

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 534.6.08

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**

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

Разработаны алгоритм обработки акустических данных и контрольно-измерительная аппаратура для определения пространственных координат пневмоударной машины, движущейся в грунтовом массиве. Используемый метод основан на регистрации времен задержки поступления акустического импульсного сигнала, создаваемого в процессе взаимодействия рабочего органа пневмоударной машины с грунтовым массивом, в приемники многоканальной измерительной системы относительно опорного сигнала с машины. Выполнена апробация алгоритма и разработанной измерительной системы в натуральных условиях.

Акустический метод, пространственные координаты, система контроля, акселерометр, скорость распространения акустического сигнала, грунтовый массив, пневмоударная машина

При бурении наклонно-горизонтальных скважин машинами ударного действия необходимо отслеживать искривление ствола создаваемой скважины и, следовательно, требуются системы контроля местоположения рабочих органов, позволяющие получать информацию в режиме реального времени. Повышенные издержки, связанные с необходимостью повторного бурения и затратами на замену вышедших из строя породоразрушающих инструментов, могут быть минимизированы применением управляемых рабочих органов с системой определения их координат.

Существующие зарубежные и отечественные контрольно-измерительные системы (например, Mark II-V, Eclipse, F5 и F2 фирмы Digital Control Inc.; SNS-100, 200 и 300 фирмы НПИ "Сенсе", г. Ульяновск), применяемые в системах горизонтально направленного бурения, определяют местоположение буровых рабочих органов с помощью установленных в них передающих антенн (зондов), сигналы от которых принимаются на поверхности земли приемником, позволяя вычислить искомые координаты [1–2]. Об особенностях и проблемах в работе электромагнитных зондов подробно изложено в [3]. С целью повышения помехоустойчивости к внешним электромагнитным помехам применяют многочастотные системы [4].

В последние годы подобные устройства для целей горизонтального направленного бурения стали разрабатывать и с использованием акустического передатчика, также расположенного в рабочем органе машины, при этом оценивают изменение параметров импульсного акустического

сигнала на поверхности земли [5, 6]. Однако применение данных систем в установках ударно-вращательного бурения весьма ограничено, поскольку передающие системы подвержены значительным ударным перегрузкам, что приводит к их быстрому выходу из строя. Более рациональным представляется применение непосредственно создаваемых пневмоударной машиной акустических импульсных сигналов, регистрируемых на поверхности земли. Это позволило бы устанавливать местоположение бурового рабочего органа (а следовательно, и забоя проходимой скважины) при отсутствии вмешательства в его конструкцию, а также исключить проблемы, связанные с необходимостью обеспечения бесперебойного электропитания передающих систем, размещаемых на рабочем органе машины, при проходке протяженных подземных переходов [7].

Воздействие на грунтовый массив пневмоударной машины порождает импульсные акустические сигналы сравнительно большой мощности и одинаковой скважности. Такое воздействие схоже, в известной мере, с возникновением в массиве естественных динамических событий как, например, горный удар. В связи с этим представленный акустический метод определения пространственных координат источника импульсного акустического сигнала основан на методе, широко применяемом при реализации систем геомеханического контроля [8].

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ПНЕВМОУДАРНОЙ МАШИНЫ, ДВИЖУЩЕЙСЯ В ГРУНТОВОМ МАССИВЕ, И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Сущность предлагаемого алгоритма заключается в определении времени вступления акустического сигнала, создаваемого рабочим органом пневмоударной машины в процессе ее движения в грунтовом массиве, в приемные каналы измерительной системы относительно опорного сигнала, поступающего непосредственно с машины. Координаты источника акустического сигнала вычисляются путем решения соответствующей системы уравнений для запаздывания сигналов в приемных каналах относительно опорного.

Обычно точность существующих систем геомеханического контроля динамических событий (десятки метров) не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к точности определения координат породоразрушающей машины в массиве (единицы сантиметров). Это обусловлено способом распределенного построения систем геомеханического контроля [9], состоящих из нескольких каналов, разнесенных в пространстве и объединенных между собой интерфейсом связи. При распространении акустической волны от источника до акустоэлектрических датчиков преобразователь, до которого волна дошла первой, посылает по интерфейсу связи другим преобразователям команду на запуск измерения времен задержки прихода акустической волны. Из-за временной задержки, возникающей между моментом прихода акустического сигнала на первый сработавший преобразователь и моментом запуска других датчиков для измерения времен задержки прихода на них указанного сигнала, появляется погрешность измерения, в результате которой не удается достичь необходимой точности измерительной системы в целом.

В разработанной авторами многоканальной акустической измерительной системе (далее МАИС) (рис. 1а) обработка информации с выхода акустоэлектрических преобразователей объединена в одном устройстве [10]. Это позволяет избежать возникновения временных задержек, появляющихся при отправке управляющей команды на измерение времен задержки прихода акустического сигнала по проводному интерфейсу от одного приемного канала к другим, что обеспечивает более высокую точность работы измерительной системы. Точность работы системы можно повысить и за счет использования акустического сигнала непосредственно с пневмоударной машины в качестве задающего для последующего вычисления времен задержки поступления акустических сигналов на поверхность земли, что невозможно конструктивно осуществить в системах геомеханического контроля естественных динамических событий.

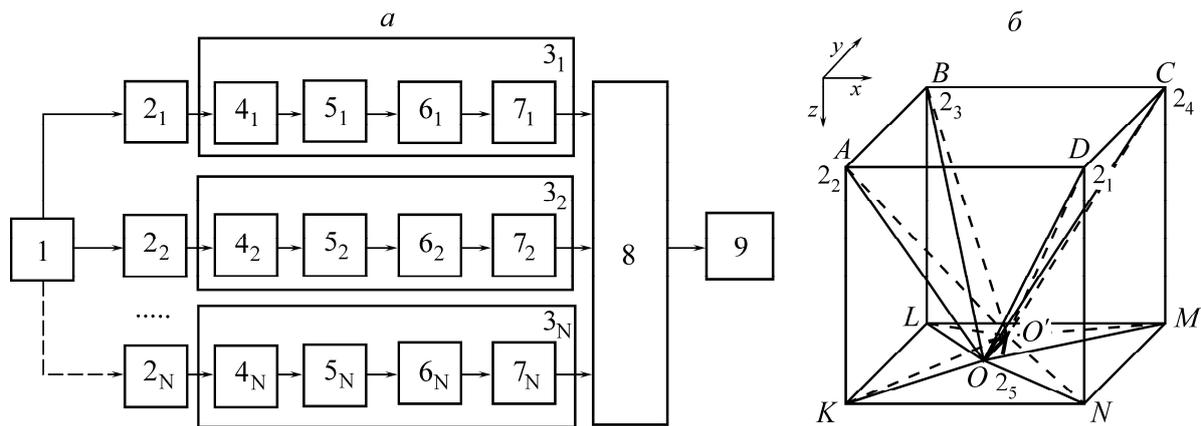


Рис. 1. Структурная схема МАИС для определения пространственных координат машины ударного действия (а) и схема ее взаимодействия с акустоэлектрическими преобразователями (б): 1 — машина; $2_1 - 2_N$ — акустоэлектрические преобразователи; $3_1 - 3_N$ — блоки обработки импульсного акустического сигнала; $4_1 - 4_N$ — усилители; $5_1 - 5_N$ — фильтр нижних частот; $6_1 - 6_N$ — аналого-цифровой преобразователь; $7_1 - 7_N$ — цифровой фильтр; 8 — блок вычисления пространственных координат; 9 — устройство отображения информации

Структурная схема МАИС (рис. 1а), принцип работы которой основан на использовании акустического метода, состоит из излучателя 1 импульсного акустического сигнала (далее излучатель 1), N акустоэлектрических преобразователей $2_1 \dots 2_N$, N блоков $3_1 \dots 3_N$ обработки импульсного акустического сигнала, каждый из которых содержит один из усилителей $4_1 \dots 4_N$ напряжения, один из фильтров $5_1 \dots 5_N$ нижних частот, один из аналого-цифровых преобразователей $6_1 \dots 6_N$ и один из цифровых фильтров $7_1 \dots 7_N$ нижних частот, блока 8 вычисления пространственных координат работающей машины, блока 9 отображения информации.

Количество N акустоэлектрических преобразователей $2_1 \dots 2_N$ равно количеству блоков $3_1 \dots 3_N$ обработки импульсного акустического сигнала и должно быть не менее четырех, так как один акустоэлектрический преобразователь, на который сигнал с излучателя 1 приходит первым, используется как опорный, т. е. определяющий время начала отсчета, а остальные акустоэлектрические преобразователи используются для измерения $N - 1$ времен запаздывания импульсного акустического сигнала относительно времени начала отсчета и для последующего вычисления усредненных значений трех координат блоком 8 вычисления пространственных координат. В качестве излучателя 1 используется работающая пневмоударная машина, с которой соединен вход одного акустоэлектрического преобразователя.

Использование более четырех акустоэлектрических преобразователей $2_1 \dots 2_N$ позволяет повысить точность МАИС за счет сбора дополнительных данных и вычисления усредненных значений скорости V распространения акустического сигнала в грунте и трех координат машины.

Работа устройства для пяти акустоэлектрических преобразователей $2_1 \dots 2_5$ осуществляется следующим образом. Акустоэлектрические преобразователи $2_1 \dots 2_4$ устанавливаются на поверхности грунта в вершинах воображаемого прямоугольника $ABCD$ (рис. 1б) следующим образом: акустоэлектрический преобразователь 2_2 в точке A , акустоэлектрический преобразователь 2_3 в точке B , акустоэлектрический преобразователь 2_4 в точке C , а акустоэлектрический преобразователь 2_1 в точке D . Акустоэлектрический преобразователь 2_5 устанавливается на самом излучателе 1 в точке O .

Перед началом работы производят калибровку устройства — измеряют скорость V распространения акустического сигнала в грунте. Зная исходные координаты машины, по временам t_A, t_B, t_C, t_D задержки прихода импульса в точки A, B, C, D для каждого из блоков $3_2 \dots 3_5$ обра-

ботки импульсного акустического сигнала в блоке 8 вычисления пространственных координат машины высчитывают четыре скорости V_A, V_B, V_C, V_D распространения акустического сигнала в грунтовом массиве, что позволяет учесть возможную неоднородность его свойств.

С целью предотвращения наложения спектров усиленных сигналов, подаваемых на вход аналого-цифровых преобразователей $б_1...б_5$, они должны быть пропущены через фильтры $5_1...5_5$ нижних частот для подавления спектральных компонент импульсного акустического сигнала, частота которых превышает половину частоты дискретизации. После фильтрации осуществляется оцифровка сигналов при помощи аналого-цифровых преобразователей $б_1...б_5$.

Далее посредством цифровых фильтров $7_1...7_5$ нижних частот из оцифрованных сигналов выделяют частоты, лежащие в полосе полезного сигнала, создаваемого движением машины в грунтовом массиве.

Полученные цифровые сигналы со всех блоков $3_1...3_5$ обработки импульсного акустического сигнала системы поступают на соответствующие входы блока 8 вычисления пространственных координат машины, которые далее отображаются для оператора системы при помощи блока 9 отображения информации.

Блок 8 вычисления пространственных координат машины работает по принципу определения времен задержки t_A, t_B, t_C, t_D поступления импульсного акустического сигнала от излучателя 1 до акустоэлектрических преобразователей $2_1...2_4$. При этом опорным сигналом будет сигнал от излучателя 1 (машины), снятый с акустоэлектрического преобразователя 2_5 . Далее определяют три координаты излучателя 1 в блоке 8 вычисления пространственных координат машины следующим образом. В качестве исходных данных используют расстояния между акустоэлектрическими преобразователями $2_1...2_4$: a — расстояние между акустоэлектрическими преобразователями 2_1 и 2_4 , которое равно расстоянию между акустоэлектрическими преобразователями 2_2 и 2_3 , $AB = CD$; b — расстояние между акустоэлектрическими преобразователями 2_2 и 2_1 , которое равно расстоянию между акустоэлектрическими преобразователями 2_3 и 2_4 , $AD = BC$; h — глубину запуска, равную расстоянию AK ; l — длину машины, начало ее координат принято в точке A ; t_0 — время прихода опорного сигнала на акустоэлектрический преобразователь 2_5 (для вычислений принимают равным 0); t_A, t_B, t_C, t_D — времена задержки распространения импульсного акустического сигнала до точек A, B, C, D соответственно относительно опорного сигнала.

При заглоблении рабочего органа машины в грунтовый массив на всю длину l координаты точки O , где формируется импульсный акустический сигнал, относительно начала координат на рис. 1б будут равны: $x = b/2, z = h, y = l$. Зная эти координаты, находят значения скоростей V_A, V_B, V_C, V_D распространения импульсного акустического сигнала до каждого акустоэлектрического преобразователя $2_1...2_4$ из системы уравнений:

$$\begin{cases} (OA)^2 = x^2 + y^2 + z^2, \\ (OB)^2 = x^2 + (a - y)^2 + z^2, \\ (OC)^2 = (b - x)^2 + (a - y)^2 + z^2, \\ (OD)^2 = (b - x)^2 + y^2 + z^2, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_A = OA/t_A, \\ V_B = OB/t_B, \\ V_C = OC/t_C, \\ V_D = OD/t_D. \end{cases} \quad (1)$$

После ударного воздействия излучателя 1 на грунтовый массив происходит перемещение точки O , где формируется импульсный акустический сигнал, в точку O' . По скоростям V_A, V_B, V_C, V_D распространения акустического сигнала в грунте и временам t_A, t_B, t_C, t_D вычисляют расстояния от точки O' до акустоэлектрических преобразователей $2_1...2_4$:

$$\begin{cases} O'A = V_A t_A, \\ O'B = V_B t_B, \\ O'C = V_C t_C, \\ O'D = V_D t_D, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (O'A)^2 = x^2 + y^2 + z^2, \\ (O'B)^2 = x^2 + (a - y)^2 + z^2, \\ (O'C)^2 = (b - x)^2 + (a - y)^2 + z^2, \\ (O'D)^2 = (b - x)^2 + y^2 + z^2. \end{cases} \begin{matrix} (2) \\ (3) \\ (4) \\ (5) \end{matrix}$$

Из каждых трех уравнений, например из (2), (3) и (4), последовательно вычисляют три координаты машины:

$$\begin{cases} x = \frac{(OA)^2 - (OD)^2 + b^2}{2b}, \\ y = \frac{(OA)^2 - (OB)^2 + a^2}{2a}, \\ z = \sqrt{(OA)^2 - y^2 - x^2}. \end{cases} \quad (6)$$

Аналогичным образом проводят вычисления и для систем уравнений (2), (3), (5); (3)–(5); (2), (4), (5). В итоге получают 4 набора координат $(x_1, y_1, z_1) \dots (x_4, y_4, z_4)$, по которым определяют их средние арифметические значения:

$$\begin{cases} x = \frac{x_1 + \dots + x_4}{4}, \\ y = \frac{y_1 + \dots + y_4}{4}, \\ z = \frac{z_1 + \dots + z_4}{4}. \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, в блоке 9 отображения информации получают данные о пространственных координатах машины в режиме реального времени.

Вычисление времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки распространения импульсного акустического сигнала до акустоэлектрических преобразователей $2_1 \dots 2_{N-1}$ может производиться несколькими методами.

(1) *Вычисление времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки распространения акустического сигнала по началу прихода импульса.* В этом случае сигнал с машины используют как опорный и вычисляют значения времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки между моментом времени, когда уровень абсолютного значения опорного сигнала превысил пороговое значение, и моментом времени, когда уровень абсолютного значения сигнала соответствующего акустоэлектрического преобразователя $2_1 \dots 2_{N-1}$ превысил пороговое значение [11]. Недостатки такого метода заключаются в низкой точности определения времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки из-за высокого уровня шума в полосе полезного сигнала и, как следствие, требуется большее пороговое значение. Но при этом данный метод работает даже при сильных искажениях сигнала, обусловленных возможным присутствием в ней механических неоднородностей.

(2) *Вычисление времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки распространения импульсного акустического сигнала по уровню $0.7U_{\max}$, где U_{\max} — его амплитудное значение.* В этом случае вычисляют значения времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки между моментом времени, когда уровень абсолютного значения опорного сигнала принимает значение $0.7U_{\max}$, и моментом времени, когда уровень сигнала соответствующего акустоэлектрического преобразователя $2_1 \dots 2_{N-1}$ принимает то же значение $0.7U_{\max}$. На точность данного метода оказывает влияние искажение формы сигнала вследствие дисперсии скоростей распространения упругих волн в геосреде либо наличие в по-

следней различного типа неоднородностей, что в свою очередь приводит к ошибкам вычисления времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки. Точность по сравнению с первым методом вычисления времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки распространения импульсного акустического сигнала повышается за счет снижения вероятности работы устройства в полосе шумов.

(3) *Вычисление времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки распространения импульсного акустического сигнала по сдвигу максимума функции взаимной корреляции сигналов.* Вычисляют функции взаимной корреляции между опорным сигналом и сигналами от других акустоэлектрических преобразователей $2_1 \dots 2_{N-1}$. После этого находят смещения максимумов функций взаимной корреляции (являющихся, по сути, автокорреляционными, так как сигналы во всех приемниках представляют собой один и тот же сигнал, пришедший с определенной задержкой) относительно нуля, что будет соответствовать значениям времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки поступления соответствующих сигналов в акустоэлектрические преобразователи $2_1 \dots 2_4$ относительно опорного сигнала [12]. На точность этого метода влияют искажения формы сигнала вследствие дисперсии скоростей распространения упругих волн в геосреде либо наличие в ней возможных неоднородностей, которые приводят к ошибкам вычисления указанных времен задержки. Данный метод обеспечивает наибольшую точность определения времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки, однако требование обеспечения минимальных искажений формы обрабатываемых сигналов ограничивает его применимость.

Поскольку обработка сигнала ведется в цифровом виде, возможно использование одновременно нескольких методов вычисления времен t_A, t_B, t_C, t_D задержки распространения импульсного акустического сигнала, что в целом позволит повысить точность определения пространственных координат работающей машины ударного действия.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Апробация алгоритма выполнена на примере проходки горизонтальных скважин пневмоударной машиной “Тайфун-2” в грунтовом массиве на полигоне ИГД СО РАН “Зеленая горка”. В качестве акустоэлектрических преобразователей использовались акселерометры KD29, на выходе которых обработка информации осуществлялась с помощью многоканального комплекса анализа акустических сигналов PULSE. Пространственные координаты машины, вычисленные с помощью предложенного алгоритма, удовлетворительно сошлись с реальными значениями, что отражено в работе [13]. При обработке экспериментальных данных использовался второй из предложенных выше методов, так как первый показал низкую точность, а успешное применение третьего обеспечивается при минимальных искажениях формы принимаемого сигнала, что не удалось реализовать в реальных условиях.

Схема испытаний и фотография макетного образца МАИС представлены на рис. 2. Расстояние между измерительными акселерометрами 1–2, 1–4, 2–3 и 3–4 составляло 1 м, глубина запуска машины – 0.65 м. На данном этапе разработки МАИС для вычисления координат пневмоударной машины использовался персональный компьютер с программным обеспечением Microsoft Office, пакет Excel, в котором происходило восстановление формы принятых импульсных акустических сигналов с выхода каждого канала системы одновременно. Далее в этой же программе вычислялись времена задержки поступления акустических сигналов в приемники на поверхности земли относительно опорного акустического сигнала, формируемого непосредственно на пневмоударной машине. Результаты выполненных вычислений приведены в табл. 1.

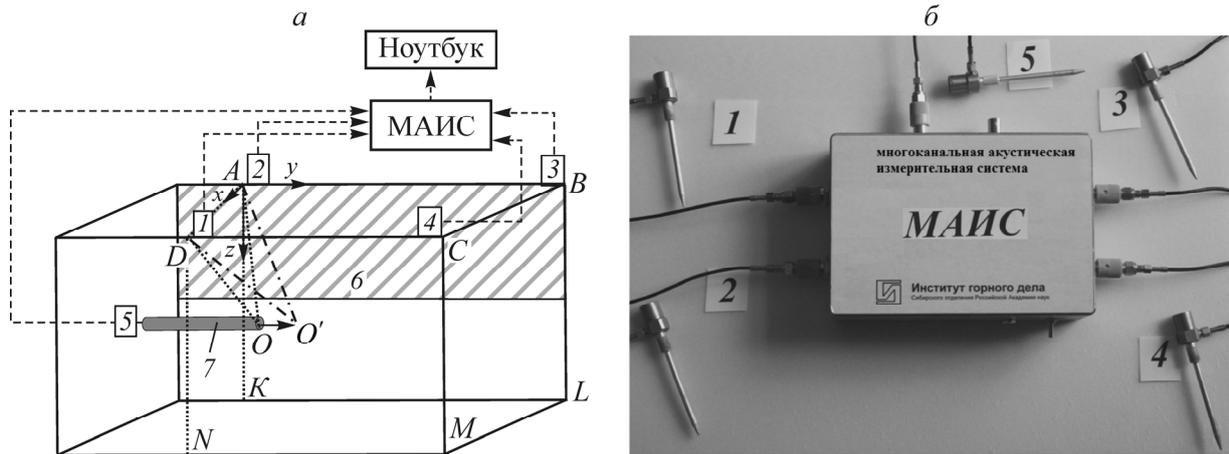


Рис. 2. Схема проведения натурального эксперимента (а) и фотография макетного образца измерительного комплекса МАИС (б): 1–5 — измерительные акселерометры KD29; 6 — фундамент здания на расстоянии 2 м от акселерометров 2, 3; 7 — пневмоударная машина “Тайфун-2”

ТАБЛИЦА 1. Время задержки поступления акустического сигнала, создаваемого движущейся в грунте пневмоударной машиной, в приемники МАИС относительно опорного сигнала непосредственно с машины

Отклонение машины от заданной траектории движения (координаты x, y, z), м	Обозначение времени задержки	Время задержки, мс
0.00 (0.50; 0.25; 0.65)	t_D	2.7803
	t_C	5.3423
	t_A	2.3813
	t_B	4.8593
0.05 влево (0.45; 0.25; 0.65)	t_D	2.5682
	t_C	5.3192
	t_A	2.3687
	t_B	4.8677
0.1 влево (0.4; 0.25; 0.65)	t_D	2.8448
	t_C	5.5313
	t_A	2.3813
	t_B	4.8383
0.15 влево (0.35; 0.25; 0.65)	t_D	2.0344
	t_C	4.4704
	t_A	1.0474
	t_B	3.7774
0.05 вправо (0.55; 0.25; 0.65)	t_D	2.3246
	t_C	5.5271
	t_A	2.2931
	t_B	4.5086
0.1 вправо (0.6; 0.25; 0.65)	t_D	2.1230
	t_C	5.4725
	t_A	2.9735
	t_B	5.3675
0.15 вправо (0.65; 0.25; 0.65)	t_D	2.1923
	t_C	5.3633
	t_A	3.2633
	t_B	5.0693

При этом имитация отклонения пневмоударной машины влево и вправо от заданной траектории движения осуществлялась перемещением акустоэлектрических преобразователей 1–4 вправо и влево соответственно (пояснения даны на рис. 3).

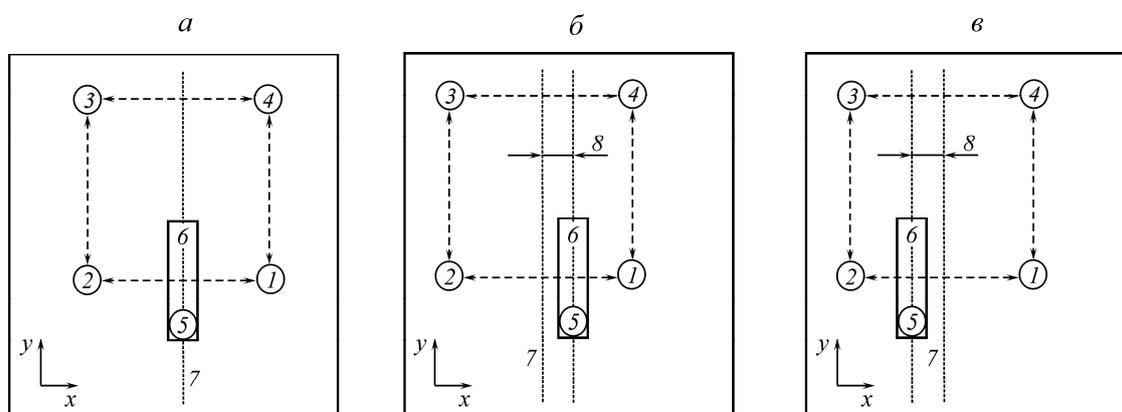


Рис. 3. Имитация отклонения пневмоударной машины от заданной траектории движения: а — машина движется по заданной траектории; б — машина отклонилась вправо от траектории движения; в — машина отклонилась влево от траектории движения. 1–5 — измерительные акселерометры KD29; 6 — пневмоударная машина “Тайфун-2”; 7 — траектория движения; 8 — отклонение машины от траектории движения

В работе [13] исследования по определению времен задержки поступления акустического сигнала в расположенные на поверхности земли приемники многоканального комплекса PULSE относительно опорного акустического сигнала с самой машины показали, что при отклонении машины от заданной траектории движения на 0.2 м точность предложенного алгоритма определения пространственных координат снижается по сравнению с точностью при отклонении машины на 0.1 м. Поэтому испытания МАИС выполнялись при отклонении машины от заданной траектории движения до 0.15 м влево и вправо.

Результаты рассчитанных скоростей распространения акустического сигнала в грунтовом массиве по формуле (1), м/с: V_A — 302, V_B — 360, V_C — 233, V_D — 302. По результатам натуральных измерений скорости распространения акустического импульсного сигнала, создаваемого машиной “Тайфун-2” в реальном грунтовом массиве, можно сделать вывод, что на ее значение оказывает существенное влияние расстояние от источника (машины) до приемника (акселерометра) и степень неоднородности массива, а также протяженные объекты, расположенные вблизи места проходки скважины (например, фундамент или отмостка здания). Грунтовый массив, в котором выполнялись экспериментальные исследования, имел слоистую структуру: верхний слой (0.1–0.2 м) состоял из грунта с твердыми породными включениями из фракций размерами от 0.02 до 0.04 м; ниже до глубины 1 м располагался суглинок с влажностью не более 5 % с содержанием строительного мусора в виде обломков металлической арматуры, электрических кабелей, кирпичей и т. п. На расстоянии 2 м параллельно траектории проходки скважины находится фундамент здания (на рис. 2, а отмечен цифрой б).

В табл. 2 приведены пространственные координаты машины, вычисленные по формуле (6), на основе данных табл. 1.

В табл. 3 представлены результаты вычисления погрешностей определения пространственных координат пневмоударной машины, движущейся в грунтовом массиве, полученные с помощью МАИС.

ТАБЛИЦА 2. Расчетные значения пространственных координат пневмоударной машины, м

Отклонение машины от заданной траектории движения	Реальные значения координат машины			Расчетные значения координат машины при обработке сигнала по уровню $0.7U_{\max}$		
	x	y	z	x	y	z
0.05 влево	0.45	0.25	0.65	0.504	0.231	0.61
0.10 »	0.40	0.25	0.65	0.443	0.248	0.66
0.15 »	0.35	0.25	0.65	0.364	0.267	0.67
0.05 вправо	0.55	0.25	0.65	0.479	0.183	0.475
0.10 »	0.60	0.25	0.65	0.734	0.165	0.602
0.15 »	0.65	0.25	0.65	0.782	0.262	0.569

ТАБЛИЦА 3. Погрешности определения пространственных координат пневмоударной машины, м

Отклонение машины от заданной траектории движения	Реальные значения координат			Абсолютная погрешность (относительная погрешность, %)		
	x	y	z	x	y	z
0.05 влево	0.45	0.25	0.65	0.054 (12)	0.019 (7.6)	0.04 (6.15)
0.10 »	0.40	0.25	0.65	0.043 (10.75)	0.002 (0.8)	0.01 (1.54)
0.15 »	0.35	0.25	0.65	0.014 (4)	0.017 (6.8)	0.02 (3.08)
0.05 вправо	0.55	0.25	0.65	0.071 (12.91)	0.067 (26.8)	0.175 (26.92)
0.10 »	0.60	0.25	0.65	0.134 (22.33)	0.085 (34)	0.048 (7.39)
0.15 »	0.65	0.25	0.65	0.132 (20.31)	0.012 (4.8)	0.081 (12.46)

Анализ рассчитанных координат машины по вычисленным временам задержки акустического сигнала в грунтовом массиве (см. табл. 2) показал, что разработанная МАИС способна решать задачи определения пространственных координат пневмоударной машины, движущейся в грунтовом массиве. Погрешность вычисления координаты x составляет от 4 до 22.33 %, координаты y — от 0.8 до 34 %, а координаты z — от 1.54 до 26.92 %. Наибольшие погрешности определения пространственных координат машины (см. табл. 3) наблюдаются при ее отклонении вправо, где на расстоянии около 2 м от прокладываемой скважины находится бетонный фундамент и отмостка здания. Это связано с процессами преломления-отражения акустического сигнала на границе раздела двух сред [14], в данном случае “грунт – бетон”.

Таким образом, предложенный алгоритм определения пространственных координат источника акустического импульсного сигнала и разработанное на его основе техническое средство позволяют установить координаты пневмоударной машины с погрешностью от 1 до 12 % в грунтовом массиве, не содержащем на пути распространения акустических сигналов протяженных неоднородностей. Их наличие существенно снижает точность определения пространственных координат машины по предложенному алгоритму.

ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм и реализующее его техническое средство (МАИС), предназначенные для определения пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия, движущегося в грунтовом массиве, в основу которых положены принципы построения геомеханических систем контроля естественных динамических процессов в породном массиве. С помощью испытаний предложенных подходов в натуральных условиях определены пространственные координаты пневмоударной машины “Тайфун-2” в грунтовом массиве, содержащем механические включения естественного и техногенного происхождения. Наибольшее влияние

на работу разработанного технического средства оказал протяженный объект в виде бетонного фундамента и отмостки здания. Установлено, что наибольшая точность определения пространственных координат достигается при работе машины в относительно однородном грунтовом массиве и примерно одинаковом расстоянии между каждым акустоэлектрическим преобразователем и источником ударного воздействия на геосреду (машиной).

Авторы статьи благодарны сотрудникам лаборатории механизации горных работ (в особенности И. В. Тищенко) за предоставленную возможность проведения экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Опарин В. Н., Денисова Е. В.** Принципы построения радиочастотных систем навигации для бестраншейных технологий прокладки подземных коммуникаций / отв. ред. Б. Н. Смоляницкий, В. Н. Легкий. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011.
2. **Рыбаков А. П.** Основы бестраншейных технологий (теория и практика). — М.: ПрессБюро № 1, 2005.
3. **Наговицын А. Л.** Отказы электронных зондов для установок горизонтально направленного бурения: причины и следствия [Электронный ресурс]. — Режим доступа свободный: <http://gnb-electronics.ru/zagruzki> (дата обращения 07.04.2014).
4. **Тареева Е. А.** Инновационные разработки для проведения буровых работ методом горизонтального направленного бурения // Нефть. Газ. Новации. — Самара: ООО “Нефть. Газ. Новации”, 2013. — № 3.
5. **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.
6. **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.
7. **Наговицын А. Л.** Энергопотребление буровых зондов для ГНБ с батарейным питанием [Электронный ресурс]. — Режим доступа свободный: <http://gnb-electronics.ru/zagruzki> (дата обращения 07.04.2014).
8. **Вознесенский А. С.** Системы контроля геомеханических процессов: учеб. пособие. — М.: Изд-во МГГУ, 2002.
9. **Рассказов И. Ю.** Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. — М.: Горн. книга, 2008.
10. **Патент на полезную модель № 136589.** Измеритель координат работающей пневмоударной машины / Е. В. Денисова, В. Н. Опарин, А. П. Хмелинин, А. И. Конурин // Оpubл. в БИ. — 2013. — № 1.
11. **Вознесенский А. С.** Средства передачи и обработки измерительной информации. — М.: Изд-во МГГУ, 1999.
12. **Березин С. Я, Каратаев О. Г.** Корреляционные измерительные устройства в автоматике. — Л.: Энергия, 1976.
13. **Денисова Е. В., Тищенко И. В., Хмелинин А. П., Бадмаева Я. З.** О возможности контроля процесса разрушения породного массива буровой машиной по временам задержки создаваемого ею акустического сигнала // Вестн. КузГТУ. — 2013. — № 5.
14. **Бауков Ю. Н.** Горная геофизика. Геоконтроль неидеальных и неоднородных сред акустическими методами: учеб. пособие. — М.: Изд-во МГГУ, 1999. — Ч. 2.

Поступила в редакцию 16/IV 2014