

ШУЛЬГИНА ЮЛИЯ ВИКТОРОВНА

**АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ГЛУБИНЫ РАЗВЕДОЧНЫХ И
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СКВАЖИН НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Солдатов Алексей Иванович,

Официальные оппоненты: **Бобров Алексей Леонидович**
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», доцент кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация»

Суханов Дмитрий Яковлевич
доктор физ.-мат. наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», старший научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «04» декабря 2018 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «___» октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационных исследований

В технологическом процессе горнодобывающей промышленности отводится особое место работе со скважинами, пробуренными для проведения взрывных, расчетных и исследовательских работ. Ошибки в определении глубины залегания скважины приводят к ухудшению качества подготовительного этапа взрывных работ и, как следствие, к увеличению себестоимости добываемой горной массы. Разработка нового оборудования, позволяющего проводить контроль глубины залегания скважины на основе использования упругих волн, позволит не только снизить трудоемкость, но и увеличить качество подготовки взрывных работ.

На сегодняшний день приборы, представленные на рынке, не отвечают требованиям маркшейдерских служб горнодобывающих предприятий, так как имеют существенные ограничения в использовании и низкую точность, зачастую требуют регулярной настройки и наличия эталонной скважины, в связи с чем не получили широкого распространения, а большинство маркшейдерских и геодезических отделов продолжают проводить контроль глубины залегания скважины механическим способом с помощью измерительных штанг или метрштоков.

Повышение точности акустических измерений является актуальной задачей для многих областей науки и техники. Таким образом, существует актуальная задача, заключающаяся в необходимости повышения точности ультразвуковых локационных устройств, акустический тракт которых представляет собой волновод круглого сечения.

Значительный вклад в повышение точности акустических измерений внесли зарубежные ученые: L. Angrisani, S.S. Huang, F.E. Gueuning, L. Mažeika, V. Samaitis, K. Burnham и другие. Исследовательские работы по разработке методик обработки принятых сигналов с целью повышения точности описаны в кандидатской диссертации Сорокина П.В., докторской диссертации Солдатова А.И.

Уменьшить погрешность акустических локаторов возможно с помощью повышения частоты излучения, что в свою очередь, вследствие затухания сигнала, приводит к уменьшению измеряемого диапазона, поэтому широко стали развиваться различные методы обработки эхо-сигналов, позволяющие уменьшить погрешности акустических локаторов, вносимые акустическим трактом скважины.

Цель исследования – разработка нового метода и технического средства для контроля глубины залегания скважины, пробуренной для проведения взрывных, расчетных и исследовательский работ.

Задачи исследования

- Разработать математическую модель распространения сигнала по волноводу круглого сечения.
- Разработать двухчастотный метод ультразвукового зондирования объекта контроля.
- Выявить характер влияния параметров зондирования и акустического тракта, таких как длина и диаметр скважины, наличие отклонения ствола скважины от идеальной цилиндрической формы и др. на погрешности измерения глубины.
- Провести экспериментальные исследования точности акустических измерений при двухчастотном методе зондирования скважины.
- Определить технические и эксплуатационные требования, предъявляемые к акустическим скважинным глубиномерам.
- Разработать макетный образец акустического скважинного локатора.

Объектом исследования является акустический тракт скважинного глубиномера.

Предметом исследования является разработка метода двухчастотного зондирования скважины, основанного на поочередном излучении двух сигналов различных частот.

Научная новизна

- Разработан способ обработки двухчастотного сигнала для определения момента прихода эхо-импульса путем сравнения времен распространения упругой волны на разных частотах и вычисления временной координаты первого периода обоих эхо-сигналов, позволяющий повысить точность ультразвукового лоатора.

- Выявлен характер влияния параметров акустического тракта, представляющего собой волновод круглого сечения с жесткими стенками (соотношения частот, диаметра скважины, глубины залегания скважины, наличие отклонения скважины от цилиндрической формы, параметров зондирования) на точность контроля.

- Выявлен характер влияния параметров зондирования на точность контроля. Показано, что для соотношения частот зондирования в диапазоне от 1:1,05 до 1:1,25 достигаются наименьшая погрешность контроля.

- Создано устройство компенсации погрешности ультразвукового лоатора и алгоритм расчета временной координаты начала эхо-сигнала, позволяющие в два раза увеличить точность контроля по сравнению с аналогами.

Практическая значимость заключается в том, что:

- разработан способ двухчастотного зондирования, новизна которого подтверждена двумя патентами на изобретения,

- предложены схемотехнические решения реализации акустического лоатора, защищенные патентами РФ.

- разработан алгоритм обработки акустических сигналов, защищенный свидетельством о регистрации программ для ЭВМ.

- Предложена модель для анализа акустического тракта, позволяющая определить оптимальное соотношение частот зондирования.

Предложенный способ определения временного положения начала эхо-импульса позволил в два раза повысить точность ультразвукового лоатора.

Основные положения, выносимые на защиту

- Математическая модель волноводного акустического тракта круглого сечения с жесткими стенками на основе метода геометрической акустики,

позволяющая проводить исследования в широком диапазоне изменения параметров зондирования и акустического тракта

- Способ определения временной координаты эхо-импульса при двухчастотном зондировании объекта контроля, позволяющий уменьшить погрешность определения дистанции в два раза по сравнению с аналогами.

- Для достижения минимальной погрешности результатов контроля (менее 0,5%) необходимо выбирать соотношение частот в диапазоне от 1:1.05 до 1:1,25.

Реализация результатов работы

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

Полученные в работе результаты позволили повысить качество и снизить трудозатраты подготовительного этапа взрывных и расчетных работ.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в отделении электронной инженерии инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Томского политехнического университета в курсах «Электронные промышленные устройства» и «Применение ультразвука в технике и медицине», а также при подготовке магистерских диссертаций.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов полученных результатов и выводов обеспечивается корректным применением современных численных методов, многочисленными экспериментальными исследованиями, устойчивой воспроизводимостью результатов и сопоставлением результатов, полученных разными методами и другими авторами. Достоверность полученных результатов подтверждается практической разработкой прибора для определения глубины залегания взрывных и исследовательских скважин.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях:

- VIII международная IEEE-Сибирской конференции по управлению и связи

«SIBCON-2009», Томск, 2009,

- Современные техника и технологии: XVI Международной научно-практической конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 12-16 апреля 2010 г.

- Инженерия для освоения космоса: IV Всероссийский молодежный форум с международным участием, г. Томск, 12-14 апреля 2016 г

- Перспективы развития фундаментальных наук: XIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 26-29 апреля 2016 г.

- Неразрушающий контроль: VI Всероссийская научно-практическая конференция "Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность", Томск, 23-27 мая 2016 г.

- Control and Communications (SIBCON): Proceedings of the XII International Siberian Conference, Moscow, May 12-14, 2016.

- Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: V Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 25-29 мая 2015 г.

- Control and Communications (SIBCON) : International Siberian Conference on Russia, Omsk, May 21-23, 2015

- Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS): proceedings of the International Conference, Tomsk, 1-4 December, 2015.

- Электронные и электромеханические системы и устройства: XIX научно-техническая конференция (Томск, 16-17 апреля 2015 г.)

- Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS): proceedings of the International Conference, Tomsk, 16-18 October, 2014.

- Современные техника и технологии: XVI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 12-16 апреля 2010 г

- Физические основы диагностики материалов и изделий и приборов для ее реализации: Всероссийская научно-техническая конференция (12-13 ноября 2010 г.).

Личный вклад автора заключается в:

- разработке методики двухчастотного зондирования волновода и обработки принятых данных;
- разработке математической модели акустического тракта методом геометрической акустики;
- проведении экспериментальных исследований и интерпретации данных при испытаниях скважинного глубиномера;
- написании статей по результатам выполненных исследований.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 7 статей из перечня Scopus и WoS, а также 4 патента РФ и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационных исследований

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 115 работ, трех приложений, содержит 126 страниц текста, 59 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационных исследований. Сформулирована цель диссертационной работы, поставлены основные задачи исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В главе I диссертационной работы дается описание объекта контроля, существующих методов и средств измерений. Особое внимание уделяется методам определения временной координаты начала эхо-импульса.

Объектом контроля в описываемом исследовании являются горно-геологические скважины, пробуренные для проведения расчетных, взрывных и исследовательских работ на горно-рудных месторождениях.

Скважины делятся на геологоразведочные и взрывные. От первых зависит качество определения объемов и точных координат залежей полезного ископаемого, а от вторых – качество его извлечения из недр.

Точные расчеты при проведении взрывных работ позволяют уменьшить себестоимость добываемой горной массы, поэтому особое внимание уделяется подготовке и контролю взрывных скважин.

Расчет количества взрывчатого вещества происходит на конкретную глубину залегания скважин. Ошибки в определении глубины скважины могут приводить к ухудшению качества добываемой массы и необходимости дополнительного дробления породы или возникновению риска обвала кровли выработки.

При работе со взрывными скважинами контроль глубины залегания происходит не в момент бурения, а при подготовке массового взрыва. Вследствие движения горных пород, скважина может пересыпаться или пережиматься, что может привести к отклонению взрыва от расчета, поэтому очень важно получить максимально достоверные результаты контроля глубины залегания скважины в момент закладки взрывчатых веществ. Следовательно, повышение точности определения глубины залегания взрывных скважин является актуальной задачей, решение которой позволит избежать дополнительных расходов и приведет к снижению себестоимости извлекаемой горной массы.

На большинстве горнодобывающих предприятий контроль глубины скважин производится механическим способом. При этом контроль скважин, пробуренных вертикально вниз, является наименее трудозатратным и достаточно точным. Горизонтальные скважины и скважины, пробуренные вертикально вверх требуют существенных физических усилий и специального оборудования: штанги, жесткие рейки и т.п.. Точность контроля при этом существенно снижается, а время-затраты увеличиваются, в том числе из-за ограничения доступа к части скважин. Возникают существенные ошибки контроля глубины скважин, выбившихся в полость соседней выработки.

Допустимая погрешность для железодобывающих месторождений составляет 0,3 метра для взрывных скважин.

Измерительный принцип большинства акустических приборов основан на определении времени распространения ультразвуковых колебаний от источника до приемника, получивший название Time-of-flight technique (TOF) в зарубежной литературе. Метод предполагает излучение сигнала, прохождение сигнала через контролируемый объект, отражение и принятие сигнала приемником. Погрешность измерения обусловлена несколькими факторами: влиянием температуры и состава среды на скорость распространения упругих колебаний, а также изменением формы огибающей переднего фронта принятого сигнала, поэтому фиксация времени распространения импульса моментом достижения сигналом опорного уровня приводит к погрешности равной нескольким периодам несущей частоты.

Для обработки акустических сигналов с высокой точностью используются специальные математические методы: преобразование Гилберта, использованием функции перекрестной корреляции (cross-correlation function), использованием дискретного расширенного фильтра и рекурсивного фильтра Калмана. Однако этот сложный алгоритм преобразования можно реализовать только на персональном компьютере. В портативных приборах, без использования мощных процессорных ядер, реализация этих методов фактически невозможна.

Более точными являются методы с привязкой к разнице фаз между принятым и излученным сигналом: signal-frequency continuous wave phase shift, multifrequency continuous wave phase shift. Эти методы ограничены в использовании небольшим измеряемым расстоянием. Объединение в одном устройстве TOF метода и фазовой фиксации позволяют существенно повысить точность акустических измерений.

Несмотря на большую погрешность TOF метод является самым распространенным на сегодняшний день для портативных и переносных устройств, поэтому вопрос повышения точности этого метода является актуальной задачей. Увеличить границы применимости TOF метода можно за счет оригинальных алгоритмов обработки эхо-сигналов: метод одного

компаратора с поправочным коэффициентом, метод двух компараторов, метод построения огибающей сигнала по трем точкам. Однако невозможность спрогнозировать крутизну нарастания переднего фронта огибающей эхо-сигнала не дает определить временную координату начала принятого сигнала с точностью, превышающей 1-5 периодов.

Во **второй главе** приводится описание метода двухчастотного зондирования, а также математической модели акустического сигнала, на основе которой проведен анализ погрешностей разрабатываемого метода контроля для различных случаев: разного соотношения частот, изменение порога срабатывания компаратора, зависимость погрешности от глубины залегания скважины.

Для контроля глубины скважины предлагается использовать двухчастотное зондирование объекта контроля, а также итерационную обработку полученных данных. При контроле проводят излучение двух сигналов на разных частотах и измерении двух временных интервалов между излученным импульсом и принятым эхо-сигналом, по моменту срабатывания компаратора.

Для двух принятых эхо-сигналов разных частот срабатывание компаратора происходит в разное время относительно сигнала зондирования – точки t_1 и t_2 (рисунок – 1).

После определения временных координат t_1 и t_2 по моменту срабатывания компаратора, проводится итерационное вычисление в соответствии с выражением:

$$(t_1 - n \cdot T_1) - (t_2 - n \cdot T_2) < 0, \quad , \quad (1)$$

где T_1 – период колебаний первой ультразвуковой волны, T_2 – период колебаний второй ультразвуковой волны, $(n-1)$ – номер коррекции, t_1 – первый измеренный временной интервал, t_2 – второй измеренный временной интервал.

Выражение $(t_1 - (n-1) \cdot T_1)$ используют при определении расстояния до отражающей поверхности.

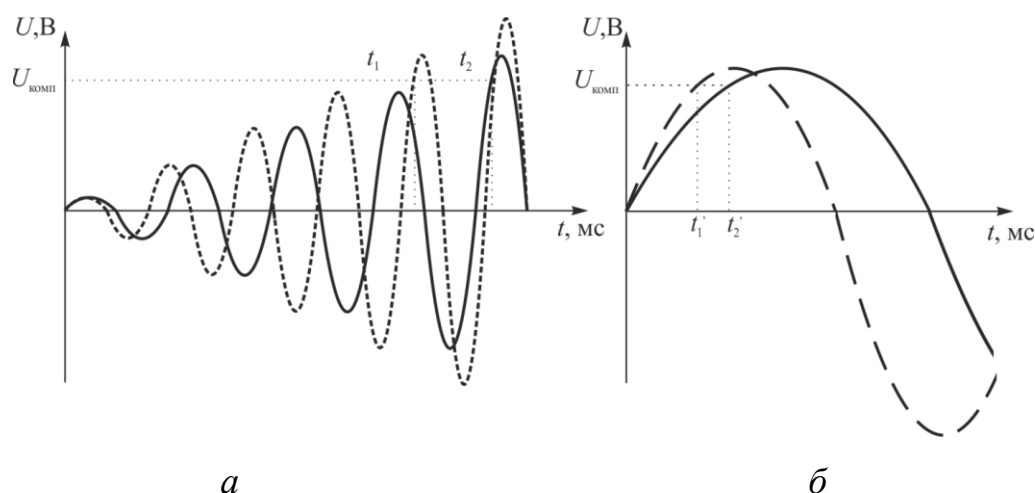


Рисунок – 1. Осциллограммы начальной части двух эхо-сигналов (сплошная линия – первый эхо-сигнал с периодом повторения T_2 , пунктирная линия – второй эхо-сигнал с периодом повторения T_1), а – момент срабатывания компаратора, б – результат выполнения корректировки, где $U_{\text{п}}$ – пороговое напряжение компаратора; t_1, t_2 – время срабатывания компаратора для 1 и 2 частоты соответственно; t'_1, t'_2 – временные интервалы после проведения корректировки.

Для вычисления расстояния, пройденного упругой волной необходимо выполнить следующие действия:

1) *Выбор излучаемых частот.* Первой выбирается большая частота, именно она определяет максимально возможное измеряемое расстояние. Выбор второй частоты обусловлен свойствами излучателя.

2) *Поочередное излучение сигналов на двух разных частотах,* фиксация времен t_1 и t_2 .

3) *Построение итерационной матрицы:*

$$\begin{pmatrix} t_1 - t_2 \\ (t_1 - T_1) - (t_2 - T_2) \\ (t_1 - 2 \cdot T_1) - (t_2 - 2 \cdot T_2) \\ \vdots \\ (t_1 - n \cdot T_1) - (t_2 - n \cdot T_2) \end{pmatrix}$$

4) *Определение числа n , при котором достигается минимальное положительное значение члена итерационной матрицы.*

5) *Вычисление временного интервала согласно формуле:*

$$t_0 = (t_1 - (n-1) \cdot T_1),$$

где n – количество итераций, которые необходимо произвести до достижения $t_{\min}$ минимального положительного значения

$(n-1)$ – номер периода принятого сигнала, в котором произошло срабатывание компаратора.

Метод двухчастотного зондирования имеет максимальную погрешность измерения – $T_1/4$, что бесспорно является его преимуществом.

Для описания акустического сигнала, прошедшего через волновод, допустимо применение методов геометрической акустики. С точки зрения математики, методы геометрической акустики представляют собой предельный случай волновой теории при стремлении длины волны к нулю. Методы геометрической акустики аналогичны методам геометрической оптики, применим закон Снелиуса об отражении и преломлении лучей на границе двух сред, применяется фокусировка звука и рефракция в неоднородных средах.

Использование метода геометрической акустики для расчета сигнала, прошедшего по скважине, возможно вследствие ряда факторов: длина волновода l существенно превышает длину волны сигнала, т.е. $l \gg \lambda$, в скважине отсутствует движение воздуха, вследствие чего не будет появляться доплеровский сдвиг по частоте.

Для определения зависимости погрешности представляемого метода от различных факторов была построена математическая модель принятого сигнала после прохождения по волноводу круглого сечения в программном пакете Delphi.

Излучаемый сигнал можно представить бесконечным количеством расходящихся лучей. Для них будет выполняться закон Снелиуса. В то же время не все лучи попадут на приемник, а только те, чья траектория проходит через приемник.

Рассчитать расстояние, пройденное каждой модой от источника сигнала до приемника можно по формуле:

$$S = 2 \cdot n \cdot \sqrt{\left(\frac{L}{2 \cdot n}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2},$$

где n – порядок моды, L – длина волновода, d – диаметр волновода.

Сигнал, пришедший на приемник, описывается выражением:

$$U(t) = \sum_{n=0}^N \left(\left(1 - e^{-t/\tau}\right) \cdot 1\left(t - \frac{L}{v}\right) - \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \cdot 1(t - t_{nn}) \right) \cdot U_{\Sigma}(t),$$

где $1\left(t - \frac{L}{v}\right)$ и $1(t - t_{nn})$ – функции Хевисайда, позволяющие восстановить

сигнал с учетом задержек на распространение каждой моды, $\sum_{n=0}^N U_{\Sigma}(t)$ – сумма всех мод, пришедших на приемник с задержкой на распространение в зависимости от пройденного расстояния, $e^{-t/\tau}$ – параметр, определяющий скорость нарастания фронта сигнала, t_{nn} определяется длительностью зондирующего сигнала.

В модели предусмотрено влияние температуры окружающей среды на скорость распространения упругих колебаний в воздухе, а также состав воздуха, находящегося в скважине, который может отличаться в зависимости от месторождения, на котором ведется добыча. Кроме того учтены собственные резонансные свойства приемника акустического сигнала. Соотношение частот резонанса приемника и частоты излучения могут существенно повлиять на форму огибающей переднего фронта эхо-сигнала.

Результаты моделирования по определению погрешности двухчастотного метода зондирования представлены на рисунках 2 – 4.

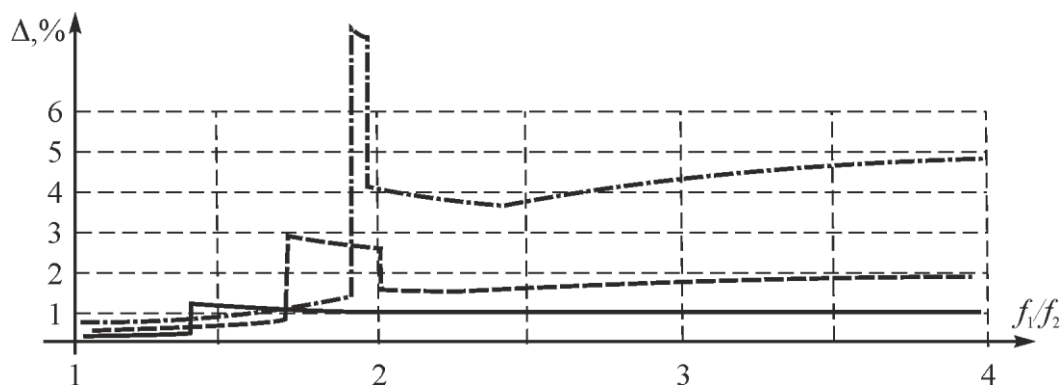


Рисунок – 2 Зависимость погрешности измерения от соотношения частот для различных измеряемых расстояний: штрих-пунктирная линия – 10 метров, пунктирная линия – 30 метров, сплошная линия – 80 метров.

Как видно из представленных на рисунке – 2 графиков, минимальная погрешность достигается при соотношении частот от 1,05 до 1,3. Для больших расстояний этот промежуток сокращается, следовательно, для контроля скважин протяженностью до 100 метров необходимо выбирать частоты с соотношением от 1,05 до 1,25.

Изменение порогового напряжения при отсутствии в обработке сигнала автоматической регулировки усиления, будет оказывать влияние на погрешность измерения. Зависимость погрешности двухчастотного метода зондирования от измеряемого расстояния при различных пороговых напряжениях, по результатам моделирования, изображена на рисунке 3.

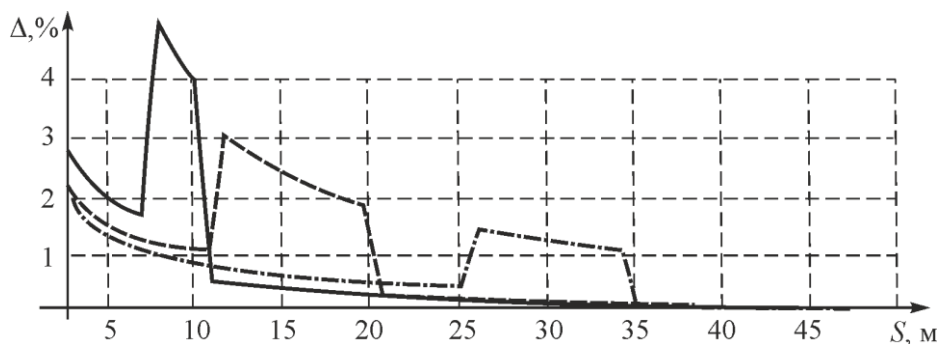


Рисунок – 3 Зависимость погрешности двухчастотного метода зондирования от измеряемого расстояния при различных пороговых напряжениях для случая: $f_2/f_1 = 1,05$. Сплошная линия – $U_{\text{комп}} = 0,5 \cdot U_{\text{max}}$, пунктирная – $U_{\text{комп}} = 0,3 \cdot U_{\text{max}}$, штрихпунктирная – $U_{\text{комп}} = 0,2 \cdot U_{\text{max}}$.

Участки с повышенной погрешностью на рисунке 3 связаны со срабатыванием компаратора в разных по счету периодах для сигналов разных частот. Если до проведения измерений известен диаметр измеряемой скважины,

то можно избежать возникновения дополнительных ошибок измерения. Для этого в алгоритме работы прибора предусмотрен ввод информации о диаметре скважины до ее измерения.

Применение блока автоматической регулировки усиления (АРУ) позволит исключить вероятность срабатывания компаратора в разных по счету периодах, и как следствие сохранить точность контроля глубины залегания скважины. Зависимость погрешности двухчастотного метода зондирования от измеряемого расстояния с использованием блока АРУ для соотношения частот $f_2/f_1 = 1,05$ изображена на рисунке 4.

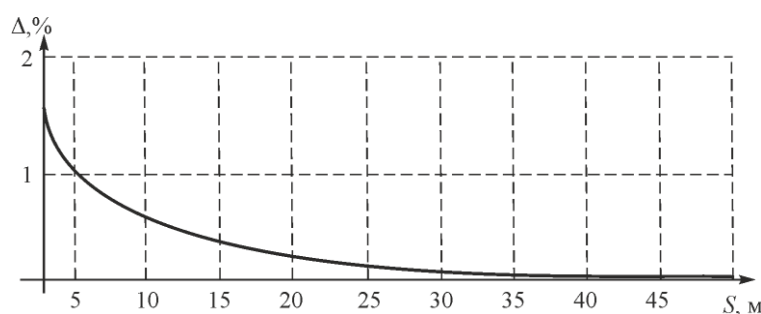


Рисунок – 4 Зависимость погрешности двухчастотного метода зондирования от измеряемого расстояния для случая: $f_2/f_1 = 1,05$.

Как видно из рис.4, в диапазоне от 0 до 5 метров, погрешность измерения превышает 1%, поэтому в случае измерения коротких скважин необходимо введение дополнительных корректировок. Наибольшее влияние на небольших расстояниях (соизмеримых с длиной волны) оказывает фаза сигнала, поэтому введение корректировки угла поможет скомпенсировать ошибки в измерении.

Для измерения небольших скважин возможно повышение частоты сигналов, что позволит получить более точные результаты (Рисунок 5).

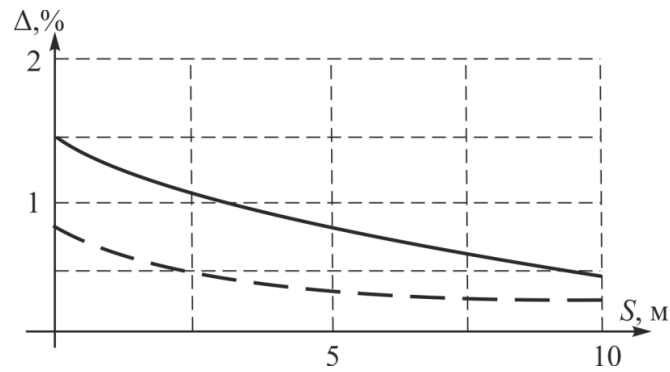


Рисунок – 5 Изменение погрешности измерения при увеличении зондирующих частот в 2 раза (сплошная линия для частот $f_2/f_1 = 1,05$, пунктирная – $f_3 = 2 \cdot f_1$, $f_4 = 2 \cdot f_2$).

В **третьей главе** описывается практическая реализация проведенных исследований.

Для проверки результатов теоретических исследований, была создана экспериментальная установка, содержащая ультразвуковой локатор и акустический тракт (Рисунок – 6). Акустический тракт представляет собой круглый волновод с жесткими стенками диаметром 210 мм и длиной 50 м. Отличительной особенностью акустического скважинного локатора является наличие блока итерационной обработки эхо-сигналов, защищенного патентом РФ.

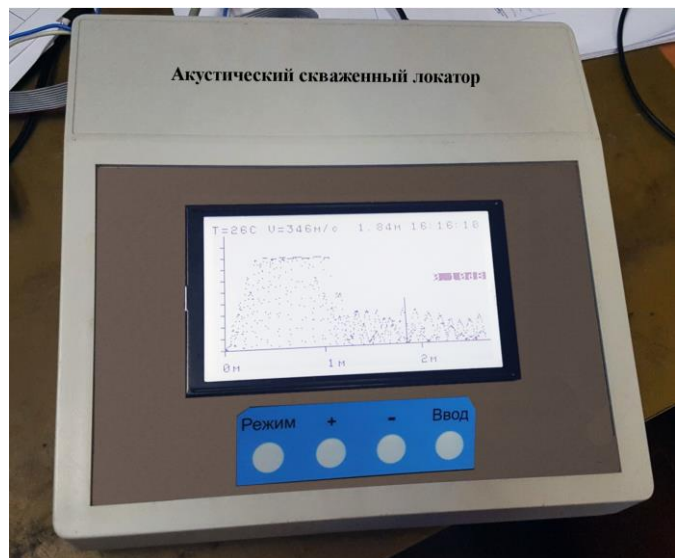


Рисунок – 6. Экспериментальная установка, акустический тракт (а), локатор (б)

В ходе лабораторных испытаний была исследована погрешность контроля длины волновода для трех соотношений частот: $f_2 = 2 \cdot f_1$, $f_2 = 1,5 \cdot f_1$, $f_2 = 1,1 \cdot f_1$. Результаты лабораторных исследований приведены на рисунке 7.

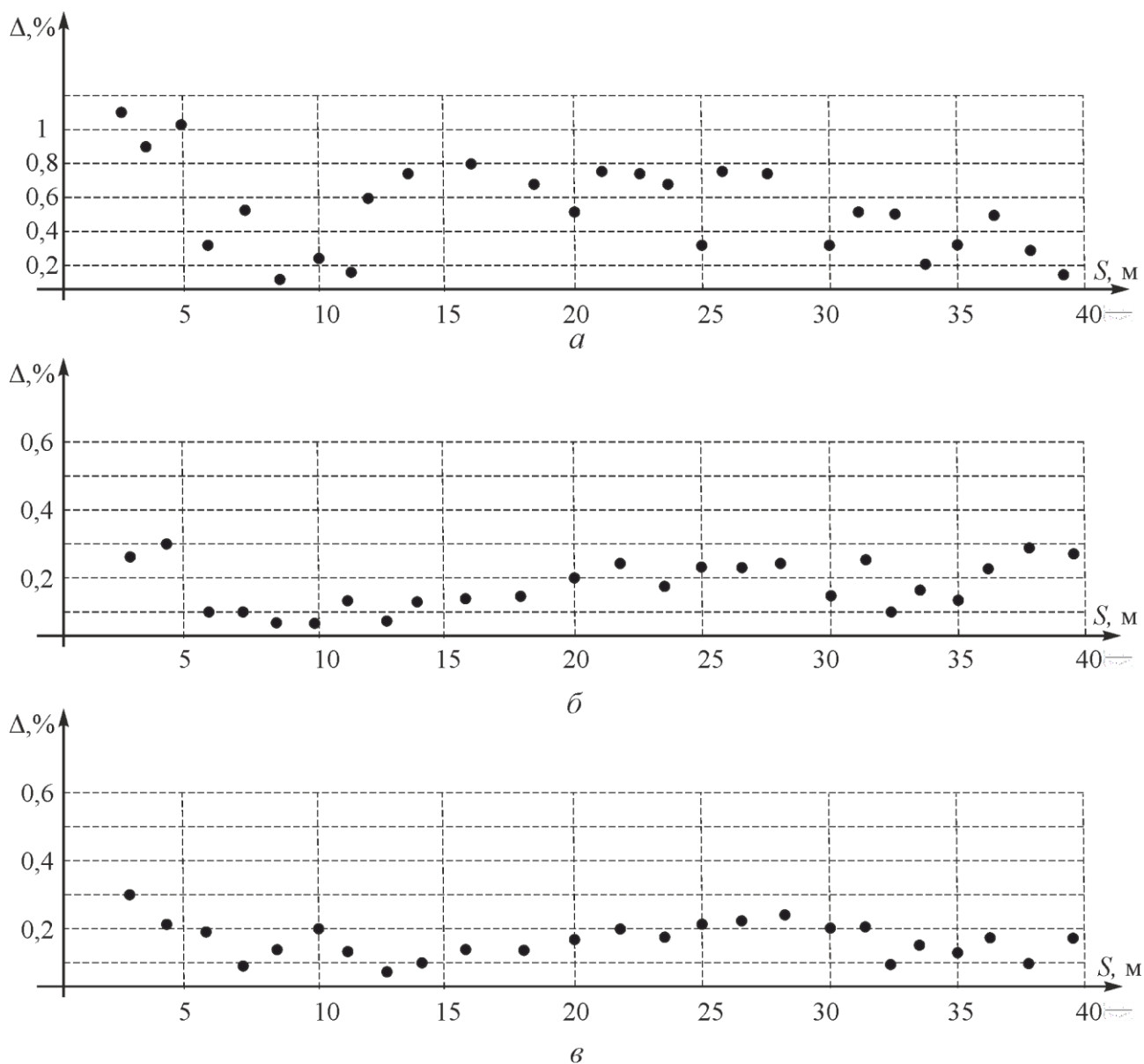


Рисунок – 7 Погрешность измерения расстояния для разного соотношения частот: а – $f_2/f_1 = 2$, б – $f_2/f_1 = 1,5$, в – $f_2/f_1 = 1,1$.

Из представленного графика погрешности видно, что с увеличением соотношения между зондирующими частотами возрастает погрешность измерения, что доказывает третье защищаемое положение.

Кроме серии лабораторных испытаний были проведены и натурные испытания на базе Таштагольского филиала Евразруда. Максимальная погрешность при измерении скважин в диапазоне от 3 до 7 метров не

превышает 20 см, по заключению комиссии из сотрудников маркшейдерской службы АО ЕВРАЗ Руда точность измерения соответствует требованиям к горнорудным месторождениям. На всем представленном диапазоне при исследовании скважин длиной от 10 до 60 метров погрешность измерения не превышает 1%, что полностью соответствует результатам моделирования.

Основные научные результаты и выводы

- В ходе работы был разработан и испытан метод определения временной координаты отраженного эхо-импульса посредством двухчастотного зондирования.

- Проведенные на математической модели теоретические исследования точностных характеристик метода показали, что в случае правильного выбора параметров излучаемых частот и использовании автоматической регулировки усиления сигнала, погрешность измерения не превышает 1%.

- При проведении лабораторных испытаний максимальная погрешность составила 0,4% от измеряемого расстояния. Натурные испытания показали более низкую точность – 3%, что связано с некорректным считыванием информации с датчика температуры. При пересчете данных снятых в процессе испытания с поправкой на температуру максимальная погрешность составила 0,6% на скважинах до 5 метров. При этом абсолютная погрешность находится в пределах нормы для железндобывающих предприятий.

- Полученные в ходе работы акты о проведении натурных испытаний и внедрения, отзывы и предложения от других горнодобывающих предприятий говорят об актуальности разработки, а также о возможности коммерциализации.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА

1. **Shulgina, Yu.V.** New generation acoustic borehole depth guide [Electronic resource] / E. M. Shulgin, Yu. V. Shulgina (Chiglintseva); sci. adv. A. I. Soldatov, M. V. Kuimova // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность : сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 25-29 мая 2015 г. в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Т. 2. – [С. 466-469].
-

2. **Shulgina, Yu.V.** The increase of ultrasound measurements accuracy with the use of two-frequency sounding [Electronic resource] / Yu. V. Shulgina [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81 : Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials. – [012103, 6 p.].
3. **Shulgina, Yu.V.** Measurement error reducing in the ultrasound time-pulse systems [Electronic resource] / A. I. Soldatov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81 : Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials. – [012117, 10 p.].
4. Influence of the echo shapes on the result of tomographic image [Electronic resource] / P. V. Sorokin [et al.] // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Russia, Omsk, May 21-23, 2015 : proceedings. – IEEE, 2015. – [4 p.].
5. **Шульгина, Ю.В.** Влияние уровня срабатывания компаратора на точность ультразвуковых измерений при двухчастотном методе зондирования / О. В. Булгакова, Ю. В. Шульгина // Электронные и электромеханические системы и устройства: XIX научно-техническая конференция, Томск, 16-17 апреля 2015 г. тезисы докладов. – Томск: Полюс, 2015. – С. 68-70.
6. **Шульгина, Ю.В.** Определение временного положения эхоимпульса методом двухчастотного зондирования [Электронный ресурс] = Detecting the echo-impulse position by the dual-frequency sensing method / Ю. В. Шульгина [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 13. – [С. 152-154].
7. **Shulgina, Yu.V.** Mathematical analysis of the echo-impulse position detection by the dual-frequency sensing method [Electronic resources] / Yu. V. Shulgina [et al.] // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) : proceedings of the International Conference, Tomsk, 16-18 October, 2014 / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU) ; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – [S. l.]: IEEE, 2014. – [4 p.].
8. **Shulgina, Yu.V.** The echo-impulse position detection by the dual-frequency sensing method / Shulgina, Yu.V., Soldatov A. A. , Shulgin E. M. , Stepanova A. V. // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Omsk, May 21-23, 2015. – Новосибирск: IEEE Russia Siberia Section, 2015 – p. 1-3
9. Способ компенсации погрешности измерения ультразвукового лоатора / Солдатов А.И. , Шульгина (Чиглинцева) Ю.В. , Солдатов А.А. , Дичев Н.В. // Патент 2544310 Российская Федерация; Патентообладатель: Томский политехнический университет; Опубликовано 20.03.2015
10. Устройство компенсации погрешности измерения ультразвукового скважинного глубиномера / Солдатов А.И. , Шульгина (Чиглинцева) Ю.В. , Солдатов А.А. , Дичев Н.В. // Патент 2544311 Российская Федерация; Патентообладатель: Томский политехнический университет; Опубликовано 20.03.2015
11. **Шульгина, Ю.В.** Повышение точности определения временного положения эхо-импульса [Электронный ресурс] / Ю. В. Шульгина, А. И.

- Солдатов; науч. рук. А. И. Солдатов // Современные техника и технологии : сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 12-16 апреля 2010 гв 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2010. – Т. 1. – [С. 288-289].
12. **Шульгина, Ю.В.** Повышение точности ультразвуковых измерений методом двух компараторов [Электронный ресурс] / Ю. В. Шульгина, А. И. Солдатов // Известия Южного федерального университета. Технические науки : научно-технический и прикладной журнал. – 2010. – Т. 110, № 9. – [С. 102-106].
 13. **Шульгина, Ю.В.** Ультразвуковой скважинный глубиномер нового поколения / Ю. В. Шульгина, А. И. Солдатов // Физические основы диагностики материалов и изделий и приборов для ее реализации : материалы Всероссийской научно-технической конференции (12-13 ноября 2010 г.). – Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. – С. 6-9.
 14. **Шульгина, Ю.В.** Определение временного положения эхо-импульса методом аппроксимации огибающей, описываемой полиномами второй и третьей степени / С.А. Шестаков [и др.] // Электронные и электромеханические системы и устройства: XVIII научно-техническая конференция, 22-23 апреля 2010 г. Тезисы докладов. – Томск: Полус, 2010.
 15. **Шульгина, Ю.В.** Теоретическое и экспериментальное исследование акустического тракта скважинного глубиномера [Электронный ресурс] / А. И. Солдатов, Ю. В. Чиглинцева (Шульгина) // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ] / Томский политехнический университет (ТПУ). – 2009. – Т. 315. № 4: Энергетика. – [С. 85-89].
 16. **Шульгина, Ю.В.** Повышение точности измерения скважинных глубиномеров [Электронный ресурс] / Ю. В. Чиглинцева; науч. рук. А. И. Солдатов // Современные техника и технологии : сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 4-8 мая 2009 гв 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2009. – Т. 1. – [С. 265-266].
 17. **Shulgina(Chiglintseva), Yu.V.** Ultrasonic Borehole Depth-Gauge [Electronic resources] / A. I. Soldatov, J. V. Shulgina (Chiglintseva) // International Siberian Conference on Control and Communications. Sibcon-2009 : proceedings Russia, Tomsk, March 27-28, 2009. – Tomsk: 2009. – [P. 313-317].
 18. **Шульгина, Ю.В.** Повышение точности акустических измерений методом при детектировании сигнала одним компаратором [Электронный ресурс] / О. Ю. Терентьева, Ю. В. Шульгина // Неразрушающий контроль : сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции "Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии,

- безопасность", Томск, 23-27 мая 2016 г. в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2016. – Т. 2. – [123-125 с.].
19. **Шульгина, Ю.В.** Повышение точности акустических измерений при использовании метода двух компараторов [Электронный ресурс] / Юй Пэнчао, Шульгина Ю.В.; науч. рук. Ю. В. Шульгина // Неразрушающий контроль : сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции "Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность", Томск, 23-27 мая 2016 г. в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2016. – Т. 2. – [178-181 с.].
 20. **Шульгина, Ю.В.** Повышение точности акустических измерений / О.Ю. Терентьева, Ю.В. Шульгина // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», Томск, 25-27 мая 2016 г. в шести частях. – 2016. – Т. 2. – 93-95с.
 21. **Шульгина, Ю.В.** Математическое моделирование акустических сигналов методом геометрической акустики / А.Л. Старостин, Ю.В. Шульгина // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», Томск, 25-27 мая 2016 г. в шести частях. – 2016. – Т. 2. – 90-93с.
 22. **Shulgina, Yu.V.** Simulation of acoustic signals in a waveguide of circular cross section / Shulgina Y.V., Starostin A.L., Kostina M.A., Mylnikova T.S., Soldatov A.I. – // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems: Proceedings of International Conference, Tomsk, December 1-4, 2015. – Tomsk: TPU Publishing House, 2015 – p. 1-4.
 23. **Shulgina, Yu.V.** Acoustic borehole depth-gauge with the dual-frequency sensing method / Shulgina Y.V., Soldatov A.A., Shulgin E.M., Kudryashova A.V. // Source of the Document 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016: proceedings, 12-14 May 2016.
 24. RU 2016618647 «Программа расчета временной координаты начала эхо-сигнала при двухчастотном зондировании» по заявке 2016616269 от 14.06.2016, опубл. 20.08.2016 / Солдатов А.И., Шульгина Ю.В., Сорокин П. В., Солдатов А.А.
 25. Патент RU 2 599 602 C1 «Способ компенсации погрешности измерения ультразвукового локатора» по заявке № 2015122824/28 от 15.06.2015, опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28/ Солдатов А.И., Шульгина Ю.В., Солдатов А.А., Сорокин П.В., Солдатова М.А.
 26. Патент RU 2 596 907 C1 «Устройство компенсации погрешности измерения ультразвукового локатора» по заявке №2015122093/28 от 09.06.2015, опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25 / Солдатов А.И., Шульгина Ю.В., Солдатов А.А., Сорокин П.В., Солдатова М.А., Шульгин Е.М.
 27. Shulgina, Y.V., Sorokin, P.V., Kostina, M.A., Shulgin, E.M., Rozanova, Y.V. – Distance determination based on dual frequency method with phase

correction // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings. 29-30 June 2017.
