

ны в породном массиве, относительно времени прихода опорного сигнала (с самой машины) можно определять ее трехмерные координаты с точностью до единиц сантиметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисова Е.В., Тищенко И.В., Конурин А.И. О результатах испытаний многоканального комплекса для контроля геомеханических процессов // Вестник КузГТУ, 2012. – №6. – С. 16-19.
2. Патент на полезную модель №118765 Измеритель координат импульсного акустического сигнала в среде. Патент РФ на полезную модель / В.Н. Опарин, Е.В. Денисова, С.Ю. Гаврилов, А.И. Конурин, Н.С. Полотнянко // Опубл. Бюл. – 2012. – №21.
3. USA, United States Patent № 6,886,644. Apparatus and method for horizontal drilling / Vermeer Manufacturing Company. USA. Appl. No.: 10/224,205., Publ. May 3, 2005.
4. USA, United States Patent №8,213,264. Method and device of measuring location, and moving object / Samsung Electronics Co., Ltd., USA. Appl. No.: 12/656,024. Publ. July 3, 2012.
5. USA, United States Patent № 8,264,909. System and method for depth determination of an impulse acoustic source by cepstral analysis / The United States of America as represented by the Secretary of the Navy, USA. Appl. No.: 12/698,679. Publ. September 11, 2012.

□ Авторы статьи

Денисова
Екатерина Вячеславовна,
канд.техн.наук старший науч-
ный сотрудник Института
горного дела СО РАН,
Тел.(383) 217-09-52,
e-mail: slimthing@mail.ru

Тищенко
Игорь Владимирович,
канд.техн.наук, научный
сотрудник Института горно-
го дела СО РАН,
телефон (383)217-05-13

Хмелинин
Алексей Павлович,
аспирант Института
горного дела СО РАН,
телефон (383) 217-09-52

Бадмаева
Янжима Зандановна,
магистрант НГТУ

УДК 534.61

Е.В. Денисова, С.Ю. Гаврилов, А.И.Конурин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО НА ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТОВОГО МАССИВА ПРИ ДВИЖЕНИИ В НЕМ ПНЕВМОУДАРНОЙ МАШИНЫ

Использование акустического сигнала, создаваемого движением пневмоударной машины в грунтовом массиве, для определения ее местоположения² позволило бы существенно повысить надежность и экономичность современных систем навигации для бестраншейных технологий сооружения подземных переходов. Применение машины в качестве излучателя полезного сигнала исключает необходимость размещения в ее рабочем органе дополнительных устройств, что повышает надежность системы навигации к ударным нагрузкам, и исключает необходимость изготовления дополнительного передающего устройства, что в целом снижает затраты на реализацию системы [1].

Экспериментальные исследования акустического поля, создаваемого движением в грунтовом массиве пневмоударной машины, проводились на полигоне ИГД СО РАН "Зеленая горка". Вблизи места проведения исследований отсутствуют вы-

соковольтные сети, а так же другие подземные коммуникации. Массив, в который запускалась машина можно принять однородным. Во входной приемок помещается пневмоударная машина «Тайфун-2» (габаритные размеры: длина 550 мм, диаметр 40 мм, энергия удара 22 Дж) на глубину 500 мм строго под измерительным акселерометром A_6 (схема эксперимента на рис. 1). Многоканальный измерительный комплекс PULSE располагается на поверхности земли, акселерометры $A_1...A_{11}$ подключены к 11 каналам блока 3053 и устанавливаются на выровненной поверхности земли с шагом 100 мм друг относительно друга вдоль оси x (фотография эксперимента на рис. 2). Для измерения поля, создаваемого машиной вдоль оси ее движения, акселерометры $A_1...A_{11}$ перемещают вдоль оси y (точки с координатами -300, -200, -100, 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 и 800 мм по схеме на рис. 1). Это позволит оценить степень изменения амплитуды акустического сигнала при произвольном расположении приемных каналов относительно пневмопробойника, характерном для проходки реальной скважины.

² Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.»

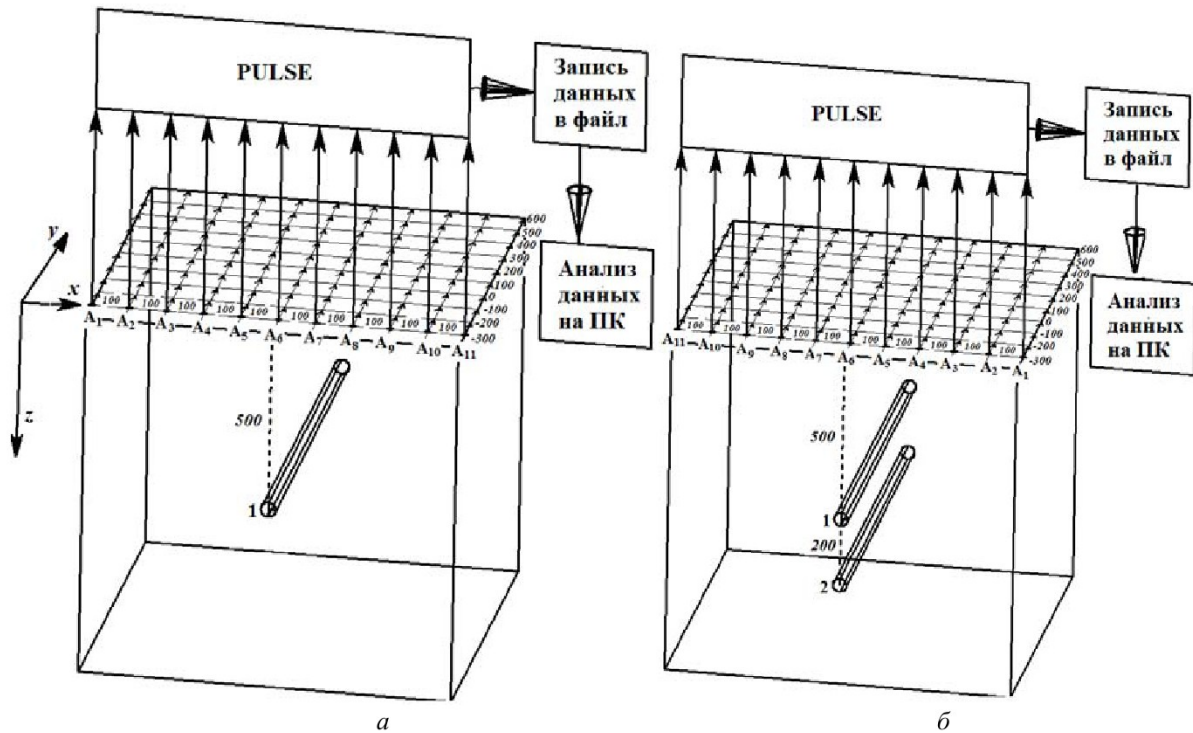


Рис. 1. Схема постановки эксперимента в однородном грунтовом массиве: 1, 2 – сооружаемые пневмоударной машиной скважины; $A_1 \dots A_{11}$ – измерительные акселерометры КД29; а – для однородного грунтового массива; б – для массива содержащего металлический трубопровод над сооружаемой скважиной

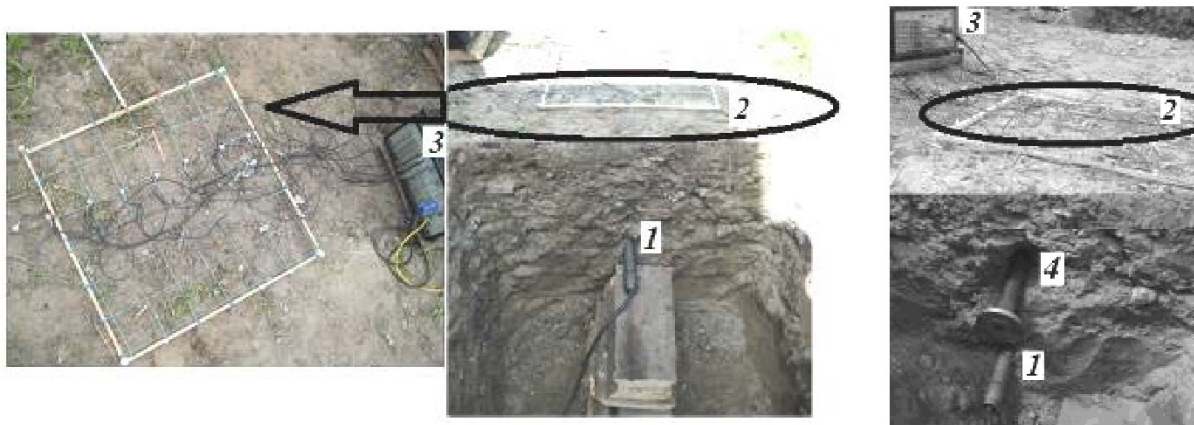
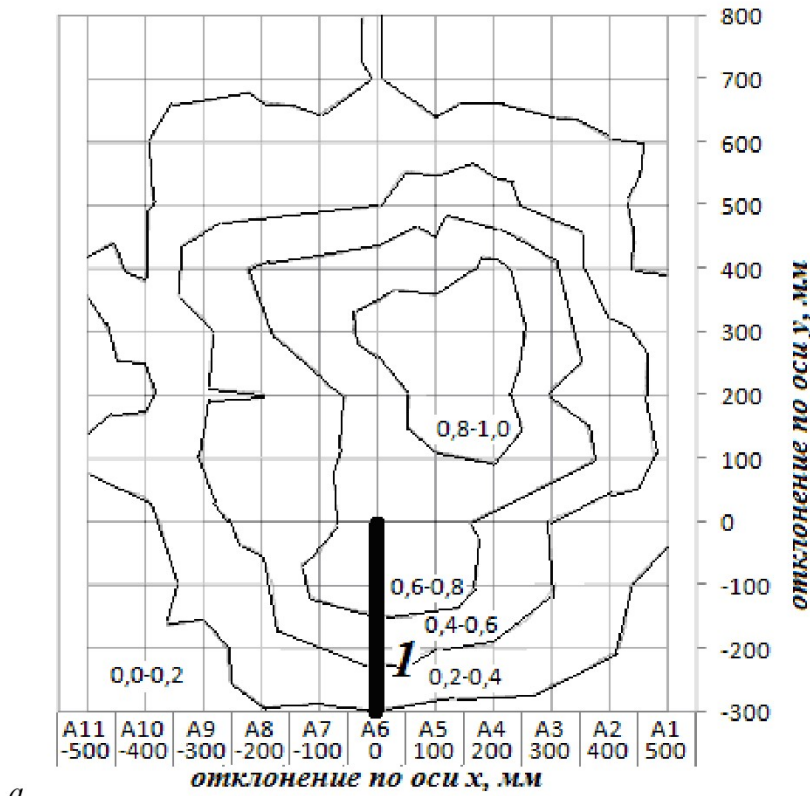


Рис. 2. Фотография экспериментальных исследований акустического поля, создаваемого движением пневмоударной машины в грунтовом массиве: 1 – пневмоударная машина «Тайфун-2»; 2 – акселерометры КД29 (11 шт.); 3 – многоканальный измерительный комплекс PULSE; 4 – металлический трубопровод

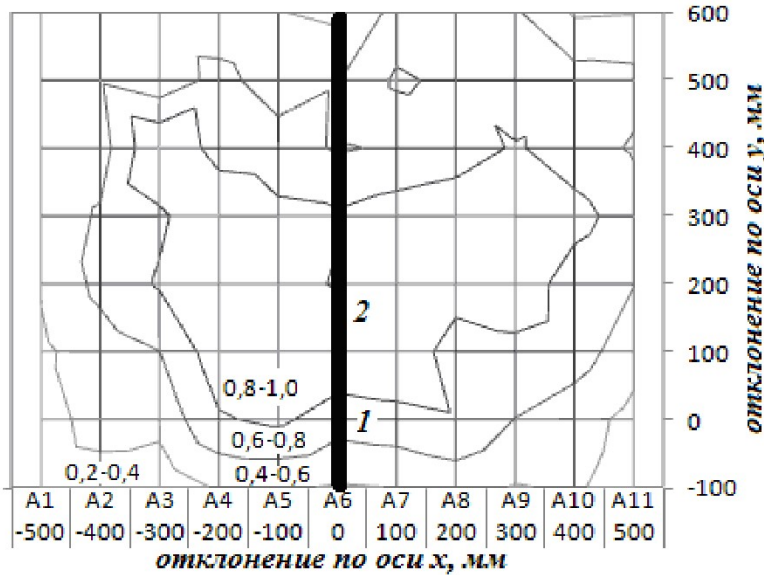
С выхода многоканального измерительного комплекса PULSE данные поступают на портативный компьютер, где обрабатываются с помощью программного обеспечения Pulse LabShop Version 10.1. Можно осуществлять экспорт данных в файл формата ASCII или в электронную таблицу, например, формата Microsoft Office Excel 2007.

Наиболее сильное влияние на работу акустической системы мониторинга местоположения

пневмоударной машины в грунтовом массиве оказывают уже проложенные в одной с ней вертикальной или горизонтальной плоскости подземные коммуникации в виде трубопроводов, выполненных из металла или полипропилена. Схема проведения исследований акустического поля, создаваемого движением машины в грунтовом массиве, содержащем неоднородность в виде металлического трубопровода над сооружаемой скважиной представлена на рис 1, б. Машина за-



а



б

Рис. 3. Акустическое поле, создаваемое движущимся в грунтовом массиве пневмопробойником, в относительных к своему максимальному значению единицах: а – для однородного грунтового массива; б – для массива содержащего металлический трубопровод (2) над сооружаемой машиной (1) скважиной

пускается в скважину 2, а в скважину 1 размещают неоднородность в виде металлического трубопровода длиной превышающей длину машины.

Для исключения амплитудных ошибок поддерживается постоянное давление подаваемого для работы пневмопробойника воздуха, осуществляют постоянные замеры расстояния, на которое работающая машина заглубилась в массив.

Перед выполнением экспериментальных исследований акселерометры прошли калибровку в соответствии с ГОСТ Р ИСО 16063-1-2009 "Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 1. Основные положения". Крепление

каждого акселерометра на поверхности земли осуществлялось в соответствии с ГОСТ 5348-2002 "Механическое крепление акселерометров" на шпильку.

Геосреда, в которой проводятся экспериментальные исследования представляет собой среду типа суглинок с влажностью менее 10%, плотность среды можно принять 2000 кг/м³. Верхний слой геосреды (примерно 200 мм от поверхности земли) содержит твердые породные включения диаметром до 40 мм, на глубине от 200 до 700 мм геосреда однородна и не содержит границ раздела сред.

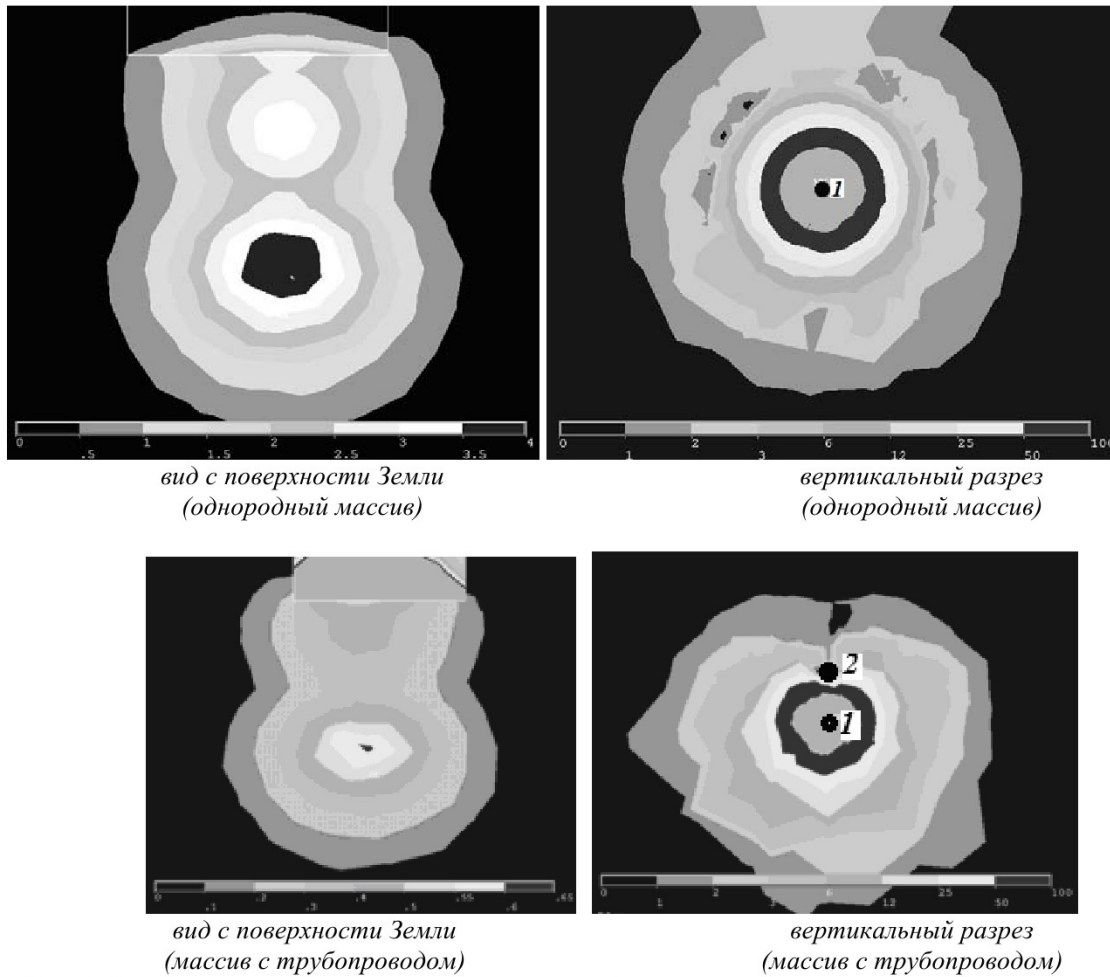


Рис. 4. Характер распределения волновых ускорений в грунтовом массиве при движении в нем пневмоударной машины: 1 - машина; 2 - металлический трубопровод диаметром 40 мм на расстоянии 200 мм над сооружаемой скважиной

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований акустического поля, создаваемого пневмоударной машиной на поверхности Земли. Передняя часть машины расположена в точке с координатами (0; 0).

Результаты экспериментальных исследований сопоставлялись с результатами численного моделирования характера распределения волновых ускорений, создаваемых движением пневмоударной машины в однородном грунтовом массиве и в массиве, содержащем металлический трубопровод над сооружаемой скважиной.

Модель пневмоударной машины представляет из себя пустотелый трубчатый стержень, к переднему торцу которого прикладывается нагружающий импульс треугольной формы.

Решалась задача о распространении упругих колебаний вокруг движущейся на заданной глубине пневмоударной машины, возбуждаемых еди-

ничным силовым воздействием в трехмерной постановке. Рассматривался единичный удар машины. Из полубесконечного пространства была выделена область конечных размеров. Границы рассматриваемой области для геомеханической модели приняты исходя из принципа Сен-Венана (отсутствие влияние участка исследования на внешний контур для расчетной области) [2]. Краевые условия задачи заданы в виде ограничений на перемещения по вертикальной и горизонтальной компонентам вектора перемещений и соответствующих компонент тензора напряжений (нулевые значения касательных напряжений). Материалы, выбранные при моделировании, представлены в табл. 1.

Расчетная область разбивается на конечные элементы, имеющие форму тетраэдров с 10 узлами [3]. Элементы имеют по 3 степени свободы в

Таблица 1. Применяемые при моделировании материалы

	Модуль Юнга E	Коэфф. Пуассона ν	Плотность γ , кг/м ³
Сталь (пневмоударная машина, искусственная неоднородность)	210 ГПа	0,3	7800
Суглинок (грунтовой массив)	50 МПа	0,4	2000

каждом узле – перемещения в направлении осей X , Y и Z узловой системы координат и могут иметь линейную или квадратичную аппроксимацию поля перемещений. В зонах ожидаемых наибольших градиентов деформаций применялись конечные элементы малого размера, а на участках с ожидаемым плавным изменением деформаций – более крупного. Для учета эффектов распространения волн, разбиение должно быть достаточным, для представления волны, при этом требуется не менее 20 конечных элементов на длину волны по направлению ее распространения. Тетраэдральные конечные элементы предпочтительнее для создания нерегулярной сетки на основе геометрических моделей сложной формы. Эти элементы также обладают свойствами учета больших перемещений и больших деформаций.

Для описания взаимодействия рабочего органа пневмоударника с грунтом были использованы контактные элементы. Введение последних позволяет учитывать граничные условия на контактной поверхности. В рассматриваемой задаче на поверхности контакта рабочего органа машины с грунтовым массивом задавались условия частичного проскальзывания с коэффициентом трения равным 0,3. Для повышения точности результатов исследований шаг дискретизации в области контакта уменьшался.

Система дифференциальных уравнений $[M](\ddot{u}) + [C](\dot{u}) + [K](u) = (F(t))$, решалась методом прямого интегрирования Ньюмарка в сочетании с методом Ньютона-Рафсона.

Результаты численных расчетов распределения волновых ускорений создаваемых движением пневмоударной машины в однородном массиве и в массиве содержащем над прокладываемой скважиной металлический трубопровод представлены на рис. 4.

Согласно данным экспериментальных и численных исследований акустическое поле, создаваемое пневмоударной машиной в однородном грунтовым массиве, представляет собой поле точечного излучателя, то есть равномерно распределено во всех направлениях. При этом эксперимен-

тальные данные (рис. 3, а) показывают смещение акустического поля вправо от оси движения машины, что может свидетельствовать о нахождении в массиве неоднородностей в виде твердых породных включений.

Наличие в однородном грунтовым массиве в одной вертикальной плоскости с машиной искусственной неоднородности в виде трубопровода диаметром $D=40$ мм соизмеримым с диаметром машины, на расстоянии $d=5D=200$ мм над ней вызывает перераспределение акустического поля в массиве, индуцированного единичным ударом пневмоударной машины, за счет возникновения сложных процессов отражения на границе раздела сред «массив-неоднородность», поглощения акустической энергии и огибания акустическими волнами искусственной неоднородности. Это приводит к формированию вторичного поля излучаемого неоднородностью во всех направлениях. Интенсивность этого поля будет определяться диаметром трубопровода, его свойствами и расстоянием между машиной и неоднородностью (см. рис. 3, 4). Вследствие огибания акустической волной уже проложенного трубопровода фронт волновых ускорений при прохождении вблизи неоднородности разделяется на два, которые распространяются независимо друг от друга, после чего на определенном расстоянии за неоднородностью сходятся в один. Таким образом, над неоднородностью в виде металлического трубопровода образуется локальный минимум акустического поля.

Выводы. Таким образом, с помощью численного и экспериментального исследований установлено, что по создаваемому работающей машиной акустическому полю можно локализовать ее местоположение: в однородном грунте – по максимальному значению этого поля; в массиве, содержащем трубопровод над сооружаемой скважиной – по локальному минимуму поля, расположенному над трубопроводом. При этом точность акустического метода будет определяться наличием в массиве неоднородностей естественного происхождения – твердых породных включений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисова Е.В., Конури А.И. Проблемы контроля движения пневмоударной машины в грунтовым массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд. Горная книга, 2013. – №3. – С. 279-284.
2. Баклашов И.В. Геомеханика. Том 1. – М.: Издательство МГГУ, 2004.
3. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005.

□ Авторы статьи

Денисова
Екатерина Вячеславовна,
канд.техн.наук, старший науч-
ный сотрудник Института горно-
го дела СО РАН,
e-mail: slimthing@mail.ru

Гаврилов
Сергей Юрьевич,
младший научный сотрудник
Института горного дела СО РАН,
телефон (383) 217-09-52

Конури
Антон Игоревич,
аспирант Института горного дела
СО РАН,
телефон (383) 217-09-52