

УДК 542.34

Ю.С. Крюков

*Научно-исследовательский институт прикладной акустики;
ул. 9 Мая, д. 7А, г. Дубна Московской области; kryukov@niipa.ru*

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ
ВЗРЫВНЫХ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В
УСЛОВИЯХ ВЕТРОВЫХ ПОМЕХ**

Получена 29 января 2010 года

Опубликована 3 февраля 2010 года

01.04.06 – акустика

В работе предложен метод определения пространственных координат взрывных источников акустического сигнала в условиях ветровых помех. Применена модель распространения сигнала от взрывного источника в виде бегущей волны, скорость фронта которой изменяется в зависимости от дальности до источника. Метод устойчив к влиянию ветровых помех и изменяющихся метеорологических параметров среды. Приведены примеры определения координат взрывных источников данным методом в реальных полевых условиях.

Ключевые слова: акустический сигнал, взрывной источник, бегущая волна, пространственные координаты, высокая точность.

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения координат срабатывания акустических источников рассматривалась в разные годы многими авторами [1–4], однако является весьма актуальной и в настоящее время. Для локализации местоположения акустических источников используются методы, основанные на принципах звукометрии, сформулированных в 1909 г. Н.А. Бенуа [1]. В основе этих методов лежит определение моментов времени прихода сигналов на пространственно-разнесенные приемники давления [1, 2]. При этом

считается, что скорость распространения сигналов является постоянной и равной локальной скорости звука в воздушной среде c_0 .

Однако такой подход приводит к значительным ошибкам в оценке координат взрывных источников. При распространении сигнала от взрывного источника скорость его фронта не является постоянной, она уменьшается с расстоянием от источника и асимптотически стремится к локальной скорости звука в среде [5, 6].

Кроме того, наличие ветра также существенно влияет на распространение импульсного сигнала: при попутном ветре форма импульса сохраняется на более длительном расстоянии от источника, в отличие от случая встречного ветра, когда быстрее происходят диссипативные процессы и форма импульса изменяется. Неучёт влияния ветра со скоростью 10 м/с при оценке расстояний однонаправленным акустическим методом может приводить к ошибкам порядка $\pm 3\%$ [7].

Достаточно сильное влияние на форму импульса распространяющегося взрывного сигнала оказывает подстилающая поверхность земли, наличие растительности или снежного покрова [8, 9]. Поэтому точность определения координат при применении данного подхода во многом зависит от того, насколько применяемые алгоритмы обработки сигналов адаптированы к изменяющимся условиям воздушной среды и типам источников акустических сигналов.

Так, например, для оценки местоположения выстрелов от огнестрельного оружия акустическим методом (задача локализации выстрелов снайперов), используется информация от распространения двух типов волн: ударной волны от пролетающей пули и от дульной волны [2–4].

С увеличением расстояния от выстрела задержка времени прихода между ударной волной и дульной волной возрастает, поэтому данный фактор используется в алгоритмах обнаружения. Однако весьма непростой задачей является идентификация самих типов волн в реальной шумовой обстановке от группы источников сигнала. Тем более такой подход является абсолютно непригодным для оценки координат взрывных источников, при срабатывании которых распространяется только один тип волн.

В работе [10] для решения задачи оценки координат взрывных источников был предложен алгоритм, основанный на приёме акустического сигнала датчиками синхронно в трёх точках, расположенных вдоль осей декартовой системы координат и использовании средней скорости распространения волны от взрыва до точки установки центрального датчика. Средняя скорость распространения волны определялась с помощью оптического датчика [11], фиксирующего момент времени срабатывания источника.

В работе [12] помимо координат источника предложено рассматривать в качестве неизвестных параметров и компоненты ветрового потока, используя информацию с семи датчиков давления, разнесённых вдоль измерительной площадки на расстояния, сравнимые с дальностью до источника и оптического датчика. Однако данный метод трудно реализуем технически, требует высокой точности разметки точек установки измерительных датчиков, а расчётные соотношения не удаётся привести к простому виду, удобному для вычислений.

МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН И МЕТОД РАСЧЁТА

В настоящей работе для повышения точности оценки пространственных координат взрывных источников предложено использовать в качестве модели распространения волны от взрыва модель сферической бегущей волны в движущейся квазистационарной однородной среде.

Рассмотрим модель трёхмерной среды. На больших расстояниях от источника взрыва ударную волну можно рассматривать в виде модели сферической бегущей волны. Скорость распространения профиля бегущей волны имеет вид [5]:

$$c_p = c_0 + \frac{\gamma - 1}{2} u, \quad (1)$$

где c_0 – локальная скорость звука, γ – показатель адиабаты Пуассона; для политропного газа $\gamma = 1,4$; $u \sim u_0/R$ – скорость смещения частиц в волне, уменьшающаяся обратно пропорционально расстоянию R от источника; u_0 – начальное значение скорости.

Перепишем выражение (1) в следующем виде:

$$c_p = c_0 \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M(R) \right], \quad (2)$$

где обозначено $M(R) = u(R)/c_0$ – число Маха, характеризующее интенсивность бегущей волны. Заметим, что при $M(R) = 0$ бегущая волна становится обычной звуковой волной.

Полагаем, что сигналы от взрывного источника регистрируются датчиками давления в точках 1, 2, 3, 4, расположенных согласно рис. 1 на расстояниях R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , соответственно.

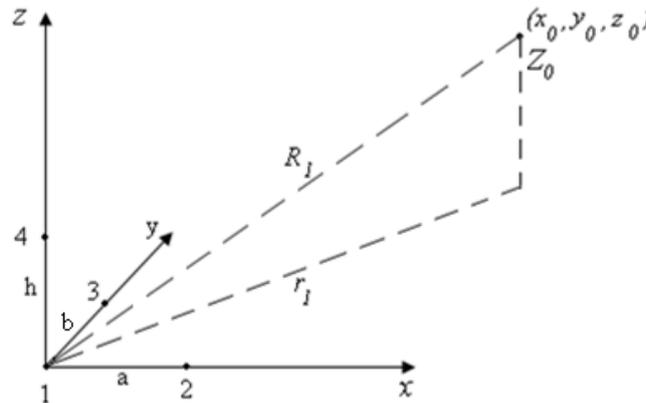


Рис. 1. Схема расположения датчиков в задаче оценки координат взрывных источников в случае трёхмерной модели среды. 1, 2, 3, 4 – точки установки датчиков давления в плоскости Oxyz

Обозначим значение числа Маха в точке 1 M_1 и, учитывая зависимость скорости u от расстояния, имеем соответственно:

$$M_2 = M_1 \frac{R_1}{R_2}; \quad M_3 = M_1 \frac{R_1}{R_3}; \quad M_4 = M_1 \frac{R_1}{R_4}.$$

В этом случае значения скоростей распространения взрывного сигнала в точках регистрации 1, 2, 3, 4 будут иметь следующий вид, соответственно:

$$c_1 = c_0(1 + M_1), \quad c_2 = c_0(1 + M_1 \frac{R_1}{R_2}), \quad c_3 = c_0(1 + M_1 \frac{R_1}{R_3}), \quad c_4 = c_0(1 + M_1 \frac{R_1}{R_4}). \quad (3)$$

Распространение взрывного сигнала в условиях ветра можно представить в виде модели распространения возмущения в стационарном потоке сжимаемого газа [5]. Распространение такого возмущения рассмотрим в системе координат, движущейся вместе с потоком ветра со скоростью \vec{V} .

Полагаем, что ветер является стационарным вертикально однородным потоком, направленным вдоль горизонтальной поверхности: $\vec{V} = (V_x, V_y, 0)$.

Тогда скорость распространения возмущения относительно неподвижной системы координат складывается из двух частей:

- 1) возмущение сносится потоком газа (ветра) со скоростью \vec{V} ;
- 2) возмущение распространяется относительно газа со скоростью c_p , заданной соотношением (2) в направлении расположения измерительных датчиков.

Примем за момент времени начала срабатывания взрывного источника момент возникновения вспышки от взрыва (t_0), фиксируемый оптическим датчиком, и положим, что $t_0 = 0$. Обозначим времена распространения сигнала от источника до точек приема 1, 2, 3, 4 соответственно t_1, t_2, t_3 и t_4 .

Пусть точки 2, 3, 4 расположены вдоль осей координат во взаимно перпендикулярных направлениях, согласно рис. 1 на расстояниях a, b, h соответственно от углового датчика 1.

Тогда исходная система уравнений, связывающих времена распространения возмущения от взрыва до точки приема с координатами точки подрыва, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} [c_0 \cdot (1 + M_1) \cdot t_1]^2 &= (x_0 + V_x \cdot t_1)^2 + (y_0 + V_y \cdot t_1)^2 + z_0^2, \\ [c_0 \cdot (1 + M_1) \cdot (\frac{R_1}{R_2})]^2 \cdot t_2^2 &= (x_0 - a + V_x \cdot t_2)^2 + (y_0 + V_y \cdot t_2)^2 + z_0^2, \\ [c_0 \cdot (1 + M_1) \cdot (\frac{R_1}{R_3})]^2 \cdot t_3^2 &= (x_0 + V_x \cdot t_3)^2 + (y_0 - b + V_y \cdot t_3)^2 + z_0^2, \\ [c_0 \cdot (1 + M_1) \cdot (\frac{R_1}{R_4}) t_4]^2 &= (x_0 + V_x \cdot t_4)^2 + (y_0 + V_y \cdot t_4)^2 + (z_0 - h)^2, \end{aligned} \tag{4}$$

где

$$\begin{aligned} R_1^2 &= x_0^2 + y_0^2 + z_0^2, R_2^2 = (x_0 - a)^2 + y_0^2 + z_0^2, R_3^2 = x_0^2 + (y_0 - b)^2 + z_0^2, \\ R_4^2 &= x_0^2 + y_0^2 + (z_0 - h)^2, V_x = -\vec{V} \cdot \text{Sin} \varphi, V_y = -\vec{V} \cdot \text{Cos} \varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

φ - угол направления ветра в градусах от Севера по часовой стрелке.

При этом выбрана правосторонняя локальная система координат OXYZ, а ось OY направлена на Север.

Локальная скорость звука c_0 , вычисляется по результатам измерения температуры воздуха в момент проведения эксперимента по формуле [13]: $c_0 = \sqrt{1,4 \cdot R \cdot (273,15 + T)}$, где T – температура в °С; $R = 287,14$ – газодинамическая постоянная.

Система уравнений (4) является нелинейной и, в общем случае, может быть решена численно, например, методом Ньютона [14]. Однако можно упростить эту систему уравнений без существенной потери точности оценки координат.

Рассмотрим особенности реальных физических процессов и преобразуем исходное уравнение к виду более удобному для получения решения в аналитическом виде.

Во-первых, измерения проводятся на достаточно больших расстояниях от точки подрыва, так что интенсивность волны от взрыва сильно снижается, поэтому полагаем, что $M = u/c_0 \ll 1$.

Во-вторых, межэлементные расстояния между измерительными датчиками много меньше расстояния до точки подрыва, поэтому имеем $a/R_1 \ll 1$, $b/R_1 \ll 1$, $h/R_1 \ll 1$.

В-третьих, скорость ветра \vec{V} много меньше локальной скорости звука:

$$\frac{|\vec{V}|}{c_0} \ll 1.$$

Учитывая эти условия и оценивая порядок отношений $(\frac{R_1}{R_2}) \sim 1$ и $(\frac{R_1}{R_3}) \sim 1$, воспользуемся разложением квадратичных членов в соотношениях (4) в ряд Тейлора относительно малой величины M_1 . Ограничиваясь членами первого порядка малости, также воспользовавшись при оценке порядка малых величин первым уравнением из системы (4) для случая $\vec{V} = 0$, преобразуем систему уравнений (4) к квадратичному уравнению следующего вида:

$$AR_1^2 + BR_1 + C = 0, \quad (6)$$

$$\text{где } A = \frac{(1-\frac{t_2}{t_1})^2}{4a^2} + \frac{(1-\frac{t_3}{t_1})^2}{4b^2} + \frac{1}{4h^2} \cdot F^2; \quad B = \frac{(1-\frac{t_2}{t_1})}{2a^2} + \frac{(1-\frac{t_3}{t_1})}{2b^2} + \frac{1}{2h^2} \cdot F \cdot G - 1;$$

$$C = \frac{N^2}{4a^2} + \frac{K^2}{4b^2} + \frac{1}{2h^2} \cdot G^2;$$

$$F = (1-\frac{t_4^2}{t_1^2}) + \frac{V_x \cdot t_4 \cdot (1-\frac{t_4}{t_1})}{a} \cdot (1-\frac{t_2}{t_1}) + \frac{V_y \cdot t_4 \cdot (1-\frac{t_4}{t_1})}{b} \cdot (1-\frac{t_3}{t_1});$$

$$G = h^2 + \frac{V_x \cdot t_4 \cdot (1-\frac{t_4}{t_1})}{a} \cdot N + \frac{V_y \cdot t_4 \cdot (1-\frac{t_4}{t_1})}{b} \cdot K.$$

Коэффициенты N и K являются функциями измеряемых времён распространения взрывного сигнала и метеорологических параметров среды:

$$N = a^2 + c_0^2 \cdot (t_1 \cdot t_2 - t_2^2) + \vec{V}^2 \cdot (t_1 \cdot t_2 - t_2^2) - 2a \cdot V_x \cdot t_2;$$

$$K = b^2 + c_0^2 \cdot (t_1 \cdot t_3 - t_3^2) + \vec{V}^2 \cdot (t_1 \cdot t_3 - t_3^2) - 2b \cdot V_y \cdot t_3.$$

Общее решение уравнения квадратичного уравнения (6) имеет следующий вид:

$$r_1^{\pm} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (7)$$

Выбирается один из корней выражения (7), исходя из физического смысла данного решения задачи, при параметрах \vec{V} , φ , T , измеренных в момент проведения взрыва.

Далее вычисляем значения M_1 , x_0 , y_0 и z_0 согласно следующим формулам:

$$M_1 = \frac{1}{2c_0^2 \cdot t_1^2} \cdot (R_1^2 + 2x_0 \cdot V_x \cdot t_1 + 2y_0 \cdot V_y \cdot t_1 + \vec{V}^2 \cdot t_1^2) - \frac{1}{2}; \quad (8)$$
$$x_0 = \frac{1}{2a} \cdot [R_1^2 \cdot (1 - \frac{t_2}{t_1}) + N]; \quad y_0 = \frac{1}{2b} \cdot [R_1^2 \cdot (1 - \frac{t_3}{t_1}) + K]; \quad z_0 = \frac{1}{2h} \cdot [R_1^2 \cdot F + G].$$

Значения координат могут быть определены с помощью одного измерительного блока. При наличии двух и более измерительных блоков, расположенных в разных точках площадки, оценка координат берётся как среднее арифметическое значение координат, полученное от каждого измерительного блока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Для проверки точности данного метода был проведен ряд опытов на измерительной площадке в полевых условиях летом 2007 года. Схема четырёх опытов приведена на рис. 2. Работы выполнялись при достаточно сильном порывистом восточном ветре при скорости 6.2-7.9 м/с. Проверялись алгоритмы оценки пространственных координат, адаптированные к влиянию

ветровых помех. Регистрация сигналов выполнялась двумя автономными измерительными блоками локальных контроллеров (БЛК) в едином масштабе времени в штатном режиме с частотой дискретизации сигналов 20 кГц.

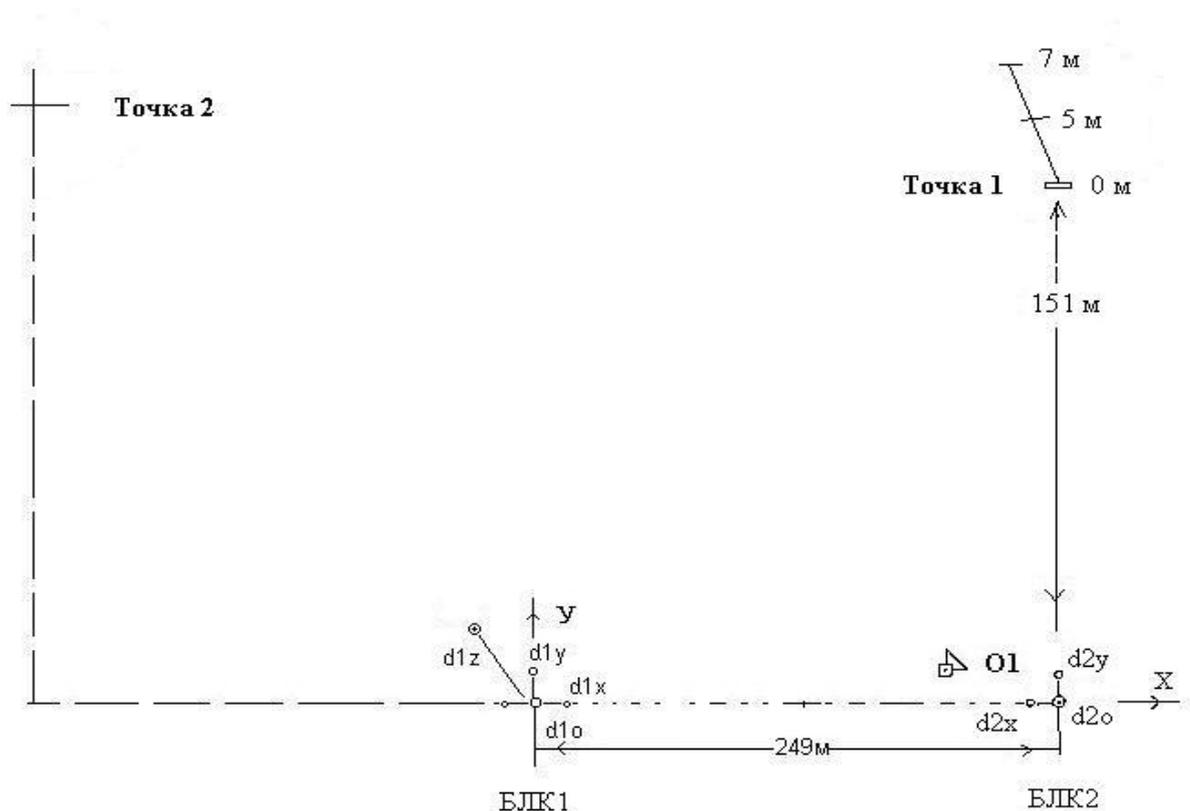


Рис. 2. Схема проведения опытов по проверке точности метода определения пространственных координат взрывных источников

Каждый БЛК позволяет регистрировать информацию от четырёх внешних информационных каналов, включая датчики давления и оптический датчик. К БЛК2 подключены оптический датчик и три датчика давления, что позволяет определять начальный момент времени срабатывания источника и его координаты на поверхности земли. К БЛК1 были подключены 4 датчика

давления, в том числе датчик, расположенный на высоте, что позволяет определять пространственные координаты срабатывания источника.

Объём работ в приводимых четырёх опытах включал в себя:

1) три опыта с подрывом конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) массой 400 г на высотах 0, 5 и 7 м соответственно в точке 1 на расстоянии 267.9 м от БЛК1 согласно рис. 2;

2) опыт с проведением одиночного подрыва конденсированного ВВ массой 1.2 кг в точке 2 на расстоянии 320.1 м от БЛК1.

Параметры расположения регистрирующей аппаратуры в данных опытах были следующие:

1) расстояния между измерительными датчиками на плоскости составляли 10 м;

2) высота расположения измерительного датчика по координате Oz составляла 7 м;

3) расстояния между БЛК1 и БЛК2 – 249 м;

4) метеорологические параметры среды контролировались в период выполнения измерений с помощью метеокомплекса АМК-03/1.

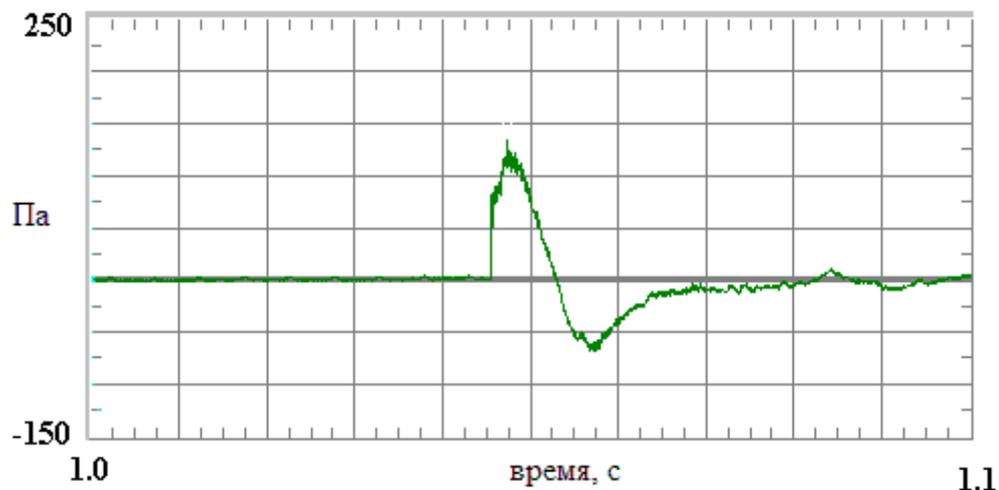
Обработка сигналов включала: предварительную фильтрацию в каждом из каналов БЛК, поиск времён прихода импульсов, определение момента времени срабатывания источника по оптическому датчику, вычисление времён распространения t_1 , t_2 , t_3 и t_4 , решение уравнения (6) и оценка координат по формулам (8).

На рис. 3 приведены осциллограммы сигналов, зарегистрированных центральными датчиками БЛК1 и БЛК2 соответственно на расстоянии 267,9 метров от источника при попутном боковом ветре (рис. 3а) и на расстоянии 151 метр от источника при встречном ветре (рис. 3б).

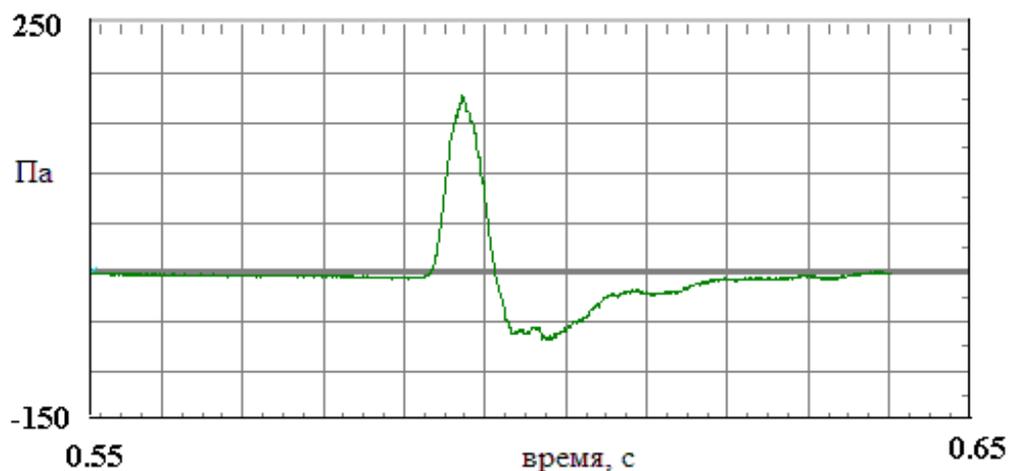
На рис. 3а форма импульса имеет резкий передний фронт, который сохраняется при попутном ветре вплоть до дальности 267,9 метра, а при встречном ветре передний фронт импульса размывается уже на расстоянии 151 метр от источника (рис. 3б).

Значения расчетных координат, полученных измерительными блоками БЛК1 и БЛК2 усреднялись.

Результаты измерений пространственных координат срабатывания импульсных источников и оценки погрешностей измерений в опытах №1-4 приведены в табл. 1.



а) Осциллограмма изменения относительного давления, зарегистрированного центральным датчиком БЛК1 на расстоянии 267,9 метра от взрывного источника массой 400 г (боковой попутный ветер).



б) Осциллограмма изменения относительного давления, зарегистрированного центральным датчиком БЛК2 на расстоянии 151 метр от взрывного источника массой 400 г (встречный ветер).

Рис.3. Формы импульсов сигналов взрывного источника при боковом попутном и встречном ветре силой 6,2 м/с

Таблица 1. Результаты измерений пространственных координат взрывных источников акустическим методом.

№ опыта, высота источника в м	Измерительный блок БЛК1, м			Измерительный блок БЛК2, м		Средние арифметические значения, м		Прямые измерения, м		σ_r/R_1	σ_h/R_1
	X_1	Y_1	Z_1	X_2	Y_2	X_{CP}	Y_{CP}	X_{II}	Y_{II}	%	%
Опыт 1, 5	-28.5	151.0	5.4	-29.5	150.1	-29.0	150.6	-28.8	150.6	0.10	0.15
Опыт 2, 7	-29.6	151.1	7.2	-28.4	149.1	-29.0	150.1	-28.8	150.6	0.19	0.10
Опыт 3, 0	-28.4	151.8	0.5	-29.8	149.6	-29.1	150.7	-28.8	150.6	0.11	0.19
Опыт 4, 0 (1.2 кг)	-459.7	379.1	-0.6	-461.6	386.7	-460.7	382.9	-460.8	382.3	0.22	0.22

Как следует из табл. 1, ошибки определения пространственных координат для первых трех опытов имеют значения $\sigma_r \leq 0,5$ и $\sigma_h \leq 0,5$, а для опыта 4, где расстояние до БЛК2 превышает 600 м, $\sigma_r = 0,6$ и $\sigma_h = 0,6$, что не превышает 0,22 % от дальности до источника.

Здесь $\sigma_r^i = \sqrt{(x_p^i - x_{II}^i)^2 + (y_p^i - y_{II}^i)^2}$ – среднее квадратичное отклонение проекций координат на поверхность Земли от измеренных значений; $\sigma_h^i = \sqrt{(z_p^i - z_{II}^i)^2}$ – среднее квадратичное отклонение высоты источника от измеренного значения; i – номер опыта; x_p^i, y_p^i – координаты i -го подрыва, рассчитанные по результатам измерений времён распространения импульсных сигналов; x_{II}^i, y_{II}^i – координаты, полученные по результатам прямых измерений.

Значения метеорологических параметров, при которых выполнялся расчет пространственных координат в опытах № 1–4, а также значения локальной скорости звука и параметра M_1 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения метеорологических параметров при расчете координат взрывных источников, локальной скорости звука и параметра M_1 .

<i>№ опыта, время проведения</i>	<i>Температура, °С</i>	<i>Скорость ветра V, м/с</i>	<i>Направление ветра φ, град. от с.ш.</i>	<i>Локальная скорость звука c₀, м/с</i>	<i>Значение параметра M₁ на центральном датчике БЛК1</i>
Опыт 1, 12-37	36.6	6.2	109	352.99	0.0236
Опыт 2, 12-45	35.9	7.3	115.2	352.47	0.0254
Опыт 3, 13-00	35.9	7.3	114.9	352.47	0.0257
Опыт 4, 13-27	37.1	7.9	90.6	353.16	0.0163

Другие опыты, проведённые в полевых условиях, подтвердили достаточно высокую точность описанного выше метода. Во всех опытах ошибки в определении пространственных координат составляли значения σ_r и σ_h меньшие 1 м, что не превышало 0,2- 0,3 % от дальности до источника.

Данный акустический метод локализации взрывных источников может быть использован в ряде прикладных задач для мониторинга в реальном масштабе времени проведения полевых испытаний с применением взрывных источников небольшой мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таланов А.В. Звуковая разведка артиллерии. М. : Воениздат, 1948. 400 с.
2. Sanctuary et al. Remote strafe scoring system. US Patent № 4.813.877, 1989.
3. Molliex F., Audige E., Donzier A., Montigny R. Sniper Detection systems field trials and lessons learned. METRAVIB RDS, 2000, Chemin des Ormeaux, F69760, France.
4. Duckworth et al. Acoustic counter-sniper system. US Patent № 6.178141 B1, 2001.
5. Ландау Л.В., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М. : Наука, 1982. 624 с.
6. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Химические и физические взрывы. Параметры и контроль. С.-Перербург : Полигон, 2003. 416 с.
7. Горбатов А.А., Рудашевский Г.Е. Акустические методы измерений расстояний и управления. М. : Энергоиздат, 1981. 207 с.
8. Attenborough K., Waters-Fuller T. Effective impedance of rough porous ground surface // J. Acoust. Soc. Am. 2000. V.103, N 3. Pt. 1, P. 949–956.
9. Albert D., Hole L. Blast noise propagation above a snow cover // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 109. N 6. P. 2675-2681.

10. Воробьев В.А., Крюков Ю.С., Щербаков А.А. Использование оптического датчика для оценки средней скорости распространения импульсного сигнала в задачах локализации взрывных источников. // Сб. трудов 14 сессии РАО. Т. 2. М. : ГЕОС, 2005. С. 13–16.
11. Адушкин В.В., Соловьев С.П. Генерация электрического и магнитного поля при воздушных, надземных и подземных взрывах // Физика горения и взрыва, 2004, т. 40, № 6. С. 42–51.
12. Ерёмин Г.И., Кондратьев В.А., Крюков Ю.С., Рябчун О.В. Акустический метод локализации взрывных источников в условиях стационарного движения воздушной среды. // Сб. трудов 14 сессии РАО, Т. 1. М. : ГЕОС, 2005. С. 192–194.
13. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М. : Мир, 1978. 89 с.
14. Бахвалов Н.С. Численные методы. М. : Наука, 1973. 631 с.