

Хмелинин Алексей Павлович

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ
ВЫБОРА МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ СКВАЖИН ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ИХ БУРЕНИЯ

Специальность 25.00.16 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая
геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2014

Работа выполнена в лаборатории горной геофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: Виктор Николаевич Опарин,
доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук,
заведующий отделом

Официальные оппоненты: Вознесенский Александр Сергеевич,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», профессор

Смирнов Николай Александрович,
кандидат технических наук, Новационная фирма
«КУЗБАСС-НИИОГР», научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «25» декабря 2014 года в 13-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.102.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс (384-2) 58-33-80, e-mail: rector@kuzstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте организации по адресу <http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/>

Автореферат разослан «__» ноября 2014 года

Ученый секретарь
диссертационного совета

Иванов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проходка скважин широко используется в горном деле и строительстве не только для технологических целей при добыче полезных ископаемых, но и для диагностики и контроля напряжённо-деформированного состояния массивов горных пород, получения непосредственной информации об их физико-механических свойствах. Велика роль такого рода информации для оценки остаточного ресурса крепей капитальных горных выработок – весьма важных подземных сооружений, отвечающих за устойчивость горных выработок в условиях повышенного горного давления или в ослабленных зонах тектонических нарушений породных массивов.

Так, для оценки, например, остаточного ресурса железобетонной крепи необходима информация о прочностных свойствах бетона, которые обычно определяются на основе лабораторных испытаний кернов на растяжение и сжатие, а также о действующих в крепи напряжениях. Бурение специальных скважин геомеханических и горно-геофизических измерений позволяет наиболее точно оценить действующие в крепи и окрестном породном массиве напряжения. При пересчете результатов измерений в значения действующих напряжений, как правило, предполагается, что исследуемый участок крепи представляет собой сплошную, изотропную, линейно-упругую, однородную геосреду. Однако, наличие естественных и искусственных механических неоднородностей (пустоты, зоны разуплотнения, металлическая арматура) в местах проведения инструментальных геомеханических измерений может искажать получаемые результаты. Это, в свою очередь, может повлиять на достоверность экспериментальных данных и, как следствие, вызвать ошибки в проектных расчетах. Поэтому выбор места заложения измерительных скважин при исследовании НДС сплошных бетонных и железобетонных крепей является актуальной научной задачей.

При этом следует также учитывать, что на возможность проведения инструментальных геомеханических измерений и достоверность их результатов влияет искривление ствола скважины. Поэтому при бурении измерительных скважин отечественными буровыми станками ударного действия необходимо отслеживать искривления ствола создаваемой скважины, и, следовательно, требуются системы контроля местоположения буровых снарядов, позволяющие получать информацию в режиме реального времени. Повышенные издержки, связанные с необходимостью повторного бурения и затратами на замену породоразрушающих инструментов могут быть минимизированы применением управляемых рабочих органов с системой определения их координат.

Существующие зарубежные и отечественные контрольно-измерительные системы (фирмы Digital Control Inc., НПИ «Сенсе»; системы Eclipse, магстип, SNS-200, SNS-300 и т.п.), применяемые в системах горизонтального направленного бурения, определяют координаты буровых снарядов с помощью установленных в них передающих антенн, сигналы от которых принимаются на поверхности земли, позволяя вычислить искомые координаты. Однако использование данных систем в установках ударно-вращательного бурения весьма ограничено, поскольку передающие антенны подвержены значительным ударным перегрузкам, что

приводит к их быстрому выходу из строя. Более рациональным является использование непосредственно создаваемых буровым снарядом породоразрушающей машины акустических импульсных сигналов на поверхности обнажения. Их регистрация и анализ позволяют устанавливать местоположение бурового снаряда, а следовательно, и забоя проходимой скважины.

Таким образом, необходимость получения комплексной информации о физико-механических свойствах геоматериалов и одновременно – о местоположении буровых снарядов при бурении скважин геомеханического контроля свидетельствует об актуальности темы диссертационных исследований.

Диссертационные исследования выполнялись в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.» (государственные контракты: №П1117 от 02 июня 2010 года, рук. к.т.н. Денисова Е.В.; № 02.740.11.0819 от 24 апреля 2010 года, рук. д.т.н. Смоляницкий Б.Н., №8318 от 17 августа 2012 года, рук. к.т.н. Неверов С.А.) и были отмечены стипендией Правительства Новосибирской области в 2012 году, грантом мэрии г. Новосибирска в 2014 году.

Результаты диссертационной работы могут применяться на горных предприятиях страны для обоснованного выбора места заложения измерительных скважин геомеханического контроля сплошных бетонных и железобетонных крепей, а также для контроля процесса бурения измерительных скважин. В строительстве могут применяться результаты, составляющие второй этап Комплексного метода – для контроля процесса проходки горизонтальных скважин при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций в грунтовом массиве.

Объект исследований – геосреда с механическими неоднородностями во взаимодействии с породоразрушающей машиной в процессе бурения скважин.

Предмет исследований – параметры распространения электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона и акустических волн в геоматериалах.

Цель работы – разработка комплексного геофизического метода для выбора места расположения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения в геосредах, позволяющего исключить попадание породоразрушающего инструмента буровой машины ударного действия в закрепные пустоты приконтурного массива и в места локализации арматуры в железобетонной крепи подземных выработок, а также определять его пространственные координаты.

Идея работы заключается в использовании электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона для выявления искусственных и естественных механических неоднородностей по электрофизическим свойствам геосреды, а акустических волн – для определения направления бурения скважины, сооружаемой породоразрушающими машинами ударного действия.

Задачи исследований:

1. Исследовать влияние нарушенности и влажности закрепного пространства на глубинность георадиолокационного обследования зоны контакта «железобетонная крепь – массив вмещающих пород» методом физического моделирования;
2. Разработать и обосновать методику обследования участка железобетонной крепи горной выработки георадиолокационным методом для выбора места заложения измерительных скважин геомеханического контроля;

3. Разработать и исследовать экспериментальный образец многоканальной акустической измерительной системы определения местоположения рабочего органа буровой машины ударного действия для контроля процесса и направления бурения горизонтальных скважин в грунтовом массиве в режиме реального времени.

Научная новизна исследований заключается в:

– Разработке методики обследования участка железобетонной крепи подземных горных выработок георадиолокационным методом, позволяющей выбирать места, пригодные для бурения измерительных скважин геомеханического контроля, исключая попадание ствола скважины в зоны локализации механических неоднородностей;

– Разработке алгоритма определения пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия и его реализации в многоканальной акустической измерительной системе, позволяющей осуществлять контроль процесса бурения скважин;

– Разработке технического средства для определения направления поворота рабочего органа буровой машины вокруг оси движения в процессе проходки скважины.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании и оценке предельной дальности метода георадиолокации при обследовании механического состояния железобетонной крепи подземных горных выработок и разработке метода определения направления поворота бурового снаряда относительно оси движения с использованием системы ртутных датчиков.

Практическая ценность исследования состоит в обосновании методических подходов для выбора мест бурения измерительных скважин геомеханического контроля в железобетонных крепях горных выработок; разработке и реализации технических средств, позволяющих определять направление поворота рабочего органа буровой машины ударного действия вокруг оси движения и его пространственные координаты.

Методы исследований включают анализ научных и научно-технических источников информации в выбранном направлении исследований, теоретические расчеты, экспериментальные лабораторные и натурные исследования динамико-кинематических характеристик высокочастотных электромагнитных и акустических сигналов в геосредах, современные способы обработки экспериментальных данных геофизических измерений.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. При фиксированной частоте 2600 МГц зондирующего сверхвысокочастотного электромагнитного сигнала увеличение линейных размеров фракций нарушенного массива вмещающих пород в зоне механического контакта «железобетонная крепь – массив» до величин, соразмерных с длиной волны, приводит к снижению дальности действия георадиолокационного метода на 19%; при увеличении отношения диэлектрических проницаемостей бетона крепи и зоны нарушения на контакте «крепь – массив» до 1:4 дальность действия георадиолокационного метода уменьшается на 30%;

2. Разработанная методика обследования участка железобетонной крепи георадиолокационным методом позволяет выбирать места заложения измерительных скважин геомеханического контроля на основе 2D карт локализации обнаруженных механических неоднородностей, построенных по результатам георадарного обследования и анализа волновой структуры полученных радарограмм.

3. Разработанная многоканальная акустическая измерительная система позволяет определять пространственные координаты рабочего органа пневмоударной машины, движущейся в грунте, и контролировать процесс проходки скважины с погрешностью не более 12%, основываясь на вычислении времен задержки поступления акустического импульсного сигнала, индуцируемого пневмоударной машиной и регистрируемого на поверхности земли, относительно сигнала непосредственно с машины.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

– Использованием для проведения модельных и натурных экспериментов современной аппаратуры с высокими метрологическими характеристиками;

– Использованием современных методов теоретического анализа и значительным объемом экспериментальных данных;

– Соответствием данных натурального обследования железобетонной обделки подземных горных выработок георадиолокационным методом данным контрольного бурения скважин;

– Удовлетворительной точностью определения местоположения буровой машины ударного действия с помощью многоканальной акустической измерительной системы, реализованной на основе разработанного алгоритма определения пространственных координат источника акустического импульсного сигнала.

Личный вклад автора состоит в выполнении теоретических расчетов дальности обнаружения металлической арматуры в бетоне; выполнении физического моделирования процесса георадиолокационного обследования механического состояния вмещающих пород в зоне контакта «крепь – массив»; разработке порядка обследования участка железобетонной крепи подземной горной выработки георадиолокационным методом для выбора места проходки измерительных скважин геомеханического контроля, его апробация в натуральных условиях действующего горного предприятия; разработка алгоритма вычисления пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия; разработке многоканальной акустической измерительной системы на основе указанного алгоритма; выполнении натурных испытаний работоспособности предложенного алгоритма и многоканальной акустической измерительной системы; разработка технического средства определения угла поворота рабочего органа пневмоударной машины вокруг оси движения.

Реализация результатов работы. С помощью разработанного Комплексного метода ООО «Регион Строй-Монтаж» сооружен подземный переход для подвода коммуникаций к малоэтажному строению. На одном из горных предприятий Красноярского края выполнено обследование трех подземных камер с железобетонной крепью, даны рекомендации по выбору мест проходки измерительных скважин геомеханического контроля. Разработана методика георадиолокационно-

го обследования железобетонной крепи подземных горных выработок на наличие в ней механических неоднородностей.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на международных научных симпозиумах XIII и XV «Проблемы геологии и освоения недр» им. Академика М.А. Усова (Томск, 2009, 2011 гг.), международной научно-практической конференции «Четвертые Уткинские чтения» (Санкт-Петербург, 2009 г.), 5-ой Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2010 г.), международной научно-практической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» (Пенза, 2011 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (Новосибирск, 2012 г.), научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2012, 2013, 2014 гг.), Всероссийской конференции молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена – 2013» (Новосибирск, ИГД СО РАН, 2013 г.), Всероссийской конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, 2013, 2014 гг.), Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции «Науки о Земле. Современное состояние» (Новосибирск, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 в журналах, входящих в перечень ВАК, получен 1 патент РФ на изобретение и 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 135 страницах машинописного текста, содержит 18 таблиц, 52 рисунка; список литературных источников из 107 наименований, имеется 4 приложения.

Автор благодарен своему научному руководителю чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессору В.Н. Опарину за помощь в выборе темы работы и проведении исследований, за требовательность к качеству работы; выражает признательность к.т.н. Е.В. Денисовой и Б.Е. Беланову за помощь и внимание к работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Одной из наиболее важных проблем, решаемых прикладной геомеханикой, является прогнозирование и оценка устойчивости подземных сооружений, а также обоснование выбора геотехнологических схем с позиции безопасности ведения горных работ. Большой вклад в решение этой проблемы внесли работы многих ученых (Баклашов И.В., Барях А.А., Картозия Б.А., Курленя М.В., Опарин В.Н., Певзнер М.Е., Попов В.Н., Шемякин Е.И., Барышников В.Д., Гахова Л.Н., Влох Н.П., Зубков А.В., Грицко Г.И., Петухов И.М., Трубецкой К.Н., Лиман Е., Хаст Н. и др.). Кроме того, разработка полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях на больших глубинах требует применения методов крепления, обеспечивающих долгосрочную эксплуатацию подземных сооружений и безопасность производственных процессов. Применение железобетонных крепей позволяет достаточно эффективно решать обозначенную проблему. Однако, вопрос контроля состояния обделки капитальных горных выработок и массива вмещающих пород, оценки механического состояния и прогнозирования остаточного ресурса крепей не теряет своей актуальности. Решению данной проблемы посвя-

щены труды ряда исследователей: Рубана А.Д., Леонтьева А.В., Омеляненко А.В., Яковицкой Г.Е., Кулакова Г.И., Шкуратника В.Л., Захарова В.Н., Вознесенского А.С., Баукова Ю.Н., Ямщикова В.С., Смирнова Н.А., Владова М.Л., Гринева А.Ю., Старовойтова А.В. и др. При этом, проблеме выбора места заложения измерительных скважин геомеханического контроля НДС породного массива, исключающего попадание ствола скважины в зоны локализации механических неоднородностей, уделялось недостаточное внимание.

Кроме того, бурение скважин является одним из основных технологических процессов горного производства, поскольку применяется и непосредственно в горно-добычных работах, и при геомеханическом контроле состояния сплошных неметаллических крепей и массивов вмещающих пород. В настоящее время широкое применение получил ударно-вращательный метод бурения. Изучением процесса взаимодействия породоразрушающих машин с массивом горных пород занимались многие ученые: А.Д. Костылев, Б.Н. Смоляницкий, В.В. Климашко, К.С. Гурков, А.С. Изотов, Е.П. Русин, В.Д. Плавских, Н.П. Чепурной, К.К. Тупицин, В.В. Червов, Б.Б. Данилов и др. На основе данных исследований сформирован научный задел в изучении процессов, происходящих при взаимодействии буровой машины ударного действия с породным массивом. Однако выполненный комплекс исследований свидетельствует о необходимости разработки более совершенных систем определения пространственных координат рабочих органов буровых машин ударного действия с опорой на реальные устойчивые связи между параметрами распространения упругих волн в геосредах и физико-механическими свойствами породных массивов.

В этой связи диссертантом разработан комплексный геофизический метод для выбора места заложения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения (далее – Комплексный метод), позволяющий обоснованно выбирать место проходки измерительных скважин при контроле напряженно-деформированного состояния сплошных бетонных и железобетонных крепей и породных массивов, а также регистрировать начало процесса искривления ствола сооружаемой скважины, определяя пространственные координаты рабочего органа буровой машины ударного действия в режиме реального времени. Предлагаемый Комплексный метод состоит из двух этапов: первый основан на применении метода сверхвысокочастотной георадиолокации для выявления местоположения естественных и искусственных механических неоднородностей в железобетонной крепи горной выработки по ее электрофизическим свойствам, а второй – на методе определения пространственных координат источника акустического импульсного сигнала, индуцируемого в процессе взаимодействия рабочего органа буровой машины ударного действия с породным массивом. В данном случае используется время задержки поступления этого сигнала в приёмники многоканальной акустической измерительной системы относительно времени прихода сигнала непосредственно с буровой машины.

В рамках решения первой задачи выполнены теоретические расчеты мощности электромагнитного сигнала, отраженного от металлической арматуры, на входе приемника георадиолокационной системы по известному соотношению:

$$P_{\text{приемн}} = \frac{P_{\text{изл}} \cdot G_{\text{пер}}}{L_1} \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{r_1^2 \cdot L_2} \cdot S_{\text{цил}} \cdot \frac{1}{4\pi r_2^2 L_3} \cdot \frac{G_{\text{приемн}} \lambda_c^2}{4\pi L_4}, \quad (1)$$

где коэффициенты усиления приемной $G_{\text{приемн}}$ и передающей $G_{\text{пер}}$ антенн, потери мощности сигнала в антеннах L_1 и апертуре L_2 приняты равными единице (в данном случае параметры приёмно-передающей аппаратуры не оказывают влияния на результаты расчетов); L_3 и L_4 – коэффициенты, учитывающие потери в среде распространения между передающей антенной и «целью», а также между «целью» и приёмной антенной: $L_3 = e^{2\beta \cdot r_1}$, $L_4 = e^{2\beta \cdot r_2}$, ($\beta=0,64$ – коэффициент поглощения для бетона); λ_c – длина электромагнитной волны в среде распространения; r_1 – расстояние между передающей антенной и металлической арматурой; r_2 – расстояние между приемной антенной и металлической арматурой; мощность передатчика $P_{\text{изл}}$ полагалась равной 1 Вт; эффективная площадь рассеяния отражающего объекта принималась равной половине площади поверхности бесконечно длинного металлического цилиндра ($S_{\text{цил}}$), что соответствует стержням металлической арматуры.

Из выполненных расчетов следует, что при технически достижимой относительной чувствительности приемника по мощности 120-140 дБ (10^{-12} - 10^{-14} Вт) или по напряжению в единицы мкВ теоретически возможно определять местоположение металлической арматуры (диаметром от 10 до 25 мм) в железобетонной обделке горной выработки на глубине до 2,7 м при частоте передатчика до 3 ГГц.

В реальных условиях подземных горных выработок дальность обнаружения металлической арматуры в выбранном диапазоне частот может существенно отличаться от теоретически рассчитанной, поскольку определяется реальной диэлектрической проницаемостью бетона, используемого в крепях, степенью его неоднородности, а также параметрами применяемого приемо-передающего оборудования. В связи с этим, методом физического моделирования выполнены исследования влияния влажности и нарушенности (дисперсного состава) прослая – заполнителя в зоне механического контакта «железобетонная крепь – массив вмещающих пород» на дальность действия георадиолокационного метода.

В качестве технического средства, реализующего георадиолокационный метод, использовался георадар SIR-3000, производитель Geophysical Survey Systems Inc., США.

В большинстве георадаров применяются дипольные или щелевые антенны, излучатель и приемник которых объединены в один приемо-передающий блок и разнесены на фиксированное расстояние (на постоянной базе). В процессе работы георадара антенный блок перемещается по поверхности обследуемого участка крепи или породного массива.

При обнаружении протяженных неоднородностей, линейные размеры которых много больше длины волны зондирующего сигнала (металлическая арматура, проложенные подземные коммуникации и т.п.), важно учитывать ориентацию излучателя и приемника антенного блока относительно объекта поиска, поскольку от этого зависит информативность и дальность действия применяемого метода. Наибольший уровень полезного сигнала, отраженного от протяженной неоднород-

ности, обеспечивается в том случае, когда излучатель и приемник антенного блока, а следовательно, и вектор электрической компоненты зондирующего сигнала параллельны объекту поиска. Для удобства интерпретации экспериментальных данных будем считать, что антенный блок ориентирован «продольно» («продольная» ориентация), когда излучатель и приемник ориентированы перпендикулярно направлению перемещения. В случае, когда излучатель и приемник расположены параллельно направлению перемещения антенного блока, будем считать, что антенный блок ориентирован «поперечно» («поперечная» ориентация). На рисунке 1 представлены пояснения к определению ориентации антенны.

В рамках решения первой задачи для определения дальности действия метода георадиолокации при обследовании зоны механического контакта «железобетонная крепь – массив вмещающих пород» выполнено физическое моделирование процесса георадиолокационного обследования модели участка железобетонной крепи. На рисунке 2 представлены схема (а) проведения физического моделирования и фотография (б) стенда с используемым оборудованием.

На основании из пенопласта 1 размещены два бетонных блока 2, 3 габаритными размерами $600 \times 250 \times 100$ мм, моделирующие механический контакт железобетонной крепи и массива вмещающих пород. Блоки разделены прослоем 5 с изменяемыми механическими свойствами. Он моделирует зону нарушения породного массива и железобетонной крепи. Влажность и размеры фракций прослоя 5 варьируются путем помещения в него различного по составу заполнителя – сухого и влажного песка, щебня с фракциями 0-5 мм, 40-70 мм. Мощность прослоя 5 изменяется в пределах от 10 мм до 50 мм.

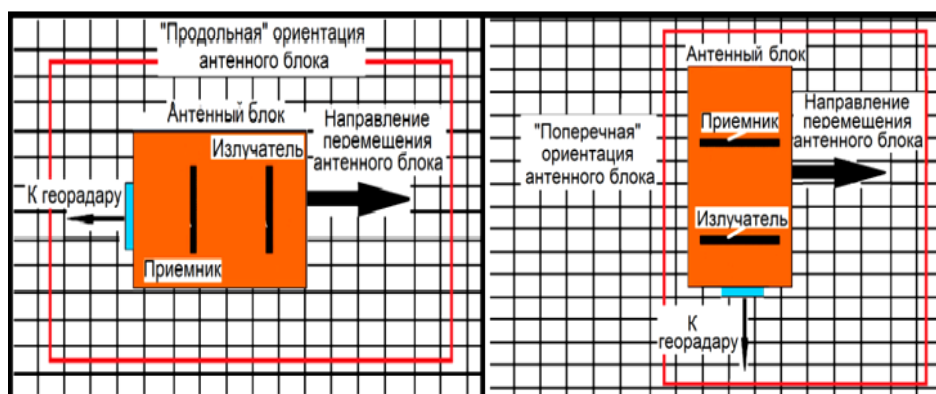


Рисунок 1 – Пояснения к определению ориентации антенного блока относительно направления перемещения при георадарном обследовании участка породного массива

Антенный блок георадара 4 перемещался параллельно бетонному блоку 3 вдоль оси x , измерительные метки проставлялись при пересечении центра антенного блока с каждой линией сетки 6. Затем зарегистрированные радарограммы были обработаны с помощью программного обеспечения RADAN.

Для удобства интерпретации результатов и получения более наглядных радарограмм в бетонный блок 2 на расстоянии 40 мм от зоны контакта с прослоем 5 был заглублен металлический стержень диаметром 10 мм и длиной 100 мм, который использовался в качестве индикатора.

На основании выполненных модельных экспериментов сделан вывод о том, что при обследовании состояния механического контакта двух бетонных блоков при неизменной частоте (2600 МГц) зондирующего электромагнитного сигнала

максимальная дальность действия георадиолокационного метода обеспечивается, когда линейные размеры фракций в зоне контакта «крепь – массив» много меньше длины волны зондирующего сигнала, а диэлектрическая проницаемость вмещающих слоев эквивалентна ($\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,75 \div 1,25$). При возрастании линейных размеров фракций L до величины, равной длине волны λ в геосреде ($\lambda/L=0,5 \div 1$), на радарограммах фиксируются многочисленные переотражения зондирующего сигнала от граней фракций, что существенно снижает мощность принимаемого полезного сигнала. Дальность действия георадиолокационного метода при этом снижается на 19%.

При увеличении контраста (отношения $\varepsilon_1/\varepsilon_2$) диэлектрических проницаемостей слоев от 1 до 4 дальность действия георадиолокационного метода снижается на 30%, а погрешность определения глубины расположения дальнего бетонного блока возрастает на 11%. Это связано с тем, что при обработке данных измерений программное обеспечение RADAN не позволяет учитывать вариацию диэлектрической проницаемости вмещающих слоев.

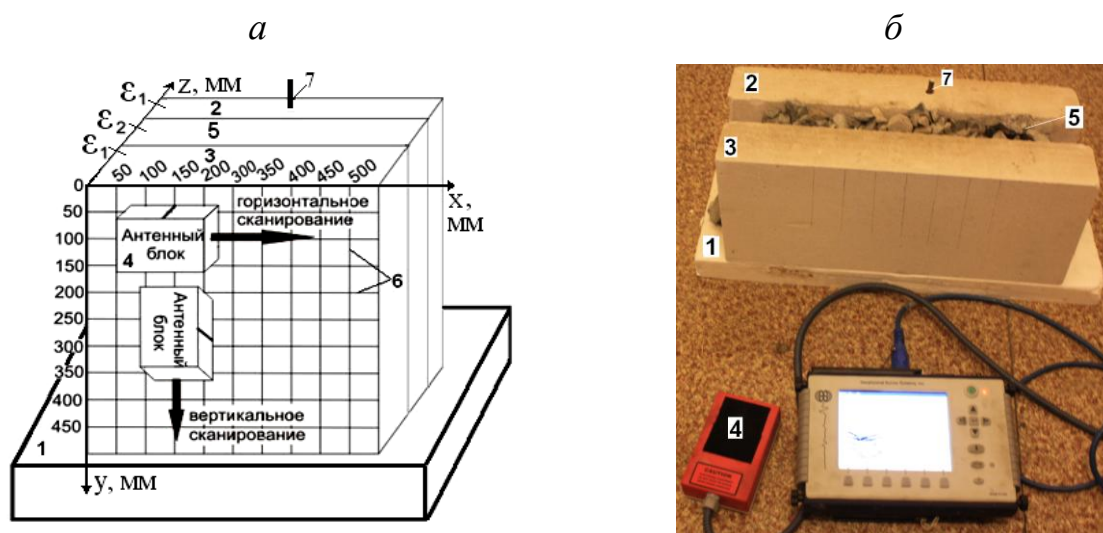


Рисунок 2 – Схема проведения модельного эксперимента: схема стенда для эксперимента (а) и фотография стенда и оборудования (б); 1 – подставка из пенопласта; 2, 3 – бетонные блоки; 4 – антенный блок георадара SIR-3000 с центральной частотой 2600 МГц; 5 – слой переменной мощности и с различными физико-механическими свойствами заполнителя; 6 – контрольные линии сетки для проставления измерительных меток; 7 – металлический стержень

На информативность георадиолокационного метода существенно влияет ориентация излучателя и приемника приемо-передающей антенны относительно расположения протяженной неоднородности. Так, при «продольной» ориентации антенного блока обеспечивается наибольшая дальность действия георадиолокационного метода. Например, при «продольной» ориентации и заполнении зоны контакта «крепь – массив» сухим песком дальность действия составляет 220 мм, а при «поперечной» – 205 мм.

На основе выполненных исследований сформулировано **первое научное положение**.

В рамках решения второй задачи, на основе результатов представленных выше исследований, предложена методика георадиолокационного обследования

участка железобетонной крепи подземной горной выработки для определения местоположения искусственных (стержни металлической арматуры, проложенные коммуникации) и естественных (пустоты, зоны разуплотнения) механических неоднородностей, а также нарушениями закрепного пространства в зоне контакта «крепь – массив». Она включает в себя реализацию следующих этапов:

(1) подготовка поверхности участка крепи к георадиолокационному исследованию: нанесение координатной сетки;

(2) определение реального значения диэлектрической проницаемости бетона обделки путем сопоставления радарограмм с обнаруженными неоднородностями с результатами контрольного бурения скважины в месте их расположения;

(3) горизонтальное и вертикальное георадарное сканирование участка крепи (см. рисунок 2) с применением линейки низкочастотных антенных блоков (центральная частота менее 1 ГГц) для обнаружения участков крепи, имеющих неплотный контакт с массивом вмещающих пород, определения нарушениями приконтурного массива и выявления механических неоднородностей в его глубинных областях и в крепи, а также для оценки толщины крепи (при различной ориентации антенного блока относительно обследуемой поверхности);

(4) горизонтальное и вертикальное георадарное сканирование участка крепи (см. рисунок 2) с применением высокочастотного антенного блока (центральная частота не менее 1 ГГц) для исследования его приповерхностного слоя (до 500 мм) на наличие в нем механических неоднородностей и границ раздела сред (при различной ориентации антенны относительно обследуемой поверхности);

(5) обработка радарограмм в программном обеспечении применяемого георадара и составление карт локализации неоднородностей вдоль обследуемых выработок.

Натурная апробация предложенной методики выполнена на одном из горных предприятий Красноярского края. Целью проведенных экспериментов являлось обследование железобетонной крепи горной выработки для определения местоположения естественных (пустоты и зоны разуплотнения бетона крепи) и искусственных (металлическая арматура) неоднородностей, с оценкой их формы и размеров.

Полученные на горном предприятии Красноярского края результаты легли в основу разработки рекомендаций по выбору мест, наиболее подходящих для бурения скважин геомеханического контроля НДС железобетонной крепи подземных горных выработок и массива вмещающих пород.

Сооружения располагаются на глубине 250-300 м и представляют собой камеры с арочным сводом с монолитной железобетонной крепью (далее по тексту – крепь, обделка) по всему контуру. Вмещающие породы представлены, в основном, гнейсами.

Всего было обследовано 3 камеры. Проектная мощность крепи составляет 0,5-2,5 м. Обследования обделки выполнялись с помощью георадара SIR-3000 (антенные блоки с центральными частотами 2600 МГц, 900 МГц и 270 МГц). Радарограммы обработаны с помощью программного обеспечения RADAN с учетом экспериментально определенной диэлектрической проницаемости бетона ($\varepsilon = 6,25$).

Сначала участок крепи, на котором планировались экспериментальные исследования, был обследован с помощью антенного блока с центральной частотой 270 МГц. После детального анализа радарограмм из рассмотрения были исключены зоны, имеющие неплотный механический контакт между крепью и вмещающим массивом. Затем было выполнено георадарное сканирование с использованием антенных блоков с центральными частотами 2600 МГц и 900 МГц.

На рисунке 3, в качестве примера, приведена радарограмма, полученная при георадарном обследовании участка обделки третьей выработки антенным блоком с центральной частотой 2600 МГц («продольная» ориентация). Цифрами 1-4 отмечены оси синфазности, соответствующие сигналам, отраженным от неоднородностей обделки.

При использовании антенного блока с центральной частотой 2600 МГц оказалось возможным однозначно идентифицировать сигналы, отраженные от механических неоднородностей железобетонной обделки до глубины 400 мм.

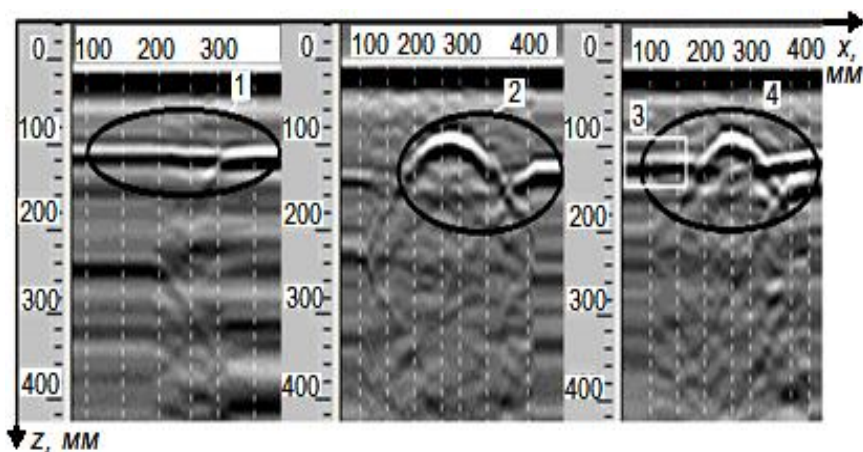


Рисунок 3 – Третья выработка, горизонтальное сканирование антенным блоком с центральной частотой 2600 МГц, «продольная» ориентация: 1, 3 – стержень горизонтальной арматуры на глубине 100 мм; 2, 4 – стержень вертикальной арматуры на глубине 80 мм

Радарограммы, полученные при георадарном обследовании того же участка обделки третьей выработки антенным блоком с центральной частотой 900 МГц («продольная» ориентация), представлены на рисунке 4.

Здесь оси синфазности, отмеченные цифрой 1 на рисунке 4 а, 4 б, соответствуют отраженным от металлической арматуры электромагнитным сигналам (вертикальные и горизонтальные стержни). Указанная арматура локализована на глубинах 450 и 500 мм. Это доказано также контрольным бурением скважины, которая отмечена цифрой 7 на рисунке 4 в. При использовании антенного блока с центральной частотой 900 МГц возможно регистрировать оси синфазности, соответствующие отраженным зондирующим сигналам до глубины 1000 мм. При обработке радарограмм сигналы, соответствующие большей глубине зондирования, существенно искажены шумами.

На основании анализа радарограмм, полученных при георадарном сканировании участка обделки в третьей выработке при «продольной» и «поперечной» ориентации антенных блоков (центральные частоты 2600 МГц и 900 МГц) построена соответствующая карта мест локализации выявленных механических неоднородностей (рисунок 4 в).

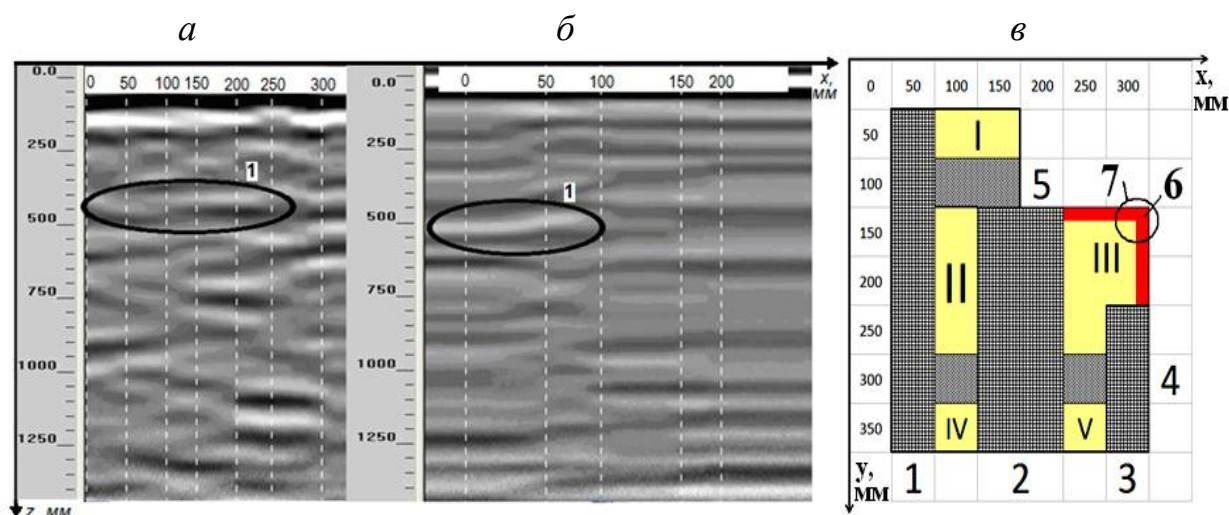


Рисунок 4 – Радарограммы при вертикальном (а) и горизонтальном (б) георадарном сканировании и карта расположения арматуры (в) в третьей выработке, полученные с помощью антенного блока с центральной частотой 900 МГц; «продольная» ориентация: 1-6 – металлическая арматура; 7 – контрольная скважина; зоны I-V квалифицируются как пригодные для проходки измерительных скважин

Применение предложенной методики для обследования участка грунтового массива с поверхности земли перед проходкой горизонтальной скважины для прокладки подземных коммуникаций бестраншейным способом позволяет исключить искривление ствола сооружаемой скважины, вызванное столкновением рабочего органа буровой машины с препятствиями искусственного (проложенными коммуникациями) или естественного происхождения (твердыми породными включениями). По результатам исследования грунтового массива георадиолокационным методом на полигоне ИГД СО РАН «Зеленая горка» выбран подходящий для проходки горизонтальной скважины пневмоударной машиной «Тайфун-2» участок грунта, в пределах которого отсутствуют механические неоднородности и ранее проложенные подземные коммуникации.

Таким образом, применение первого этапа Комплексного метода – метода георадиолокации для выбора места заложения скважин геомеханических измерений – позволяет обоснованно выбирать места бурения скважин.

На основе представленных результатов сформулировано **второе научное положение**.

Поскольку георадиолокационное обследование не позволяет отслеживать возможные отклонения ствола скважины в процессе ее проходки, а его искривление негативно влияет на эффективность буровых работ (повышаются издержки, связанные с увеличением времени проходки скважины; возникают отклонения от проектных решений; в некоторых случаях требуется повторное бурение), то для выявления мест возможного искривления ствола скважины разработан второй этап Комплексного метода. Он реализован на примере проходки горизонтальных скважин в грунтовых массивах пневмоударными машинами.

Для решения этой задачи разработан алгоритм вычисления пространственных координат источника акустического импульсного сигнала – движущегося в породном массиве рабочего органа буровой машины ударного действия – по вре-

менам задержки поступления сигнала в приемные каналы многоканальной акустической измерительной системы относительно опорного акустического сигнала непосредственно с рабочего органа. На основе разработанного алгоритма создано техническое средство – многоканальная акустическая измерительная система (далее МАИС), структурная схема которой представлена на рисунке 5.

Акустоэлектрические преобразователи $2_1 \dots 2_4$ устанавливают на поверхности земли в вершинах «воображаемого» прямоугольника $ABCD$ (рисунок 5 а). Акустоэлектрический преобразователь 2_5 устанавливают на рабочем органе 1 буровой машины в точке O .

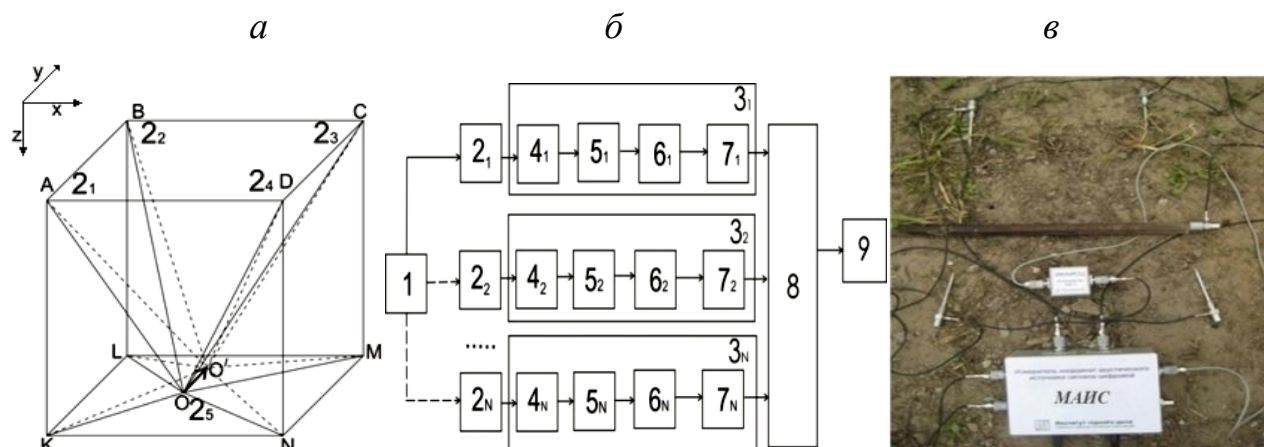


Рисунок 5 – Схема взаимодействия источника удара с акустоэлектрическими преобразователями (а), структурная схема МАИС (б), фотография макетного образца МАИС (в); 1 – акустический излучатель (пневмоударная машина), $2_1 \dots 2_N$ – акустоэлектрические преобразователи, $3_1 \dots 3_N$ – блоки обработки импульсного акустического сигнала, $4_1 \dots 4_N$ – усилители, $5_1 \dots 5_N$ – фильтры нижних частот, $6_1 \dots 6_N$ – аналого-цифровые преобразователи, $7_1 \dots 7_N$ – цифровые фильтры, 8 – блок вычисления пространственных координат, 9 – устройство отображения информации

Перед началом работы производится калибровка системы – определяют скорость V распространения упругих волн в грунте. Зная исходные координаты пневмоударной машины, по временам t_A, t_B, t_C, t_D задержки прихода импульса в точки A, B, C, D для каждого из блоков обработки импульсного акустического сигнала $3_2 \dots 3_5$ в блоке вычисления пространственных координат машины 8 вычисляют скорости V_A, V_B, V_C, V_D распространения упругих волн в грунтовой массе, что позволяет учесть возможную неоднородность его свойств. Далее вычисляют три координаты излучателя 1. Вычисление координат происходит в блоке 8.

Исходные данные для вычисления координат излучателя 1: $a = AB = CD$; $b = AD = BC$; $h = AK$ – глубина запуска; l – длина машины. Начало координат принято в точке A .

При заглублении пневмоударной машины в грунтовой массив на всю длину l координаты точки O , где формируется импульсный акустический сигнал, относительно начала координат на рисунке 5 будут равны $x = \frac{b}{2}, z = h, y = l$.

Зная эти координаты, находят значения скоростей V_A, V_B, V_C, V_D распространения импульсного акустического сигнала до каждого акустоэлектрического преобразователя $2_1 \dots 2_4$ из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} (OA)^2 = x^2 + y^2 + z^2 \\ (OB)^2 = x^2 + (a - y)^2 + z^2 \\ (OC)^2 = (b - x)^2 + (a - y)^2 + z^2 \\ (OD)^2 = (b - x)^2 + y^2 + z^2 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_A = OA/t_A \\ V_B = OB/t_B \\ V_C = OC/t_C \\ V_D = OD/t_D \end{array} \right. \quad (2)$$

После ударного воздействия рабочего органа пневмоударной машины на грунтовый массив, происходит перемещение точки O , где формируется импульсный акустический сигнал, в точку удара O' . По известным скоростям V_A, V_B, V_C, V_D распространения упругих волн в грунте и временам t_A, t_B, t_C, t_D задержки их распространения в нем вычисляют расстояния от точки удара O' до акустоэлектрических преобразователей $2_1...2_4$:

$$\left\{ \begin{array}{l} O'A = V_A \times t_A \\ O'B = V_B \times t_B \\ O'C = V_C \times t_C \\ O'D = V_D \times t_D \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (O'A)^2 = x^2 + y^2 + z^2 \\ (O'B)^2 = x^2 + (a - y)^2 + z^2 \\ (O'C)^2 = (b - x)^2 + (a - y)^2 + z^2 \\ (O'D)^2 = (b - x)^2 + y^2 + z^2 \end{array} \right. \quad (3)$$

(3)

(4)

(5)

(6)

Из системы уравнений (3)-(6) вычисляют координаты источника акустического сигнала. Таким образом, зная координаты рабочего органа пневмоударной машины в любой момент времени, можно контролировать процесс проходки скважины геомеханического контроля и исключить искривление ее ствола.

Натурные исследования применимости рассматриваемого акустического метода и разработанного алгоритма вычисления пространственных координат для определения возможных мест искривления стволов горизонтальных скважин, сооружаемых буровыми машинами ударного действия, выполнены на примере движения пневмоударной машины в грунтовом массиве. Отклонение машины от требуемой траектории движения влево и вправо по оси x имитировалось перемещением приемников средства измерения относительно требуемой траектории вправо и влево соответственно. Исследования проводились на полигоне ИГД СО РАН «Зеленая горка». Вблизи места проведения натуральных экспериментов отсутствуют высоковольтные сети, а так же другие подземные коммуникации. Во входной приямок на глубине 500 мм помещалась пневмоударная машина «Тайфун-2» (габаритные размеры: длина 550 мм, диаметр 40 мм; энергия удара 22 Дж).

Геосреда, в которой проводились экспериментальные исследования, представляет собой суглинок с влажностью 22% и плотностью $1,74 \text{ г/см}^3$. Верхний слой геосреды (около 200 мм от поверхности земли) содержит твердые породные включения диаметрами до 40 мм; на глубине от 200 до 700 мм геосреда однородна и не содержит видимых слоистых структур.

Обобщенная схема экспериментальных исследований представлена на рисунке 6.

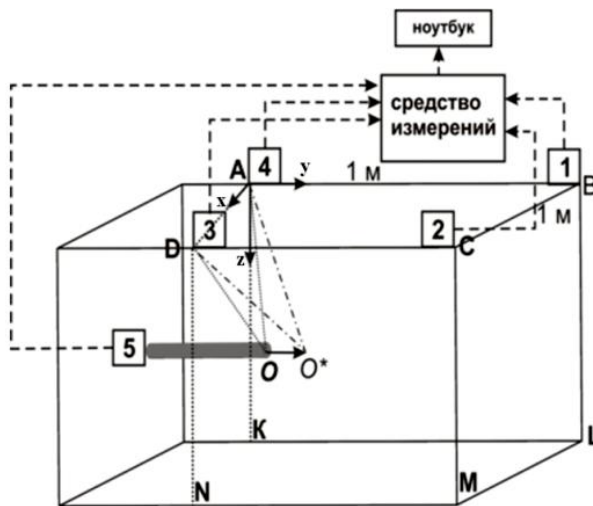


Рисунок 6 – Схема проведения натурного эксперимента по вычислению времен задержки поступления акустического сигнала, создаваемого движением буровой машины в породном массиве, в приемные каналы средства измерения: 1-5 – акселерометры KD29

С помощью многоканального измерительного комплекса PULSE, использовавшегося в качестве средства измерения проведена регистрация времен поступления акустических сигналов в приемники относительно «опорного» сигнала, поступающего непосредственно с пневмоударной машины. Приемники располагались на поверхности земли таким образом, что координата $y = 0$.

По разработанному алгоритму вычислены пространственные координаты пневмоударной машины. Установлено, что наименьшая погрешность вычислений достигается для координат y и z при величине отклонения машины от заданной траектории движения не более, чем на 100 мм. В этом случае она составляет десятки миллиметров (20-50 мм) или 4-6%. Для координаты x погрешность измерений составляет 15-20% при отклонении машины на 100 мм от заданной траектории движения, что может быть связано с влиянием заранее не учитываемых неоднородностей, присутствующих в грунте.

Для оценки зависимости относительной погрешности определения пространственных координат пневмоударной машины от расстояния между источником ударного воздействия (машиной) и каждым приемником акустических сигналов были выполнены натурные испытания разработанной многоканальной акустической измерительной системы при расположении приемников в точках с координатой $y = 250$ мм, при этом $z = 650$ мм. Результаты расчетов пространственных координат пневмоударной машины представлены в таблице 1 (в столбцах под номером 1 приведены результаты определения координат машины с помощью разработанной МАИС, а под номером 2 – с помощью многоканального измерительного комплекса PULSE).

Определение пространственных координат пневмоударной машины в грунтовом массиве при $y = 250$ мм, (когда разница между расстояниями от приемников 1-4 до места прикладывания ударной нагрузки незначительна) показало, что относительная погрешность определения координат z и x уменьшилась примерно в 2 раза по сравнению с результатами, полученными при координате $y = 0$.

Данное утверждение справедливо при контроле отклонения пневмоударной машины влево от оси ее движения. Относительная погрешность определения координат машины при моделировании ее отклонения вправо от требуемой траектории резко снижается. Это можно объяснить наличием слева от места сооруже-

ния скважины фундамента и бетонной отмостки здания (на расстоянии 2 м), которые привели к возникновению явления отражения акустической волны на границе раздела сред "грунт-бетон".

ТАБЛИЦА 1 – Расчетные и реальные значения пространственных координат пневмоударной машины ($y = 250$ мм)

Величина и направление отклонения машины, м	Реальные значения координат			Расчетные значения координат пневмоударной машины					
	$x, м$	$y, м$	$z, м$	1	2	1	2	1	2
				$x, м$	$x, м$	$y, м$	$y, м$	$z, м$	$z, м$
0,05 влево	0,45	0,25	0,65	0,487	0,504	0,214	0,231	0,593	0,61
0,1 влево	0,4	0,25	0,65	0,368	0,443	0,229	0,248	0,627	0,66
0,15 влево	0,35	0,25	0,65	0,314	0,364	0,199	0,267	0,625	0,67
0,05 вправо	0,55	0,25	0,65	0,536	0,479	0,069	0,183	0,46	0,475
0,1 вправо	0,6	0,25	0,65	0,609	0,734	0,17	0,165	0,525	0,602
0,15 вправо	0,65	0,25	0,65	0,653	0,782	0,234	0,262	0,528	0,569

Расчетные значения пространственных координат пневмоударной машины на основе экспериментальных измерений параметров создаваемых ею в грунтовой массе акустических сигналов с помощью многоканального измерительного комплекса PULSE (см. данные в столбце 2 таблицы 1) и разработанной многоканальной акустической измерительной системой (см. данные в столбце 1 таблицы 1) удовлетворительно сошлись.

Анализ рассчитанных по (3)-(6) координат пневмоударной машины по вычисленным временам задержки акустического сигнала в грунтовой массе показал работоспособность МАИС при решении задачи определения пространственных координат пневмоударной машины в грунтовой массе (погрешность системы при определении координаты x составила от 4% до 22,33%, а координаты z – от 1,54% до 26,92%). При этом погрешность измерений координат машины возрастает с увеличением отклонения машины от заданной траектории движения, что позволяет на практике регистрировать начало процесса искривления ствола скважины с достаточно низкой погрешностью (до 5%).

На относительную погрешность определения пространственных координат по предложенному алгоритму влияет наличие в массиве неоднородностей, а также расстояние между акустическими приемниками и местом прикладывания ударной нагрузки. В случае, когда расстояния от источника акустического импульсного сигнала до каждого из приемников средства измерения примерно равны, обеспечивается наименьшая погрешность определения пространственных координат пневмоударной машины.

При работе пневмоударной машины в грунтовых массивах корректировать траекторию ее движения можно за счет использования управляемой асимметричной насадки в виде скошенного конуса. Определять направление поворота такой насадки можно с помощью устройства определения угла поворота рабочего органа, работающего на основе ртутных датчиков (рисунок 7).

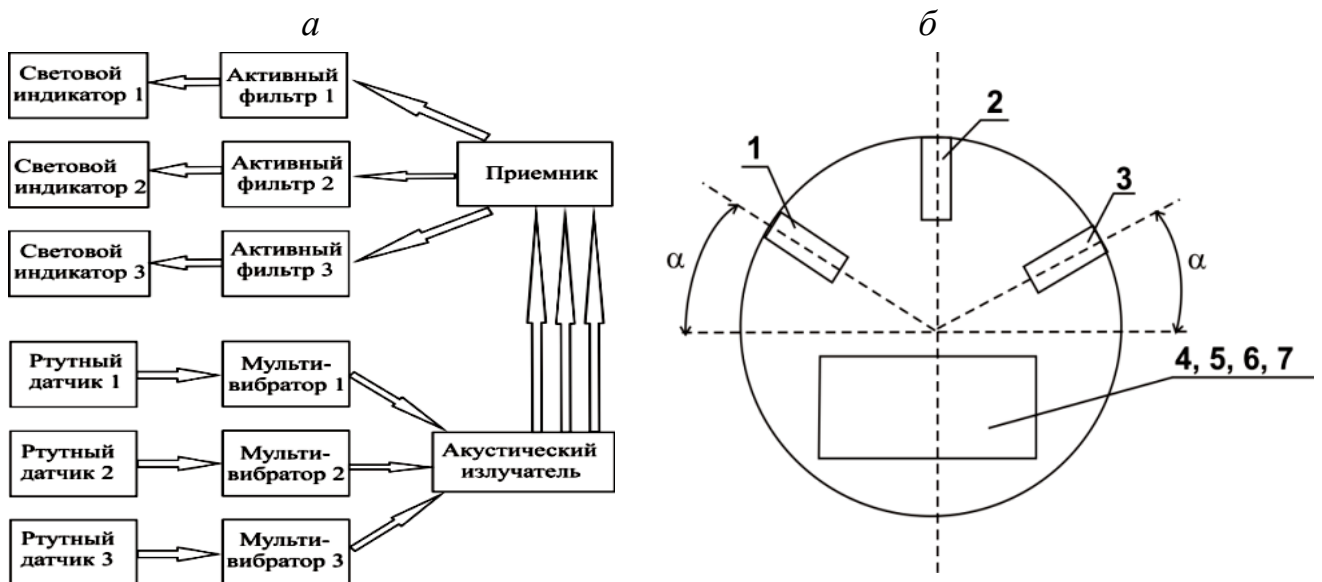


Рисунок 7 – Устройство определения угла поворота рабочего органа пневмоударной машины вокруг своей оси: (а) структурная схема; (б) схема расположения элементов: 1-3 – ртутные датчики; 4-6 – мультивибраторы; 7 – акустический излучатель; α – дифференциальный угол ртутного датчика

Устройство определения угла поворота рабочего органа состоит из трех ртутных датчиков 1-3, размещенных на кольце из стеклотекстолита, которое располагается в управляющей насадке рабочего органа способом, исключающим поворот устройства относительно оси рабочего органа (см. рисунок 7). Каждый ртутный датчик соединен с соответствующим мультивибратором 4-6 (см. рисунок 7). При повороте рабочего органа машины относительно оси ее движения на угол превышающий α , как минимум, один из ртутных датчиков переходит в замкнутое состояние и запускает тем самым мультивибратор, который соединен с электроакустическим излучателем 7, выполняющим функцию передающей антенны (информация на поверхность поступает по беспроводному каналу связи). На поверхности земли оператор приемником улавливает излучаемый акустический сигнал и по срабатыванию соответствующего индикатора определяет направление поворота рабочего органа.

Данное техническое средство может быть использовано в качестве дополнительного канала разработанной многоканальной акустической измерительной системы при работе в грунтовых массивах, что позволит получать информацию о механическом состоянии грунтового массива (например, о плотности) по направлению и углу поворота рабочего органа относительно оси движения.

Точность работы такого устройства зависит от дифференциального угла α ртутного датчика и может составлять от 1° (в зависимости от типа электронного компонента).

Представленные выше результаты легли в основу **третьего научного положения**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно-обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, обеспечивающие обоснованный выбор места заложения скважин геомеханических измерений и контроль процесса их бурения. Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Исследовано влияние толщины, влажности и размера фракций прослоя на контакте «железобетонная крепь – массив вмещающих пород» на дальность действия георадиолокационного метода; при этом установлено, что:

- при значительном (от 4 и более раз) отличии диэлектрической проницаемости бетона и прослоя дальность действия георадиолокационного метода уменьшается на 30%;

- в случае, когда линейные размеры фракций прослоя эквивалентны длине волны зондирующего сигнала дальность действия метода георадиолокации снижается на 19% за счет многочисленных переотражений электромагнитного зондирующего сигнала от граней частиц слоя.

2. Обосновано использование метода сверхвысокочастотной (до 3 ГГц) георадиолокации для выбора мест заложения скважин геомеханических измерений. При этом:

- разработана методика георадиолокационного обследования участка железобетонной крепи горной выработки для определения местоположения искусственных (стержни металлической арматуры, проложенные коммуникации) и естественных (пустоты, зоны разуплотнения) неоднородностей;

- выполнена апробация разработанной методики в натуральных условиях на одном из горных предприятий Красноярского края – обследована железобетонная обделка подземных горных выработок, рекомендованы места проходки измерительных скважин геомеханического контроля, а также на полигоне ИГД СО РАН «Зеленая горка» при проходке горизонтальной скважины в грунтовом массиве пневмоударной машиной.

3. Разработан алгоритм определения пространственных координат источника динамического воздействия на породный массив применительно к решению задачи контроля процесса проходки скважин буровыми машинами ударного действия для исключения искривления ствола скважины. При этом установлено, что на точность определения пространственных координат источника динамического воздействия на породный массив влияют степень его неоднородности, способ обработки экспериментальных данных, а также расстояние между рабочим органом и акустоэлектрическими преобразователями;

4. Разработана и испытана в натуральных условиях многоканальная акустическая измерительная система, позволяющая определять пространственные координаты породоразрушающего инструмента буровой машины ударного действия в однородном грунтовом массиве с погрешностью, не превышающей 12%;

5. Разработано и испытано в лабораторных условиях техническое средство, предназначенное для определения направления отклонения рабочего органа буровой машины ударного действия относительно оси его движения с использованием ртутных датчиков.

Таким образом, совместное применение сверхвысокочастотного георадиолокационного и акустического методов, а также разработанных методики обследования участка железобетонной крепи горной выработки георадиолокационным методом и алгоритма вычисления пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия образуют комплексный геофизический метод для выбора места заложения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Денисова, Е.В. Исследование влияния физико-механических свойств геосреды на точность геофизических методов при локации подземных объектов / Е.В. Денисова, **А.П. Хмелинин** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 10. – С. 107-109.

2. Денисова, Е.В. О возможности использования георадара SIR-3000 при бесшланговых технологиях прокладки подземных коммуникаций / Е.В. Денисова, **А.П. Хмелинин** // Вестник КузГТУ. – 2012. – № 6. – С. 23-26.

3. Денисова, Е.В. О возможности контроля процесса разрушения породного массива буровой машиной по временам задержки создаваемого ею акустического сигнала / Е.В. Денисова, И.В. Тищенко, **А.П. Хмелинин**, Я.З. Бадмаева // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 5. – С. 109-113.

4. Барышников, В.Д. Диагностика состояния бетонной обделки горных выработок на наличие в ней неоднородностей с помощью георадиолокационного метода / В.Д. Барышников, **А.П. Хмелинин**, Е.В. Денисова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 1. – С. 30-38.

5. Опарин, В.Н. Многоканальная акустическая система контроля процесса движения пневмоударной машины в грунтовом массиве и алгоритм обработки измерительной информации / В.Н. Опарин, Е.В. Денисова, **А.П. Хмелинин**, Я.З. Бадмаева, Н.С. Полотнянко // ФТПРПИ. – 2014. – № 3. – С. 187 – 197.

В прочих изданиях:

6. Денисова, Е.В. Подповерхностное зондирование многослойной среды георадаром SIR-3000 / Е.В. Денисова, **А.П. Хмелинин**, М.И. Городецкая, М.В. Безваритный // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». – НГТУ, Новосибирск, 2012. – С. 188-191.

7. Денисова, Е.В. Разработка радиочастотного дальномера с шумовой модуляцией / Е.В. Денисова, **А.П. Хмелинин** // Четвертые Уткинские чтения. Материалы международной научно-технической конференции. – СПб: БГТУ "Военмех", 2009. – Т. 1. – С. 113-115.

8. Денисова, Е.В. Устройство для определения положения инструмента для формирования горизонтальных скважин с передачей информации на поверхность земли по электромагнитному каналу связи / Е.В. Денисова, С.Ю. Гаврилов,

А.П. Хмелинин // Труды XIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 110-летию со дня рождения профессора, Лауреата Государственной премии СССР К.В. Радугина. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 631-633.

9. Хмелинин А.П. Формирование диаграммы направленности передающей антенны, расположенной на поверхности земли / Е.В. Денисова, С.Ю. Гаврилов, **А.П. Хмелинин** // Электронный сборник тезисов 5-ой Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле (29 ноября – 02 декабря 2010 года). – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2010.

10. Денисова, Е.В. Радиочастотная система контроля положения пневмоударной машины в грунте / Е.В. Денисова, **А.П. Хмелинин** // Труды международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах». – Пенза: ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 13-16.

11. Хмелинин А.П. Методика исследования железобетонных конструкций подземных сооружений на наличие в них неоднородностей различного типа. / А.П. Хмелинин // Электронный сборник 10-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». – Москва: ИПКОН РАН, 2013.

12. Патент РФ на изобретение №2410537. Устройство для определения положения инструмента для формирования наклонных и горизонтальных скважин (варианты) / Е.В. Денисова, С.Ю. Гаврилов, И.В. Тищенко, А.П. Хмелинин, С.С. Ершов // Заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН. – опуб. – 2011. – бюл. № 3.

13. Патент РФ на полезную модель №136589. Измеритель координат работающей пневмоударной машины / Е.В. Денисова, В.Н. Опарин, А.П. Хмелинин, А.И. Конурич // Заявитель и патентообладатель: ИГД СО РАН. – опуб. 2014. – бюл. № 21.

14. Денисова, Е.В. Особенности исследования многослойных геосред радиолокационным методом / Е.В. Денисова, **А.П. Хмелинин** // Науки о Земле. Современное состояние: Материалы II Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции. Новосибирск: РИНЦ НГУ, 2014. – 304 с.

Подписано к печати _____ 2014 г.

Формат 60×84 1/6. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Печ. л. _____. Тираж _____ экз. Заказ № _____.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»
650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Отпечатано в издательском центре УИП КузГТУ
650000, Кемерово, ул. Д.Бедного, 4а