

УДК 534.231

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА
ПНЕВМОУДАРНОЙ МАШИНЫ С ГРУНТОВЫМ МАССИВОМ**

Е. В. Денисова, А. И. Конури

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Построена геомеханическая модель взаимодействия рабочего органа пневмоударной машины с грунтовым массивом. Методом конечных элементов решена задача о напряженном состоянии массива при движении в нем пневмоударной машины с учетом вариации физико-механических свойств среды. Выполнена сравнительная оценка экспериментально измеренных и теоретически полученных относительных значений ускорений акустического поля в зависимости от ориентации машины в грунте.

Пневмоударная машина, грунтовый массив, геомеханическая модель, метод конечных элементов, физико-механические свойства, волновые свойства, эксперимент, разрешающая способность

Решение задачи навигации пневмоударной машины в грунтовом массиве акустическими методами основано на изучении параметров акустического поля, создаваемого ее движением. Параметры этого поля используются в основном для локации подводных объектов, поскольку для прохождения акустических волн вода является практически однородной и изотропной средой в отличие от грунтового массива.

В последние годы за рубежом стали осуществляться попытки создания акустических систем навигации ударных машин в грунтовом массиве, реализованных на основе спектрального анализа сигналов, излучаемых передающим устройством, расположенным на машине [1–3]. Например, в работе [1] акустический (либо электромагнитный) сигнал излучается с помощью зонда, а отраженный сигнал принимается блоком анализа. По характеристикам принятого сигнала судят о наличии неоднородностей в массиве и траектории сооружаемой скважины.

В ИГД СО РАН испытаны акустические устройства, основанные на анализе параметров сигнала (амплитуда, спектр, время задержки), создаваемого движением в грунтовом массиве пневмоударной машины [4–6]. Исследования показали возможность использования акустических методов при навигации пневмоударной машины не только в однородном грунтовом массиве, но и в массиве, содержащем искусственные неоднородности в виде, например, твердых породных включений или уже проложенных коммуникаций.

Научно-исследовательская работа проведена в рамках реализации ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009 – 2013 гг.

В работе [7] представлены результаты экспериментальных исследований возможности определения местоположения пневмопробойника ИП-4605 с энергией удара 100 Дж и частотой ударов 5.6 Гц, который запускался из приямка на глубине 1.5 м, по создаваемому им акустическому полю. В экспериментах два приемника были разнесены на расстояние 9 м друг от друга и размещены на равном удалении от пневмопробойника (15 м) с ориентацией на его переднюю часть. Установлено, что сигнал, принятый в стороне от оси движения машины, запаздывает относительно сигнала, принятого по оси, совпадающей с осью движения машины, на 0.005 с, что, предположительно, можно связать с углом отклонения машины от заданной траектории движения.

Достоинством использования параметров создаваемого машиной импульсного акустического сигнала большой мощности в качестве информации о ее местоположении является повышение надежности систем навигации для бестраншейных технологий прокладки подземных коммуникаций, а также исключение необходимости вмешательства в конструкцию самой машины. На точность работы такой системы будут оказывать влияние физико-механические свойства массива, близость прокладываемой скважины к дневной поверхности и расположенные рядом с ней естественные и искусственные неоднородности, а также диаграмма направленности приемного устройства.

Существующие аналитические решения по определению акустических полей в грунтовом массиве под действием импульсных нагрузок различного вида для упругого, однородного и изотропного полупространства (полученные на основе динамической теории упругости) позволяют рассмотреть основные закономерности распространения полей, оценить величину и характер ускорений, объяснить физику волновых процессов, происходящих в однородной среде в случае распространения в ней акустических волн. Однако полученные для задач динамики сплошных сред аналитические решения оказываются очень громоздкими и сложными для вычислений, что не позволяет использовать их для решения широкого класса реальных геомеханических задач. Кроме того, аналитические решения не позволяют учесть реальную структуру массива, сложный характер динамического воздействия от источника возмущений, начальные и граничные условия. Обычно такие задачи решаются численными методами.

Цель настоящих исследований — методами математического моделирования оценить характер влияния физико-механических свойств геосреды (плотность и модуль упругости) на особенности распределения в ней упругих волновых пакетов (ускорений), создаваемых при движении пневмоударной машины.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Исследования динамико-кинематических характеристик формирования упругих волновых полей (смещений, скоростей, ускорений) и их изменения в зависимости от вариации физико-механических свойств грунтовых массивов (плотность, модуль упругости) проводились с использованием метода конечных элементов [8, 9] в осесимметричной постановке (рис. 1).

Рассмотрен полубесконечный грунтовый массив, в который заглублена пневмоударная машина. Машина моделировалась в виде пустотелого трубчатого стержня (рис. 2) с толщиной стенки $h = 10$ мм, длиной $l = 550$ мм и диаметром $d = 50$ мм (эти геометрические характеристики соответствуют пневмоударнику “Тайфун-2”). В качестве элементарного механического воздействия ударника по наковальне пневмоударной машины, инициирующего ее движение, рассмотрен импульс треугольной формы.

Массив принят упругим, однородным и изотропным. 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). Границы рассчитываемой области приняты исходя из условия, что отсутствует влияние участка исследования (зоны ударного взаимодействия) на внешний контур расчетной области. Общий размер модели 5×5 м.

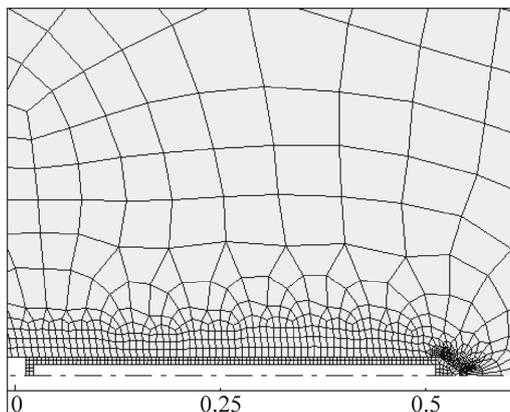


Рис. 1. Участок расчетной области осесимметричной модели в зоне взаимодействия рабочего органа пневмоударной машины с грунтовым массивом

Передняя часть машины моделировалась конусом с углом раскрытия при вершине $\alpha = 33^\circ$. Материал, из которого выполнена пневмоударная машина, считается упругим, однородным и изотропным (сталь, плотность $\rho = 7.8 \text{ г/см}^3$, модуль Юнга $E = 210 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0.27$).

Воздействие $\sigma(t)$ амплитудой A_{\max} и длительностью τ прикладывалось к переднему торцу внутреннего цилиндра пневмоударной машины (рис. 2б). Время приложения импульса τ равнялось времени воздействия ударника по наковальне машины. По экспериментальным данным оно составляет 100 мкс. Треугольная форма нагружающего импульса представлена выражением

$$\sigma(t) = \frac{A_{\max}}{\tau_1} t(\delta(t) - \delta(\tau_1 - t)) + \frac{A_{\max}(\tau_1 - t)}{\tau_3} (\delta(t - \tau_1) - \delta(\tau - t)),$$

где $\delta(t)$ — функция Хевисайда.

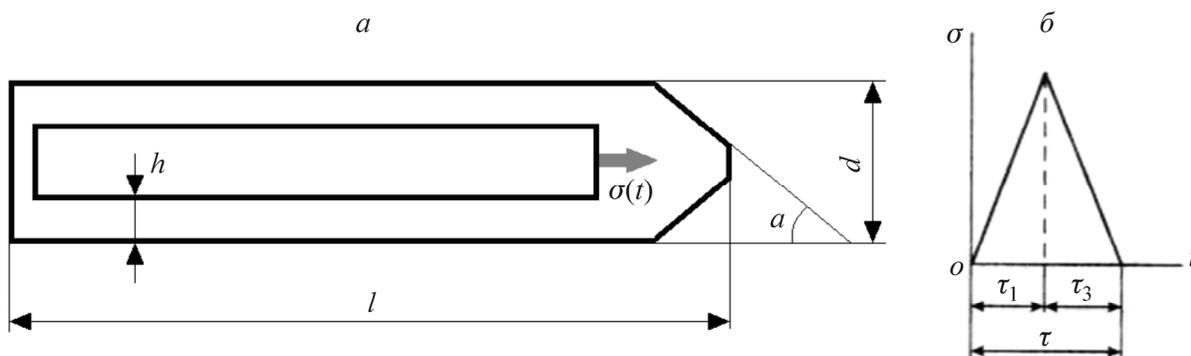


Рис. 2. Модель пневмоударной машины и ее действия на грунтовой массив: а — геометрическая модель; б — форма нагружающего импульса

Для описания взаимодействия корпуса пневмударной машины с грунтом использованы контактные элементы. 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 расчетов шаг дискретизации в области контактного взаимодействия уменьшался. При разбиении расчетной области на конечные элементы выполнялось условие наличия на каждой контактной поверхности более 24 конечных элементов [10].

Пневмударные машины обычно работают в уплотняемых грунтах, таких как супеси и суглинки. Модуль Юнга этих сред может меняться в достаточно широких пределах в зависимости от гранулометрического состава, плотности, влажности, пористости, наличия примесей и др. По известным данным экспериментов, значения модуля упругости изменяются от 0.5 МПа для рыхлых грунтов в естественном залегании, до 300 МПа для мерзлых и уплотненных грунтовых массивов [11, 12].

В связи с этим важно оценить влияние модуля Юнга и плотности среды на характер распределения в ней волновых ускорений при взаимодействии рабочего органа пневмударной машины с грунтовым массивом. Это позволит получить представление о характере распределения волнового поля, создаваемого движением машины в грунтовым массиве с различными свойствами, и использовать данные для оценки точности акустических устройств навигации при определении отклонения пневмопробойника от заданной траектории движения.

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

При решении задачи о распространении упругих колебаний вокруг движущейся на заданной глубине пневмударной машины рассматривался единичный удар, поскольку промежуток времени между импульсами (100–170 мс) значительно превышает длительность возникающих в грунте колебаний (10–20 мс) и последующие импульсы практически не оказывают влияния друг на друга.

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 узлов; (\dot{u}) — вектор скоростей узлов; (u) — вектор перемещений узлов; $(F(t))$ — вектор приложенного силового воздействия.

Система уравнений решалась методом прямого интегрирования Ньюмарка [13] с шагом интегрирования по времени 50 мкс.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При взаимодействии ударника и рабочего органа в корпусе пневмопробойной машины возникает упругая волна сжатия, распространяющаяся в сторону движения пневмударной машины, и волна растяжения, распространяющаяся в противоположном направлении. Возникающие в рабочем органе пневмударной машины волны многократно отражаются от границы раздела двух сред “металл–грунт”. Таким образом, излучение упругой волны в массив происходит в несколько этапов. Этот процесс теоретически описан и экспериментально подтвержден в [14]. На рис. 3 представлены результаты решения осесимметричной задачи для распределения амплитуды волновых ускорений через 1 мс после начала импульсного воздействия.

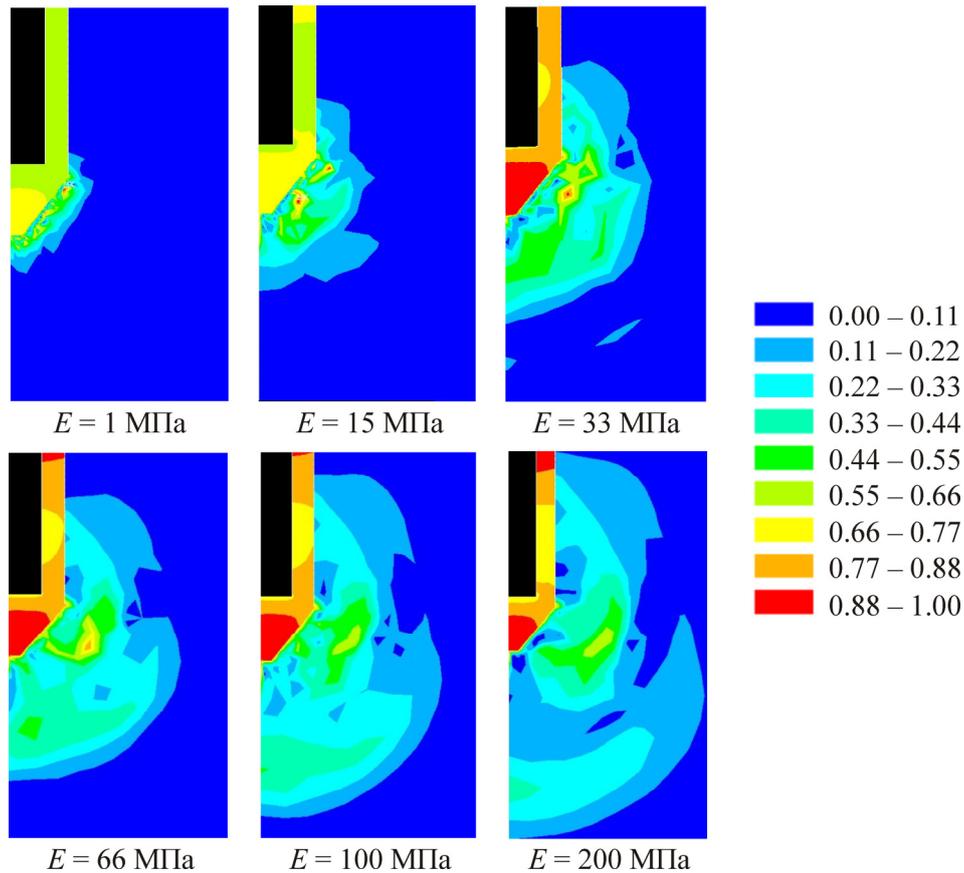


Рис. 3. Характер распределения относительных (по отношению к абсолютному максимуму) значений амплитуды волновых ускорений для исследуемой модели спустя 1 мс от начала импульсного воздействия при разных значениях модуля Юнга

Оценка амплитуды волновых ускорений на дневной поверхности проводилась следующим образом. Точки, в которых измерялись ускорения, расположены на поверхности над носовой частью машины перпендикулярно направлению ее движения на расстоянии от 0 до 0.8 м. Расстояние от носовой части машины до этих точек определяется глубиной ее запуска (0.25 м) и отклонением точки от линии, которая является проекцией направления движения машины на дневную поверхность. Значения ускорений на этом расстоянии, полученные из решения осесимметричной задачи, нормировались по отношению к максимуму амплитуд ускорений, зарегистрированному в системе. Полученные относительные амплитуды ускорений узловых точек грунтового массива приведены на рис. 4.

Данные математического моделирования показывают, что при уменьшении модуля Юнга грунтового массива (при неизменной плотности $\rho = 2 \text{ г/см}^3$) уменьшается зона деформаций массива. Это приводит к значительному снижению амплитуды акустического сигнала. Как следствие, можно наблюдать повышение разрешающей способности акустического метода по величине отклонения породоразрушающей машины от траектории движения (определяется как ширина диаграммы направленности над источником удара по уровню 0.7 от максимального значения), которая составляет 0.04 м при $E = 1 \text{ МПа}$ (для кривой 1 на рис. 4). В то же время для значения модуля Юнга $E = 200 \text{ МПа}$ разрешающая способность данного метода ухудшается в 13 раз (см. кривую 6 на рис. 4).

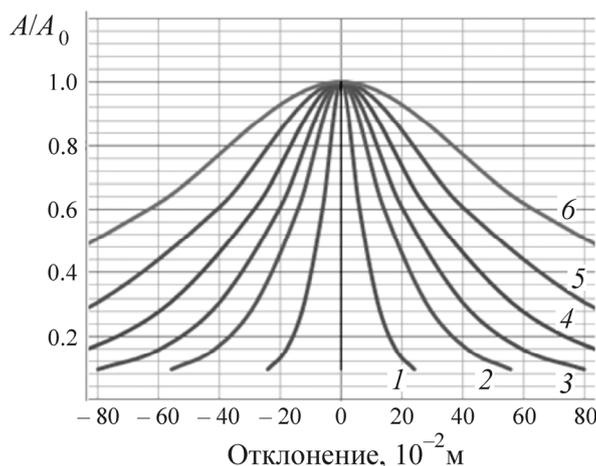


Рис. 4. Зависимость относительных значений амплитуды ударного импульса от величины отклонения машины от заданной траектории движения над источником удара при разных значениях модуля Юнга грунтового массива ($\rho = 2 \text{ г/см}^3$, $\mu = 0.4$): 1 — 1 МПа; 2 — 15; 3 — 33; 4 — 66; 5 — 100; 6 — 200 МПа

Плотность грунтов, в которых работают пневмоударные машины, также может изменяться в широком диапазоне от рыхлых супесей $\rho = 1.4 \text{ г/см}^3$ до тяжелых пылеватых суглинков с примесью щебня $\rho = 2.8 \text{ г/см}^3$ [15].

Анализ данных численного моделирования волновых процессов, возникающих при ударном взаимодействии машины с грунтовым массивом при разных значениях плотности грунтового массива и постоянном значении модуля Юнга ($E = 33 \text{ МПа}$), показал, что акустические волны в среде с большей плотностью распространяются в большей степени вдоль оси движения машины, в то время как в среде с меньшей плотностью они распространяются преимущественно вдоль оси, перпендикулярной движению породоразрушающего органа (рис. 5).

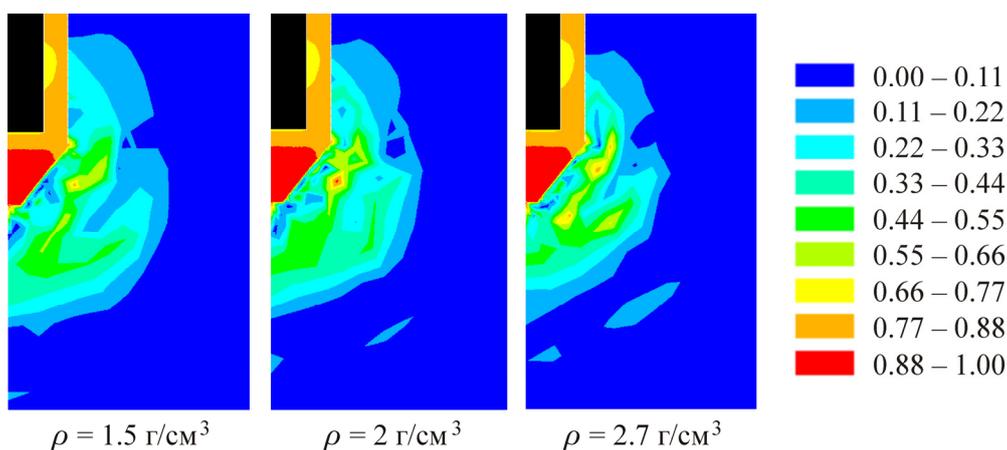


Рис. 5. Характер распределения относительных (по отношению к абсолютному максимуму) значений волновых ускорений спустя 1 мс от начала импульсного воздействия при разных значениях плотности грунта для грунтового массива

Как видно, концентрация акустической энергии вдоль оси движения машины в грунтах повышенной плотности приводит к уменьшению относительных значений амплитуды сигнала, создаваемого при ударном взаимодействии породоразрушающей машины и массива. При этом

разрешающая способность акустического метода по величине отклонения местоположения этой машины от заданной траектории составит 0.28 м при $\rho = 1.5 \text{ г/см}^3$ и 0.22 м при $\rho = 2.7 \text{ г/см}^3$ (рис. 6). В реальных грунтах диапазон изменения плотности среды много меньше, чем модуля Юнга, поэтому в существенно большей степени на точность определения местоположения породоразрушающей машины в массиве будут оказывать влияние его упругие свойства.

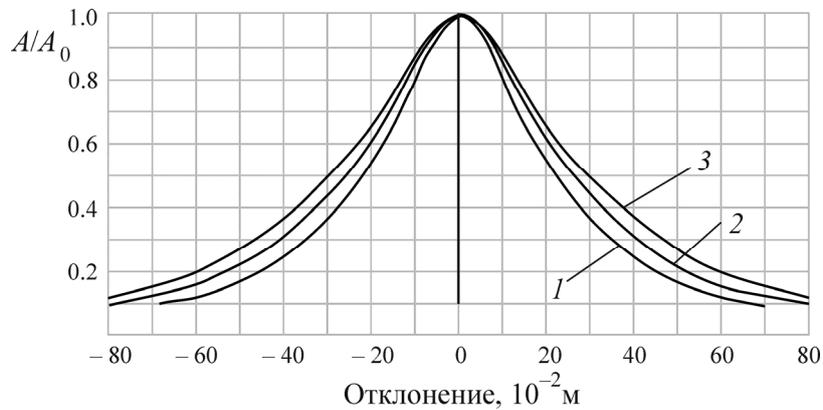


Рис. 6. Зависимость относительных значений амплитуды ударного импульса при отклонении машины от траектории движения над источником удара для разных значений плотности среды (1–3) ($E = 33 \text{ МПа}$, $\mu = 0.4$): 1 — 2.7 г/см^3 ; 2 — 2 г/см^3 ; 3 — 1.5 г/см^3

Полученные данные позволяют также оценивать физико-механические свойства грунтового массива по параметрам распространения в нем акустических волн, индуцированных движением породоразрушающей машины, сравнивая экспериментальное распределение амплитуды акустического поля с расчетным для различных сочетаний плотности и модуля упругости среды.

Были проведены экспериментальные исследования акустического поля, индуцированного движением в грунтовом массиве пневмоударной машины “Тайфун-2” [16]. Приемное устройство, состоящее из двух акселерометров, цифрового двухканального осциллографа и ноутбука, перемещалось по поверхности земли вдоль оси, перпендикулярной направлению движения машины. Измерения проводились над передней частью машины и на расстоянии 1 м перед ней в точках, соответствующих ее отклонению на 0, 0.2, 0.4, 0.6 и 0.8 м вправо от оси движения и в точках, соответствующих ее отклонению на 0, 0.2, 0.4, 0.6 и 0.8 м влево от оси движения.

Сопоставление экспериментальных зависимостей относительных значений амплитуд регистрируемого поля и величины отклонения породоразрушающей машины от заданной траектории ее движения с расчетными значениями (с учетом коэффициента преобразования акселерометра) позволило оценить механические параметры грунтового массива: принимая $\rho = 2 \text{ г/см}^3$, получили $E = 50 \text{ МПа}$, $\mu = 0.4$. Результаты численного моделирования единичного удара использованной в эксперименте пневмоударной машины сравнивались с экспериментальными данными (рис. 7). Возрастание экспериментально полученной амплитуды сигнала при отклонении машины на 0.2 м (на рис. 7 вправо) вызвано наличием в массиве неоднородности (в виде твердого породного включения), и проводить сравнение с данными моделирования необходимо при отклонениях машины влево, где грунтовой массив однородный.

Из рис. 7 следует, что увеличение расстояния между приемным устройством и местом нанесения ударного воздействия приводит к снижению разрешающей способности акустической системы определения величины отклонения породоразрушающей машины от заданной траектории ее движения (по уровню 0.7 от максимального значения амплитуды акустического сиг-

нала). Так, при акустических измерениях над местом нанесения ударного воздействия на глубине 0.25 м разрешающая способность по данным математического моделирования составила 0.16 м, а при измерениях на расстоянии 1 м от места удара — 0.2 м, для глубины 0.5 м — 0.32 м и 0.4 м соответственно.

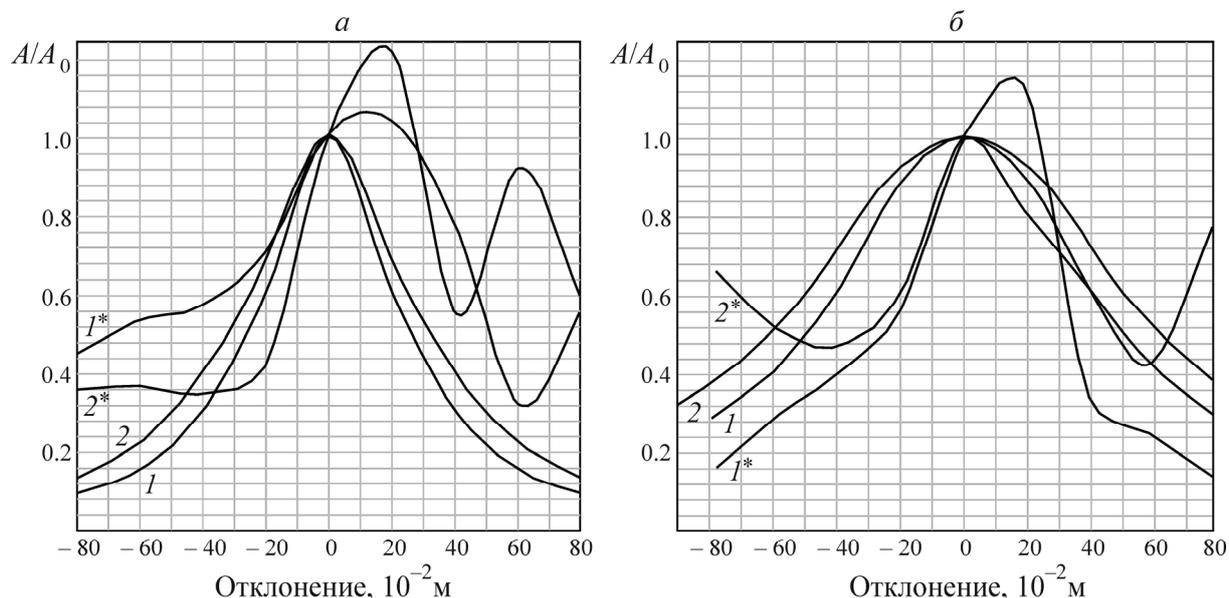


Рис. 7. Относительные значения амплитуды сигнала, создаваемого движением пневмопробойника “Тайфун-2” в грунте: *a* — глубина запуска машины 0.25 м; *б* — глубина запуска машины 0.5 м; *I** — измерения над местом удара; *2** — измерения на расстоянии ~ 1 м от места удара; *I* и *2* — результаты моделирования соответственно

ВЫВОДЫ

Проведено геомеханическое моделирование взаимодействия рабочего органа пневмоударной машины с грунтовым массивом. С помощью моделирования установлено, что упругие свойства грунтового массива оказывают существенное влияние на точность акустических методов навигации местоположения пневмоударной машины в грунте.

Результаты численного моделирования волновых ускорений массива при движении в нем пневмоударной машины показали приемлемую сходимость с данными натурального эксперимента, что может свидетельствовать о правомерности и перспективности применения предложенной модели для оценки разрешающей способности акустических методов навигации пневмоударной машины по величине ее отклонения от заданной траектории движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. 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.

4. **Опарин В. Н., Денисова Е. В., Конурин А. И.** Результаты испытаний акустических систем контроля местоположения пневмоударной машины в грунтовом массиве // ФТПРПИ. — 2012. — № 4.
5. **Патент** на полезную модель № 116573. Акустический обнаружитель горизонтального местоположения источника звука в грунте / В. Н. Опарин, Е. В. Денисова, С. Ю. Гаврилов, А. И. Конурин // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 15.
6. **Патент** на полезную модель № 118765. Измеритель координат излучателя импульсного акустического сигнала в среде / В. Н. Опарин, Е. В. Денисова, С. Ю. Гаврилов, А. И. Конурин, Н. С. Полотнянко // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 21.
7. **Трубицын В. В., Червов В. В.** Контроль движения пневмопробойника по колебаниям грунта // ФТПРПИ. — 1998. — №4.
8. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1976.
9. **Сегерлинд Л.** Применение метода конечных элементов. — М.: Мир, 1979.
10. **Ларин М., Кабанов Ю., Хитрых Д., Юрченко Д.** Использование программного комплекса ANSYS AUTODYN при расчете средств защиты на воздействие от взрыва и баллистического удара // ANSYS Advantage. Русская редакция. — М., 2009.
11. **Давыдов В. А., Бондарева Э. Д.** Изыскания и проектирование автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах: учеб. пособие. — Омск: ОмПИ, 1989.
12. **Васильев Ю. М.** Методические рекомендации по укреплению местных грунтов верхней части земляного полотна неорганическими вяжущими. — М.: СоюзДорНИИ, 1977.
13. **Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. П.** Вычислительные методы для инженеров. — М.: Высш. шк., 1994.
14. **Изотов А. С.** Математическое описание схемы ударного взаимодействия. / Сб. трудов междунар. конф. “Динамика и прочность горных машин”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2003.
15. **Горбунов-Посадов М. И., Ильичев В. А., Крутов В. И. и др.** Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. Е. А. Сорочана и Ю. Г. Трофименкова. — М.: Стройиздат, 1985.
16. **Денисова Е. В., Неверов А. А., Гаврилов С. Ю., Конурин А. И.** Геомеханическое обоснование результатов экспериментальных исследований параметров акустического поля, индуцированного движущейся в грунте пневмоударной машиной // Вестн. КузГТУ. — Кемерово. — 2011. — № 5.

Поступила в редакцию 1/VII 2013