

Конурин Антон Игоревич

**РАЗРАБОТКА АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА И ТЕХНИЧЕСКОГО
СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА ТРАЕКТОРИИ ПНЕВМОУДАРНОЙ
МАШИНЫ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД**

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,
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор,
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

Сирота Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Уральского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «25» декабря 2014 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета 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, email: restor@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.

Актуальность темы

В последние годы сфера практических приложений геофизических методов и круг связанных с ними научных задач существенно расширяется. К их числу относится и актуальная сегодня задача развития научных основ для построения нового вида мониторинговых систем и, соответственно, лежащих в их основе методов оперативного контроля физико-механических свойств и напряженно-деформированного состояния массивов горных пород на принципах обратной связи. Это – связь механических процессов разрушения горных пород с динамико-кинематическими характеристиками индуцируемых при этом деформационных и акустических полей. Так, возникает потребность в разработке новых мониторинговых систем, предоставляющих информацию о физико-механических свойствах массива и его неоднородностях в процессе механического взаимодействия породоразрушающих устройств с породным массивом: при ведении горных или строительных работ, в том числе в условиях плотной застройки территорий и высокой насыщенности подземного пространства различными коммуникациями, при сооружении бестраншейным методом скважин. Основными задачами для развития этого перспективного направления исследования является поиск и разработка комплексных методов, обеспечивающих одновременно оперативный контроль напряженно-деформированного состояния и физико-механических свойств подсекаемых при бурении породных толщ и координатную привязку бурового инструмента в процессе его работы.

По статистике, на каждые 10 км магистральных трубопроводов приходится в среднем один переход протяженностью до 100 м под дорогами. Средняя стоимость таких переходов, выполненных открытым способом, в 2 – 2,5 раза выше средней стоимости бестраншейных переходов. При этом известно, что уже на расстоянии 10-15 м от места запуска пневмоударной машины отклонения сооружаемых ею скважин от первоначального направления может достигать 0,2 м, нарастая с увеличением их длины.

В связи с этим актуальной является задача разработки физических методов и технических средств, позволяющих обеспечить мониторинг траектории сооружаемых пневмоударными машинами скважин. Известны ближайшие аналоги, применяемые в настоящее время в промышленности при горизонтальном направленном бурении, – это электромагнитные системы мониторинга проходки скважин (Magstir, Digitrack, Eclipse, SNS-100, SNS-200, SNS-300, F5, F2 и др.), которые обладают высокой точностью и информативностью. Принцип их работы основан на размещении излучающего зонда в рабочем органе машины, прием и обработка сигналов осуществляется на поверхности Земли. Существует опыт установки таких систем на пневмоударные машины, однако в этом случае проявляется ряд существенных недостатков, главными из которых является низкая надежность устройств из-за воздействия на зонд высоких ударных нагрузок и необходимость изменения конструкции машины. Кроме этого, такие системы в настоящее время не позволяют получать необходимую информацию о физико-механических свойствах неоднородного породного массива. Несмотря на то, что акустические системы геофизического мониторинга в настоящее время в отмеченном направлении на практике не реализованы, уже имеются технические решения, предложенные в

виде патентов (в основном зарубежных), и в этом направлении ведутся активные разработки.

Настоящие исследования выполнялись автором при проведении научных работ в период с 2008 по 2013 гг. при поддержке Министерства образования и науки в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг»: проект №14.132.21.1373 (автор – руководитель), проекты №П1117, №02.740.11.0819, №8775, №14.740.11.1044 (автор – исполнитель); проект РФФИ №12-05-09355-моб_з (автор – руководитель), а также Общественного совета просветительских организаций и Правительства Новосибирской области.

Объект исследований – пространственно-временное расположение скважин, проходимых пневмоударной машиной.

Предмет исследований – траектория движения пневмоударной машины.

Цель работы – разработка акустического метода и технического средства мониторинга траектории движения пневмоударной машины в массиве горных пород при сооружении горизонтальных скважин.

Идея работы – заключается в использовании амплитудно-частотных характеристик акустического сигнала, создаваемого работающей в массиве горных пород пневмоударной машиной, для мониторинга траектории ее движения, а также для получения дополнительной информации о физико-механических свойствах массива и его неоднородностях.

Задачи исследований:

1. Разработать амплитудный метод многоканального акустического мониторинга траектории движения пневмоударной машины в массиве горных пород при сооружении горизонтальных скважин.

2. Оценить влияние физико-механических свойств (модуля упругости и плотности) породного массива на разрешающую способность амплитудного метода многоканального акустического мониторинга траектории движения пневмоударной машины.

3. Определить влияние проложенных коммуникаций в виде протяженных трубопроводов над скважиной на особенности реализации амплитудного метода многоканального акустического мониторинга траектории движения пневмоударной машины.

4. Разработать и испытать в натурных условиях техническое средство мониторинга траектории движения пневмоударной машины в массиве горных пород.

Методы исследования включают: анализ источников научно-технической информации по тематике работы; теоретические исследования параметров акустического поля, индуцированного движением пневмоударной машины в грунтовом массиве (аналитические расчеты и численное моделирование с применением метода конечных элементов – МКЭ); экспериментальные исследования этих параметров; разработку и испытания в натурных условиях технического средства, реализующего предложенный метод.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. Метод мониторинга траектории движения пневмоударной машины по критерию максимума амплитуды индуцируемого акустического сигнала при проходке скважин в горизонтальной плоскости в массиве горных пород с коэффициентом затухания акустических волн 3 м^{-1} на глубинах от 0,5 до 5 м позволяет определять ее координаты с погрешностью не более 100-270 мм.

2. Разрешающая способность амплитудного метода многоканального акустического мониторинга траектории движения пневмоударной машины в массиве горных пород по углу отклонения от проектной траектории движения снижается с ростом его модуля упругости Юнга и увеличивается с возрастанием плотности.

3. При проходке скважин пневмоударной машиной под проложенным трубопроводом на дневной поверхности над забоем скважины формируется локальный минимум амплитуды акустического сигнала, значения которого понижаются при увеличении диаметра трубопровода и при сближении скважины с трубопроводом; увеличивается частота основного спектрального максимума частотного спектра в 1,2-2,6 раза и снижаются амплитуды спектральных составляющих во всем диапазоне частот.

4. Разработанное техническое средство позволяет повысить точность определения местоположения пневмоударной машины в массиве горных пород в 2 раза за счет применения операции умножения регистрируемых сигналов.

Достоверность научных результатов, выводов, рекомендаций достигается применением современной измерительной аппаратуры с высокими метрологическими характеристиками и лицензионного программного обеспечения, достаточным объемом исследований и сходимостью результатов проведенных аналитических расчетов, численного моделирования и натурных измерений исследуемых параметров акустического сигнала, индуцированного движением пневмоударной машины в грунтовом массиве.

Новизна научных положений:

- теоретически обоснован и впервые применен для геофизического мониторинга траектории движения пневмоударной машины в массиве горных пород при проходке горизонтальных скважин метод, основанный на анализе кинематических и амплитудно-частотных характеристик излучаемых при этом акустических сигналов;

- получена оценка влияния модуля упругости Юнга и плотности массива горных пород на разрешающую способность амплитудного метода многоканального акустического мониторинга траектории движения пневмоударных машин при проходке горизонтальных скважин;

- теоретически обосновано и экспериментально подтверждено изменение кинематических и амплитудно-частотных характеристик акустических сигналов, излучаемых в процессе взаимодействия пневмоударной машины с массивом горных пород, в зависимости от наличия в нем проложенных коммуникаций (в виде трубопроводов);

- разработано и испытано техническое средство для акустического мониторинга траектории пневмоударной машины в массиве горных пород при проходке горизонтальных скважин, позволяющее существенно (в 2 раза) повысить точность

определения местоположения машины за счет применения операции умножения регистрируемых сигналов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании амплитудного метода многоканального акустического мониторинга траектории движения пневмоударных машин в массиве горных пород; разработке на базе программного комплекса «ANSYS» блока решения динамических задач, позволяющего с высокой точностью оценивать параметры колебаний массива при проходке скважин пневмоударными машинами.

Практическая ценность исследования состоит в разработке и реализации технического средства мониторинга траектории движения пневмоударных машин в массиве горных пород при сооружении горизонтальных скважин – двухканального обнаружителя местоположения пневмоударной машины (ДОМПМ).

Личный вклад автора состоит: в обобщении известных научно-технических результатов, проведении аналитических расчетов и численного моделирования процесса взаимодействия пневмоударной машины с грунтовым массивом; проведении натурных экспериментов, обработке и анализе данных измерений, установлении закономерностей распределения кинематических и амплитудно-частотных характеристик акустического поля, индуцированного движением пневмоударной машины в грунтовом массиве; разработке технического средства для акустического мониторинга траектории движения пневмоударной машины.

Реализация работы в промышленности

Разработанные методика мониторинга траектории скважины и техническое средство (ДОМПМ) применяются при подводе подземных коммуникаций к жилым объектам бестраншейным способом (ООО «Регион Строй – Монтаж», г. Новосибирск).

Апробация работы

Основные положения диссертации и ее отдельные результаты были представлены на V Международном научном конгрессе ГЕО-СИБИРЬ (Новосибирск, СГГА, 2009), XIII и XV Международном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых (Томск, ТПУ, 2009, 2011), Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (ИГД СО РАН, Новосибирск, 2009, 2011, 2013), 5-ой Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2010), научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2012, 2013, 2014), Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (Новосибирск, НГТУ, 2012), 2-ой Российско-Китайской научной конференции «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах» (Новосибирск, ИГД СО РАН, 2012), международной конференции «Форум горняков» (Украина, Днепропетровск, НГУ, 2012), 9-ой и 10-й Международной молодежной научной школе «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 2012, 2013), Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы "Горняцкая смена" (Новосибирск, ИГД СО РАН, 2013), VII школе-семинаре молодых ученых России «Проблемы устойчивого развития региона» (Улан-Удэ, БНЦ СО РАН, 2013), V Ураль-

ском горнопромышленном форуме (Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2013), IV международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения» (Казахстан, Алматы, КазНТУ, 2014).

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 29 печатных работах, в том числе 8 работ – в изданиях, рекомендованных ВАК России, и 3 патента на полезную модель РФ.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 146 страницах машинописного текста, включая 16 таблиц, а также содержит 71 рисунок, список литературы из 141 наименования и 3 приложения.

Основной объем экспериментальных исследований выполнен в лабораториях горной геофизики и механизации горных работ ИГД СО РАН и в натурных условиях на экспериментальном полигоне ИГД СО РАН «Зеленая Горка».

Автор благодарен своему научному руководителю член-корреспонденту РАН, д.ф.-м.н., профессору В.Н. Опарину за помощь в выборе темы работы и проведении исследований, выражает глубокую признательность к.т.н. Е.В. Денисовой за неоценимую помощь в работе, а также сотрудникам лабораторий горной геофизики и механизации горных работ ИГД СО РАН за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Рассмотрены основные достижения и перспективы развития акустических систем применительно к решению проблемы геофизического контроля движения породоразрушающих устройств ударного действия в массиве горных пород (на примере пневмоударных машин в грунтовой массиве), дан анализ применяемых методов и технических средств для соответствующего круга задач.

Развитию методов геофизического контроля состояния породных массивов, в том числе, методов горной геофизики, посвящено много научных работ. Акустическим методам много внимания в своих работах уделяли М.А. Садовский, М.В. Курленя, Е.И. Шемякин, В.С. Ямщиков, И.А. Турчанинов, А.А. Козырев, В.Н. Опарин, В.Л. Шкурятник, А.С. Вознесенский, И.Ю. Рассказов, Ю.В. Ризниченко и др.

Геофизический контроль обычно включает в себя изучение природы и структуры геосреды, контроль пространственной неоднородности и временной изменчивости естественных и искусственных физических полей в массиве горных пород и его физико-механических свойств. Он часто осуществляется с использованием упругих волн с различными частотными диапазонами, источниками излучения и схемами измерения. В целом анализ акустических методов диагностики и контроля состояния массива горных пород показал, что среди них отсутствуют методы, позволяющие регистрировать сигналы от движущихся в массиве источников на малых расстояниях, однако имеется экспериментальное подтверждение возможности их реализации. Разработка систем, позволяющих по характеристикам акустического сигнала, возникающего при взаимодействии породоразрушающего устройства с геосредой вести мониторинг его движения, необходима

для выбора оптимального режима бурения и оперативной коррекции траектории проходимой скважины.

При проходке скважин пневмоударными машинами могут возникать их существенные отклонения от проектной траектории. А.Д. Костылевым, Б.Н. Смоляницким, Н.П. Чепурным и др. были разработаны конструкции управляемых пневмоударных машин, однако широкого промышленного применения они пока не получили. Одной из причин этого является отсутствие подходящих систем мониторинга их движения в породном массиве. Применительно к решению этой задачи впервые использование параметров индуцированных пневмоударной машиной акустических волн было предложено в ИГД СО РАН В.В. Трубицыным и В.В. Червовым. Создание акустических систем мониторинга требует существенного объема исследований для учета взаимосвязи динамико-кинематических характеристик распространяющихся в геосреде упругих волн с механическими процессами, происходящими при взаимодействии породоразрушающих инструментов с неоднородным породным массивом.

В рамках решения первой задачи диссертантом построена аналитическая модель акустического излучателя, движущегося горизонтально в породном массиве, предложен амплитудный метод многоканального акустического мониторинга траектории движения пневмоударной машины при сооружении скважин и выполнена оценка его информативности.

Амплитудный метод многоканального акустического мониторинга траектории движения пневмоударной машины предполагает использование сигнала, создаваемого самой машиной в процессе ее работы. Регистрируемый на поверхности массива акустический сигнал является суперпозицией волн различного типа: продольных, поперечных и поверхностных (волны Релея, Лява и псевдорелеевские). Однако на амплитуду первой полуволны импульса оказывает влияние только продольная волна, поскольку ее скорость в массиве горных пород значительно выше остальных. Амплитуда продольной волны затухает с увеличением расстояния l согласно зависимости $A(l) = A_1 e^{-\beta l}$, где A_1 – начальная амплитуда акустического сигнала, β – коэффициент затухания амплитуды акустической волны. Изменение ее амплитуды можно использовать для мониторинга траектории движения пневмоударной машины в массиве. При отклонении машины от проектной траектории движения амплитуда акустического сигнала на поверхности земли описывается выражением: $A(\alpha) = A_0 e^{-\beta h(\frac{1}{\cos \alpha} - 1)}$, где A_0 – амплитуда акустического сигнала над пневмоударной машиной, h – глубина запуска машины, α – угол отклонения машины от заданной траектории движения. Коэффициент затухания амплитуды акустической волны $\beta_p = \sqrt{\frac{\rho}{E^3}} k_p$, где ρ – плотность грунта, E – его модуль упругости, k_p – коэффициент, учитывающий частоту волны, тепловые и вязкостные свойства среды. Таким образом, при проходке скважины в породном массиве измеряют амплитуду волновых ускорений в различных точках на его поверхности. Измеряется амплитуда первой полуволны колебания, чтобы избежать ошибок, связанных с суперпозицией волн. По распределению амплитуды на поверхности определяют текущее местоположение машины. Точка, в которой ам-

плитуда сигнала максимальна, соответствует проекции забоя скважины на дневную поверхность.

При коэффициенте затухания акустических волн $\beta = 3 \text{ м}^{-1}$ на глубинах 0,5 – 5 м разрешающая способность метода составляет 4 – 13 градусов, что соответствует регистрируемым отклонениям 100 – 270 мм (рис. 1).

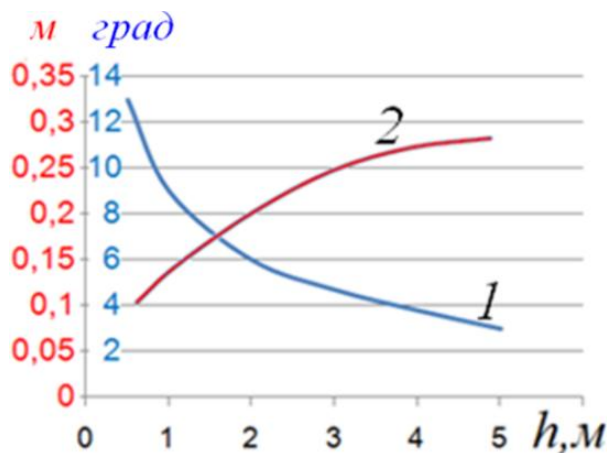
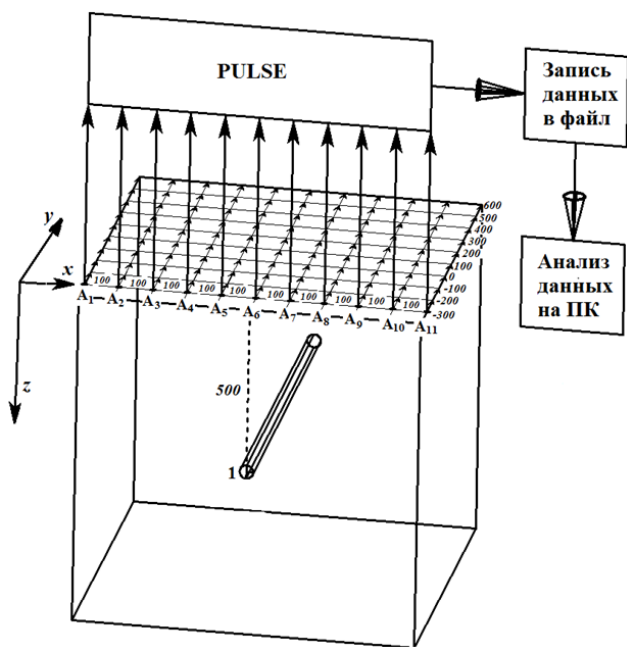


Рис. 1. Разрешающая способность амплитудного метода многоканального акустического мониторинга траектории пневмоударной машины при различной глубине запуска h : 1 – градусы, 2 – метры

Для проверки возможности практического применения предложенного метода мониторинга траектории движения пневмоударной машины выполнены экспериментальные исследования амплитуд акустических сигналов, индуцированных при проходке скважины в грунте. Грунтовой массив представлен суглинком плотностью 2 г/см^3 , влажностью 10%. Пневмоударная машина с массой ударника 2 кг (диаметр 40 мм, энергия удара 22 Дж, частота ударов 7 Гц, длина рабочего органа 550 мм) запускалась на глубине 500 мм для прокладки скважины (рис. 2). Акустические сигналы фиксировались с помощью 11 акселерометров KD29, подключенных к 12-канальному модулю 3053 измерительного комплекса Pulse Briel&Kjaer. Акселерометры располагались на поверхности Земли с шагом 100 мм на оси, перпендикулярной оси движения пневмоударной машины, и после записи каждой последовательности импульсов передвигались вдоль оси движения на 100 мм. Это позволило получить распределение значений волновых ускорений на поверхности Земли. В условиях постановки эксперимента точность определения местоположения машины составила 70 мм.

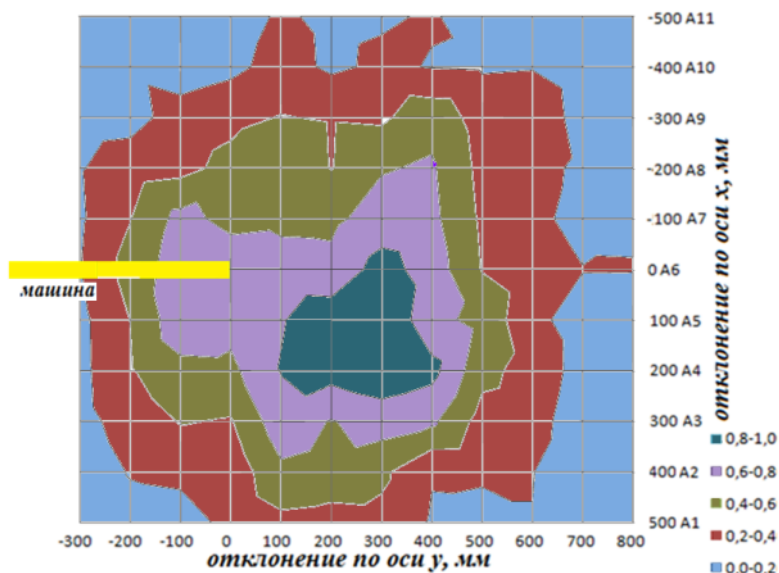
Выполненные исследования показали, что мониторинг траектории движения пневмоударной машины при проходке скважин в горизонтальной плоскости можно осуществлять по критерию максимума амплитуды акустического сигнала, зарегистрированного на контролируемом участке поверхности, однако наличие при этом в массиве неоднородностей, существенно отличающихся по физико-механическим свойствам от свойств вмещающих пород может вызывать смещение амплитудного максимума в сторону. Это легло в основу **первого научного положения**.



а



б



в

Рис. 2. Экспериментальные исследования акустического поля, создаваемого движущейся пневмоударной машиной в грунтовом массиве: а – схема натурных измерений, б – фотография измерительного комплекса, в – распределение амплитуды волновых ускорений на дневной поверхности

В рамках решения второй задачи выполнено численное моделирование процесса взаимодействия пневмоударной машины с породным массивом с учетом вариации его физико-механических свойств. Эта задача относится к классу задач динамической теории упругости. Их решению много внимания уделяли в своих работах Л.В. Канторович, С.Л. Соболев, Б.Г. Михайленко, Дж.А. Зукас, Дж. Часкаловиц, Г.И. Петрашень, Д.Бленд, В.Б. Поручиков, Л.В. Никитин, Г.В. Решетова, Д.Ю. Сирота, Н.И. Александрова, В.А. Васенин и др.

Диссертантом рассмотрена задача о нахождении волновых полей смещений, скоростей и ускорений массива при ударном воздействии на него породоразрушающего инструмента. Задача решалась методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS 14.

Моделировался единичный удар пневмоударной машины, поскольку при проходке скважин пневмопробойниками период повторения импульсов (0,1 с)

значительно превышает длительность возникающих колебаний (10 мс), и импульсы не оказывают существенного взаимного влияния. Породный массив, в котором заглублена пневмоударная машина, считался однородным и изотропным. К машине прикладывалась динамическая нагрузка и анализировалось распределение амплитуд колебаний на различных расстояниях от нее. В задаче рассматривался период времени 0,1 с, шаг дискретизации расчетов составлял 50 мкс. Интегрирование соответствующей системы дифференциальных уравнений производилось методом Ньюмарка. При воздействии пневмоударной машины на забой скважины в массиве образуется область пластической деформации, где поглощается часть упругой энергии источника. Для учета нелинейных явлений в этой области (вокруг рабочего органа) использовался метод Ньютона-Рафсона (матрица жесткости и вектор нагрузок модифицировались на каждой итерации).

Пневмоударная машина моделировалась пустотелым цилиндром с передней частью в виде усеченного конуса (с геометрическими характеристиками, соответствующими пневмоударной машине применяемой в представленных выше экспериментальных исследованиях). Силовое воздействие $\sigma(t)$ амплитудой $A_{\max}$ и длительностью τ прикладывалось к переднему торцу внутреннего цилиндра пневмоударной машины. Время τ равнялось времени механического воздействия ударника по наковальне машины. По экспериментальным данным оно составляет величину порядка 100 мкс.

Границы рассчитываемой области были приняты исходя из условия, что отсутствует влияние участка исследования (зоны ударного взаимодействия) на внешний контур расчетной области. Общий размер модели составил 5x5 м. Краевые условия задачи задавались в виде ограничений на перемещения по всем компонентам вектора перемещений. На поверхностях касания пневмоударной машины с массивом задавались условия частичного проскальзывания с коэффициентом трения 0,3. Дискретизация расчетной области осуществлялась на четырехугольные конечные элементы переменного размера (рис. 3).

Система дифференциальных уравнений для определения вектора перемещений узловых точек имеет вид:

$$[M](\ddot{u}) + [C](\dot{u}) + [K](u) = (F(t)),$$

где $[M]$ – матрица масс, $[C]$ – матрица демпфирования, $[K]$ – матрица жесткости, $(\ddot{u})$ – вектор ускорений, $(\dot{u})$ – вектор скоростей, (u) – вектор перемещений, $(F(t))$ – вектор приложенного силового воздействия.

В модели применялось демпфирование по Рэлею. Матрица демпфирования определялась с использованием матриц масс и жесткости: $[C] = \varepsilon \cdot [M] + \chi \cdot [K]$.

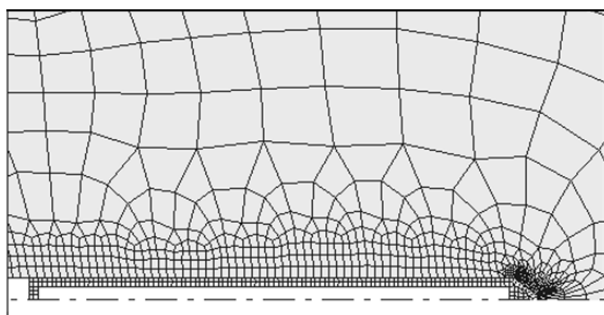


Рис. 3. Дискретизация фрагмента расчетной области на конечные элементы

Коэффициенты вязкого демпфирования ε и χ являются вещественными константами. В диссертации они подбирались из условий соответствия данных расчетов результатам экспериментальных исследований.

Расчетная модель предполагает ввод следующих исходных данных: модуль упругости Юнга, коэффициент Пуассона, плотность, коэффициент трения и параметры демпфирования (вязкости) ε и χ породного массива.

Численное моделирование выполнено для сред с модулем упругости Юнга в диапазоне 1-200 МПа и плотностью 1,4-2,7 г/см³. В результате установлено, что разрешающая способность амплитудного метода многоканального акустического мониторинга траектории движения пневмоударной машины по углу отклонения от проектной траектории движения снижается с ростом модуля упругости Юнга и увеличивается с возрастанием плотности массива. Например, при неизменной плотности $\rho = 2$ г/см³, при изменении модуля упругости Юнга от 1 МПа до 200 МПа, она уменьшается в 13 раз – от 0,52 м до 0,04 м (рис. 4).

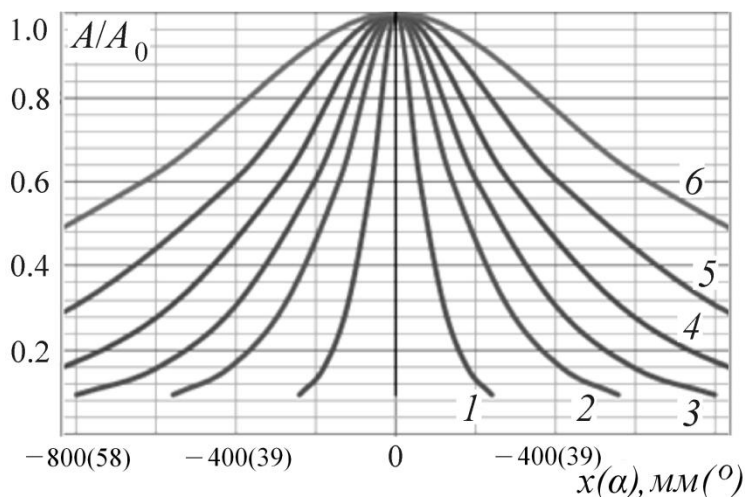


Рис. 4. Зависимости амплитуды акустического сигнала A/A_0 от отклонения пневмоударной машины от проектной траектории движения $x(\alpha)$ над забоем скважины при разных значениях модуля упругости Юнга массива: 1 – 1 МПа; 2 – 15; 3 – 33; 4 – 66; 5 – 100; 6 – 200 МПа

Данные численного моделирования сравнивались с результатами экспериментальных исследований. Относительная погрешность результатов в среднем составила 10,4% (рис. 5).

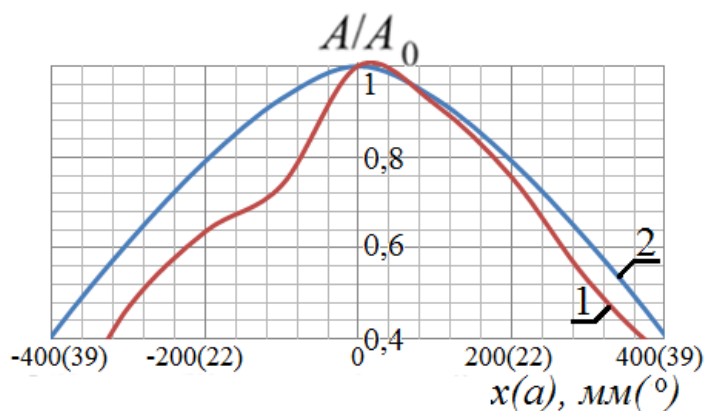


Рис. 5. Зависимость амплитуды акустического сигнала A/A_0 от величины отклонения пневмоударной машины от проектной траектории движения $x(\alpha)$ над забоем скважины: 1 – данные эксперимента, 2 – данные численного моделирования

Полученные результаты легли в основу **второго научного положения**.

В рамках решения третьей задачи выполнено численное моделирование и экспериментальное исследование процесса взаимодействия пневмоударной машины с породным массивом, содержащим над сооружаемой скважиной техноген-

ную неоднородность в виде металлического трубопровода или трубопровода из поливинилхлорида (далее ПВХ).

Моделирование выполнялось в трехмерной постановке с параметрами, представленными выше. В грунтовой массив в одной с машиной горизонтальной или вертикальной плоскости на расстоянии d введен трубопровод диаметром Z . Установлено, что при расположении трубопровода над сооружаемой скважиной, на поверхности Земли происходит перераспределение амплитуд акустического сигнала (за счет реверберации волн на границах раздела сред), что приводит к образованию локального минимума акустического сигнала над трубопроводом (рис. 6). Увеличение размера трубопровода, а также уменьшение расстояния между сооружаемой скважиной и проложенным трубопроводом ведет к уменьшению величины локального минимума амплитуды акустического сигнала над трубопроводом (рис. 7).

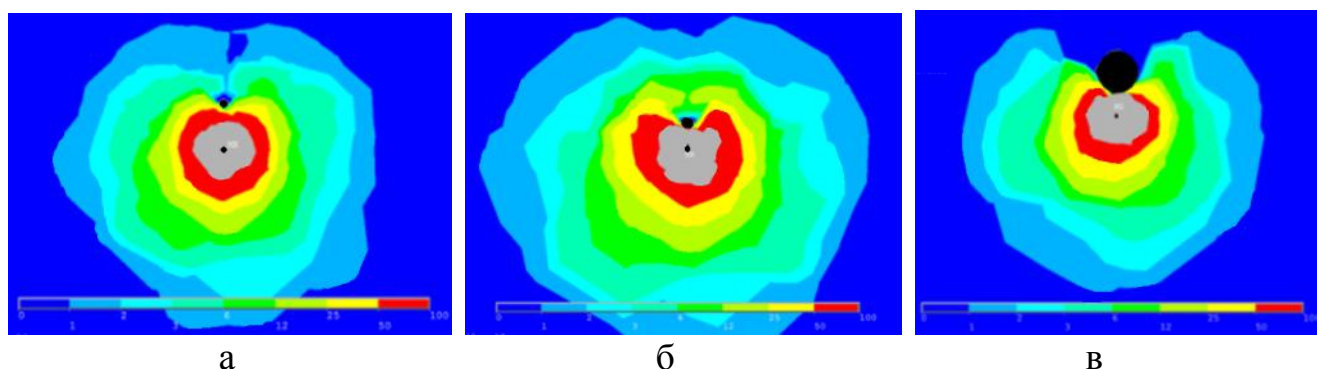


Рис. 6. Распределения амплитуды акустического сигнала в массиве при наличии трубопровода над сооружаемой скважиной для случаев: а – $Z = D$, $d = 4D$, б – $Z = D$, $d = 2D$, в – $Z = 4D$, $d = 4D$

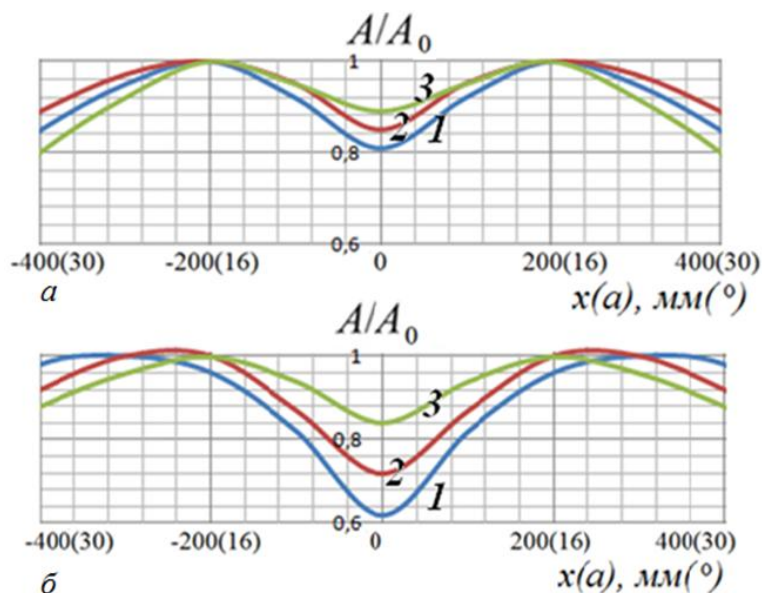


Рис. 7. Зависимость амплитуды акустического сигнала A/A_0 от величины отклонения пневмоударной машины от проектной траектории движения $x(a)$ при наличии над сооружаемой скважиной металлического трубопровода диаметром: а – $Z = 2D$, б – $Z = 4D$, расположенного над машиной на расстояниях: 1 – $d = 4D$, 2 – $d = 6D$, 3 – $d = 8D$

Для проверки установленных закономерностей были выполнены экспериментальные исследования. Геомеханические условия проведения эксперимента оставались такими же, как для однородного массива.

В результате установлено, что расхождение результатов численного моделирования и данных эксперимента для грунтового массива, содержащего техногенную неоднородность, не превышает 8,2% при наличии металлического трубопровода (рис. 8) и 11,2% при наличии ПВХ – трубопровода.

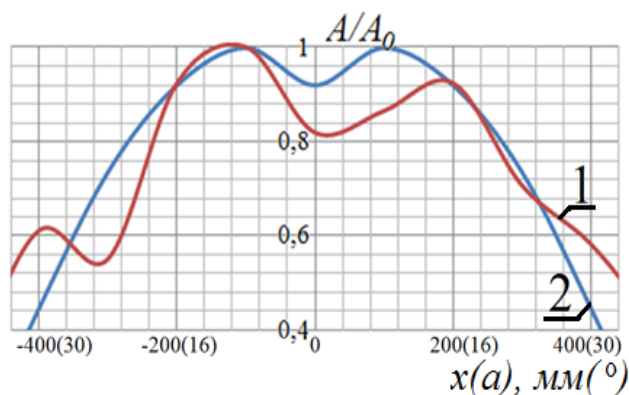


Рис. 8. Зависимость амплитуды акустического сигнала A/A_0 от величины отклонения пневмоударной машины от проектной траектории движения $x(a)$ при наличии на расстоянии 200 мм над сооружаемой скважиной металлического трубопровода: 1 – данные эксперимента, 2 – данные численного моделирования

Спектральный анализ и обработка акустических сигналов, индуцированных пневмоударной машиной в процессе движения, выполнены с помощью программного обеспечения Pulse LabShop V. 10.1. При этом установлено, что в однородном грунтовом массиве частота основного спектрального максимума, индуцированного движением пневмоударной машины составляет 200-350 Гц, а при наличии над сооружаемой скважиной металлического или ПВХ трубопровода эта частота увеличивается до 420-525 Гц. Наличие техногенной неоднородности приводит также к снижению амплитуды всех спектральных составляющих зарегистрированных сигналов (рис. 9).

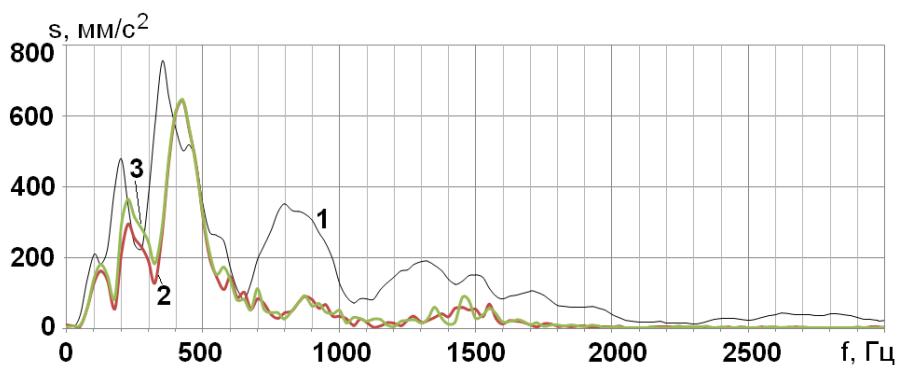


Рис. 9. Спектральный состав акустического импульса на поверхности Земли над забоем скважины: 1 – в однородном грунте, 2 – при наличии металлического трубопровода над сооружаемой скважиной, 3 – при наличии ПВХ трубопровода над сооружаемой скважиной

Полученные результаты легли в основу **третьего научного положения**.

В рамках решения четвертой задачи, с учетом полученных выше теоретических и экспериментальных данных, разработано техническое средство мониторинга траектории движения пневмоударных машин в массиве горных пород при сооружении горизонтальных скважин – ДОМПМ и проведены его испытания в натурных условиях. На рис. 10 представлена блок-схема разработанного

устройства, а на рис. 11 – опытный образец при его испытании в натуральных условиях.

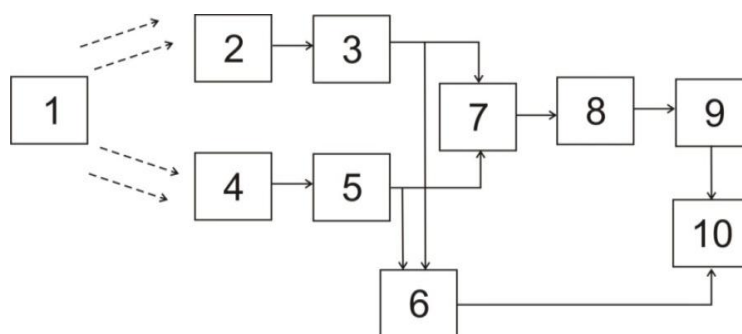


Рис. 10. Блок-схема ДОМПМ: 1 – источник акустического сигнала; 2, 4 – акусто-электрические преобразователи; 3, 5 – усилители низкой частоты; 6 – устройство сравнения; 7 – умножитель; 8 – пиковый детектор; 9 – устройство согласования; 10 – устройство обработки информации



а



б

Рис. 11. Двухканальный обнаружитель местоположения пневмоударной машины: а – опытный образец, б – испытания в натуральных условиях

Работа ДОМПМ происходит следующим образом. Два акустоэлектрических преобразователя располагают на поверхности Земли на равных расстояниях от проекции на дневную поверхность проектной оси движения пневмоударной машины. Акустический сигнал после усиления и фильтрации поступает на умножитель и далее на устройство обработки информации. При движении машины по проектной траектории амплитуда напряжения на выходе обнаружителя будет максимальной. Уменьшение амплитуды сигнала характеризует отклонение машины от заданной траектории движения, а по разности амплитуд сигнала в каждом канале определяется, в какую сторону произошло отклонение.

Выполненные натурные испытания опытного образца разработанного устройства показали, что при одинаковом отклонении машины от проектной траектории (100 мм) амплитуда акустического сигнала после обработки в ДОМПМ уменьшается на 32%, а без нее – на 16% (рис. 12).

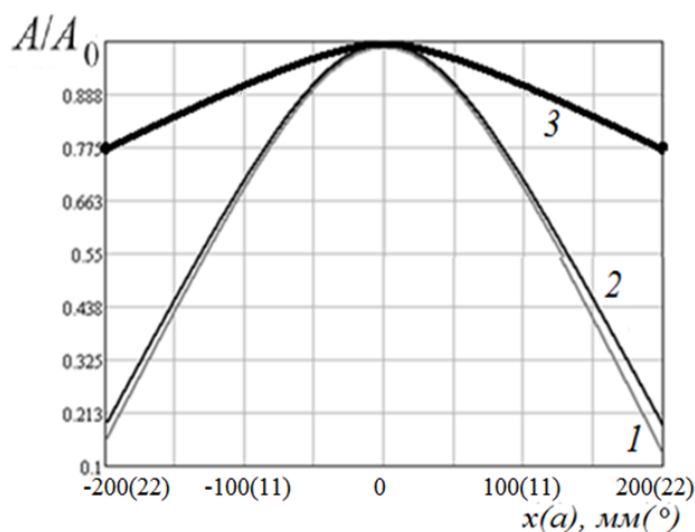


Рис. 12. Зависимости амплитуды сигнала: 1, 2 – с применением обработки в ДОМПМ при расстояниях между акусто-электрическими преобразователями равном 1 – 800 мм, 2 – 400 мм, 3 – без применения обработки

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что прием полезного сигнала по двум каналам с применением операции умножения позволяет повысить точность определения местоположения пневмоударной машины, как минимум, в два раза по сравнению с использованием сигнала без обработки. Отмеченные результаты легли в основу **четвертого научного положения**.

Заключение

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения задачи мониторинга процесса движения пневмоударной машины в массиве горных пород, имеющие существенное значение для развития страны и направленные на повышение качества ведения горных и строительных работ при сооружении скважин бестраншейными методами. Наиболее важные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Разработан амплитудный метод многоканального акустического мониторинга траектории движения пневмоударной машины в грунтовой массе, основанный на изучении динамико-кинематических и амплитудно-частотных характеристик индуцированного ее работой сигнала.

При этом установлено, что:

- увеличение модуля упругости Юнга грунтового массива приводит к снижению разрешающей способности метода по величине отклонения машины от заданной траектории ее движения;
- увеличение плотности грунтового массива – соответственно к повышению разрешающей способности;

– в естественном грунтовом массиве частота основного спектрального максимума, индуцированного движением пневмоударной машины, составляет 200-350 Гц.

2. В рамках программного комплекса «ANSYS 14» разработан блок решения динамических задач, касающихся взаимодействия пневмоударной машины с грунтовым массивом, который позволяет с достаточной точностью оценивать параметры колебаний грунта при проходке скважин.

3. Установлено, что при наличии в грунтовом массиве проложенного трубопровода над сооружаемой скважиной в одной с пневмоударной машиной вертикальной плоскости, на поверхности Земли наблюдаются следующие особенности в изменении регистрируемых параметров индуцируемого акустического поля:

– над трубопроводом образуется локальный минимум создаваемых движением пневмоударной машины волновых ускорений, глубина которого растет с увеличением диаметра трубопровода и с уменьшением расстояния между трубопроводом и машиной. Для металлического трубопровода этот эффект выражен в большей степени, чем для трубопровода из ПВХ;

– происходит увеличение частоты основного спектрального максимума одиночного ударного импульса до 420-525 Гц и снижение амплитуд спектральных составляющих во всем диапазоне частот.

4. Разработан и испытан в натурных условиях двухканальный обнаружитель местоположения пневмоударной машины, который позволяет повысить точность определения местоположения пневмоударной машины в массиве горных пород не менее, чем в 2 раза за счет применения операции умножения регистрируемых сигналов.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Денисова, Е.В. Технология формирования наклонно-горизонтальных скважин с помощью буровых машин и информационно-измерительный комплекс для их навигации / Е.В. Денисова, А.С. Кондратенко, В.В. Тимонин, **А.И. Конурин** // Известия Самарского научного центра. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2011. – Т. 13. – №1(2) – С. 433 – 435.

2. Денисова, Е.В. Геомеханическое обоснование результатов экспериментальных исследований параметров акустического поля, индуцированного движущейся в грунте пневмоударной машиной / Е.В. Денисова, А.А. Неверов, С.Ю. Гаврилов, **А.И. Конурин** // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово: КузГТУ, 2011. – №5. – С. 36 – 39.

3. Денисова, Е.В. О результатах испытаний многоканального комплекса для контроля геомеханических процессов / Е.В. Денисова, И.В. Тищенко, **А.И. Конурин** // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово: КузГТУ, 2012. – №6. – С. 16 – 19.

4. Опарин, В.Н. Результаты испытаний акустических систем контроля местоположения пневмоударной машины в грунтовом массиве / В.Н. Опарин, Е.В. Денисова, **А.И. Конурин** // Физико-технические проблемы разработки полезных

ископаемых. – Новосибирск, Издательство Сибирского Отделения РАН, 2012. – №4. – С. 189 – 196.

5. Денисова, Е.В. Проблемы контроля движения пневмоударной машины в грунтовом массиве / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин** // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – Москва: МГГУ, 2013. – №3. – С. 279 – 284.

6. Денисова, Е.В. Геомеханическая модель взаимодействия рабочего органа пневмоударной машины с грунтовым массивом / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин** // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск: – 2013. – №5. – С. 61 – 70.

7. Денисова, Е.В. Экспериментальные исследования и численное моделирование акустического поля, создаваемого на поверхности грунтового массива при движении в нем пневмоударной машины / Е.В. Денисова, С.Ю. Гаврилов, **А.И. Конурин** // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово: КузГТУ, 2013. – №5. – С. 106 – 109.

8. Денисова, Е.В. Исследование влияния свойств грунтового массива на параметры распространяющегося в нем импульсного сигнала / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин** // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – Москва: МГГУ, 2014. – №8. – С. 176 – 181.

Публикации в других изданиях:

9. Денисова, Е.В. Акустический определитель местоположения источника шума / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин**, С.Ю. Гаврилов // Сборник материалов V Международного научного конгресса ГЕО-СИБИРЬ-2009 – Новосибирск: СГГА, 2009. – Т. 2. – С. 257 – 259.

10. Денисова, Е.В. Двухканальный акустический обнаружитель местоположения пневмоударной машины в грунте / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин**, К.С. Полин // 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: Издательство ТПУ, 2009. – С. 633 – 635.

11. Денисова, Е.В. Исследование параметров распространения упругих волн, вызванных единичным ударом о поверхность среды с неоднородностями / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин**, С.Ю. Гаврилов // Электронный сборник тезисов 5-ой Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле (29 ноября – 02 декабря 2010 года). – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2010.

12. Денисова, Е.В. Исследование параметров акустического сигнала, возникающего при ударном воздействии на среду с дефектами, с помощью модуля National Instrument USB-9233 / Е.В. Денисова, С.Ю. Гаврилов, **А.И. Конурин** // Сборник трудов молодых ученых «Горняцкая смена» – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. – Т. 2. – С. 25 – 31.

13. Денисова, Е.В. Техническое средство и программное обеспечение для исследования низкочастотного акустического сигнала, создаваемого движущейся в грунте пневмоударной машиной / Е. В. Денисова, **А. И. Конурин**, К. С. Полин // Труды Всероссийской конференции с участием иностранных ученых 06-10 июля 2009 г. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» – ИГД СО РАН, Новосибирск, 2010. – С. 149 – 152.

14. Денисова, Е.В. Информационно-измерительный комплекс для контроля деформационно-волновых процессов, возникающих в массиве горных пород при движении в нем ударной машины / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин**, Н.С. Полотнянко // Труды Всероссийской конференции с участием иностранных ученых 03-06 октября 2011 г. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» – ИГД СО РАН, Новосибирск, 2011. – Т.2. – С. 222 – 227.

15. Денисова, Е.В. Исследование акустического поля, создаваемого движущимся в грунтовом массиве пневмопробойником / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин**, С.Ю. Гаврилов // Труды XV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» – Томск: Издательство ТПУ, 2011. – Т. 2. – С. 371 – 373.

16. Пат. 116573 Российская Федерация, МПК Е 21 В4 7/0224, Акустический обнаружитель горизонтального местоположения источника звука в грунте / Опарин В.Н., Денисова Е.В., Гаврилов С.Ю. **Конурин А.И.**; заявитель и патентообладатель Учреждение РАН ИГД СО РАН – № 2011152696/03; заявл. 22.12.2011; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15.

17. Пат. 118765 Российская Федерация, МПК G 01 S1 5/06, Измеритель координат импульсного акустического сигнала в среде / Денисова Е.В., Опарин В.Н., Гаврилов С.Ю., **Конурин А.И.**, Полотнянко Н.С.; заявитель и патентообладатель Учреждение РАН ИГД СО РАН – № 2012113237/28; заявл. 04.04.2012; опубл. 27.07.2012, Бюл. №21.

18. Денисова, Е.В. Акустический комплекс для контроля ведения горных работ бестраншейными методами / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин**, Н.С. Полотнянко, И.А. Вдовина, В.Н. Шкаровский // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». – НГТУ, Новосибирск, 2012. – С. 183 – 187.

19. Денисова, Е.В. Геомеханический контроль местоположения источника ударных импульсов в массиве горных пород / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин**, Н.С. Полотнянко // 2-ая Российско-Китайская научная конференция «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах». Сборник трудов. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. – С. 327 – 332.

20. Денисова, Е. В. Проблемы реализации акустических устройств контроля положения проходческой машины в породном массиве / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин** // Форум горняков – 2012: материалы международной конференции; 3 – 6 октября 2012 г. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2012. – Т.4 – С. 141 – 145.

21. Денисова, Е. В. Зависимость параметров ударного импульса от свойств среды и ее неоднородностей / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин** // 9-я Международная молодежная научная школа «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». Том 2. – М.: ИПКОН РАН, 2012 – С. 142 – 145.

22. Денисова, Е. В. Разработка программного обеспечения для обработки экспериментальных данных геомеханического мониторинга состояния породного массива / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин**, Я.З. Бадмаева // Сборник трудов Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с

элементами научной школы "Горняцкая смена - 2013". – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013. – С. 37 – 42.

23. Денисова, Е. В. Моделирование распространения упругих волн в неоднородной среде при ударном воздействии / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин** // Сборник трудов Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы "Горняцкая смена – 2013". – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013. – С. 111 – 116.

24. Денисова, Е. В. Система навигации ударных машин в грунтовом массиве для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций / Е.В. Денисова, **А.И. Конурин** // Проблемы устойчивого развития региона: VII школа-семинар молодых ученых России: Материалы докладов. 26-30 июня 2013 г., Улан-Удэ. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. – С. 191 – 194.

25. Денисова, Е. В. Об определении местоположения ударного породоразрушающего инструмента при движении его в массиве горных пород / Е.В. Денисова, **А. И. Конурин**, А. П. Хмелинин // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: XX Всероссийская конференция с участием иностранных ученых. – Новосибирск: Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 2013. – С. 422 – 428.

26. Денисова, Е. В. Численное моделирование волнового поля ускорений для системы «грунтовый массив – ударный породоразрушающий инструмент» / Е. В. Денисова, **А. И. Конурин** // Официальный каталог: V Уральский горнопромышленный форум. – Екатеринбург: Издательство АМБ. – С. 248 – 250.

27. **Конурин, А. И.** Контроль движения пневмоударной машины по параметрам акустического импульса / **А. И. Конурин** // Сборник трудов 10-ой международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» М: ИПКОН РАН, 2013 – С.106 – 109.

28. Пат. 136589 Российская Федерация, МПК G 01 S1 5/06, Измеритель координат работающей пневмоударной машины / Денисова Е.В., Опарин В.Н., Хмелинин А.П., **Конурин А.И.**; заявитель и патентообладатель Учреждение РАН ИГД СО РАН – № 2013122997/28; заявл. 20.05.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. №21.

29. Денисова, Е. В. Применение комплекса геофизических методов для контроля процесса движения пневмоударной машины в грунтовом массиве / Е.В. Денисова, А. П. Хмелинин, **А. И. Конурин**, С. Ю. Гаврилов // Материалы IV международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения» – Алматы: Казахский Национальный Технический Университет имени К.И.Сатпаева, 2014 – С.130 – 136.