солдатов А.И. Определение временного положения акустического импульса методом аппроксимации огибающей сигнала. / А.И. Солдатов, П.В. Сорокин, В.С. Макаров // Известия Южного федерального университета. – Технические науки, 2009. – № 10. – с. 178-184.
5. Солдатов А.И. Теоретическое и экспериментальное исследование акустического тракта скважинного глубиномера. / А.И. Солдатов, Ю.В. Чиглинцева. // Известия Томского политехнического университета, 2009. – т. 315, – № 4. – с. 85-89.
6. Солдатов А.И. Визуализация акустического поля в круглом волноводе. / А.И. Солдатов, А.И. Селезнев // Известия Южного федерального университета. – Технические науки, 2009. – № 10. – с. 173-178.
7. Солдатов А.И. Ультразвуковой контроль качества термообработки роликов железнодорожных подшипников. / А.И. Солдатов, И.И. Фикс, С.А. Цехановский // Дефектоскопия, 2010. – № 3. – с. 17-26.
8. Солдатов А.И. Анализ погрешностей в определении временного положения эхо-сигнала при аппроксимации его огибающей полиномом второй степени. / А.И. Солдатов, П.В.Сорокин, А.А. Солдатов // Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2010, – № 9. – с. 92-97.
9. Солдатов А.И. Повышение точности ультразвуковых измерений методом двух компараторов. / А.И. Солдатов, Ю.В. Шульгина. // Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2010, – № 9. – с. 102-107.
10. Солдатов А.И. Применение методов огибающих второго и третьего порядков для определения временного положения эхо-импульса. / А.И. Солдатов, С.А. Шестаков, С.В. Пономарев // Известия Томского политехнического университета, 2010 – т. 317, – № 2. – с. 63-65.
11. Солдатов А.И. Система активного сопровождения транспортируемых внутритрубных объектов с акустическим каналом связи. / А.И. Солдатов и

др. //Известия Томского политехнического университета, 2010. – Т. 317, – № 2. – с. 66-69.

- 12.Солдатов А.И. Метод определения временного положения медленно нарастающего эхо-импульса. / А.И. Солдатов и др. //Известия Томского политехнического университета, 2010 – т. 317, – № 4. – с. 146-149.

Патенты

- 13.Ультразвуковой уровнемер: патент РФ на полезную модель № 16313. / Солдатов А.И. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 20.12.2001, Бюлл. № 35. – 4 с.
- 14.Устройство компенсации погрешности измерения ультразвукового уровнемера: патент РФ на изобретение № 2406979. / Солдатов А.И. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 20.12.2010, Бюлл. №35. – 6 с.
15. Ультразвуковой уровнемер: патент РФ на полезную модель № 48629. / Солдатов А.И., Макаров В.С., Цехановский С.А., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 27.10.2005, Бюлл. №30. – 2 с.
- 16.Ультразвуковой уровнемер: патент РФ на полезную модель № 47098. / Солдатов А.И. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 10.08.2005, Бюлл. №22. – 3 с.
- 17.Акустический термометр: патент РФ на полезную модель № 65222. / Солдатов А.И., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 27.07.2007, Бюлл. №21. –3 с.
- 18.Способ акустической дальнометрии: патент РФ на изобретение № 2315335. / Солдатов А.И. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 20.01.2008 Бюлл. №2. – 3 с.
- 19.Устройство акустической дальнометрии: патент РФ на полезную модель № 71450. / Солдатов А.И., Цехановский С.А., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 10.03.2008, Бюлл. №7. – 3 с.
- 20.Устройство компенсации погрешности измерения ультразвукового уровнемера: патент РФ на полезную модель № 75034. / Солдатов А.И., Цехановский С.А., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 20.07.2008, Бюлл. №20. –3 с.
- 21.Устройство акустической дальнометрии: патент РФ на полезную модель № 86759. / Солдатов А.И., Фикс И.И., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 10.09.2009, Бюлл. №25. –2 с.
- 22.Способ компенсации погрешности измерения ультразвукового уровнемера: патент РФ на изобретение № 2358243. / Солдатов А.И., Цехановский С.А., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 10.06.2009, Бюлл. №16. –3 с
- 23.Устройство акустической дальнометрии: патент РФ на полезную модель № 87543. / Солдатов А.И. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 10.10.2009, Бюлл. №28. –3 с.

24. Система контроля прохождения внутритрубных объектов: патент РФ на полезную модель № 87494. / Солдатов А.И. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 10.10.2009, Бюлл. №28. – 2 с.
25. Способ компенсации погрешности измерения ультразвукового уровнемера: патент РФ на изобретение № 2380659. / Солдатов А.И., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 27.01.2010, Бюлл. №3. – 3 с.
26. Устройство компенсации погрешности измерения ультразвукового уровнемера: патент РФ на изобретение № 2384822. / Солдатов А.И., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 20.03.2010, Бюлл. №8. – 4 с.
27. Способ компенсации погрешности измерения ультразвукового уровнемера: патент РФ на изобретение № 2389981. / Солдатов А.И. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 20.05.2010, Бюлл. №14. – 3 с.
28. Способ компенсации погрешности измерения ультразвукового уровнемера: патент РФ на изобретение № 2389982. / Солдатов А.И. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 20.05.2010, Бюлл. №14. – 3 с.
29. Устройство компенсации погрешности измерения ультразвукового уровнемера: патент РФ на изобретение № 2396521. / Солдатов А.И. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 10.08.2010, Бюлл. №22. – 3 с.
30. Способ акустической дальнометрии: патент РФ на изобретение № 2392641. / Солдатов А.И., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 20.06.2010, Бюлл. №17. – 2 с.

Монографии

31. Солдатов А.И. Приборы контроля на основе акустических волноводов [монография] / Солдатов А.И., Макаров В.С., Сорокин П.В., —Изд. ТПУ, 2011. — 124 с.