

УДК 622.235.535.2

## СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

А. А. ВОВК\*,  
А. А. КУЗЬМЕНКО\*\*

\* Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 20.10.2000 ◊ Пересмотрено 00.00.2000

Показана несостоятельность использования формулы сферического заряда для определения скорости смещения грунта, вызванной взрывом цилиндрического заряда. Приведены результаты экспериментальных исследований интенсивности колебаний грунта при взрыве вертикального цилиндрического заряда и получены формулы для определения скорости смещения грунта при взрыве удлиненного заряда для объемной и поверхностной волн в различных грунтах. Исследовано влияние конструктивных особенностей цилиндрического заряда на параметры сеймовзрывных волн.

Показана неспроможність використання формули сферичного заряду для визначення швидкості зміщення ґрунту, викликаної вибухом циліндричного заряду. Приведені результати експериментальних досліджень інтенсивності коливань ґрунту при вибусі вертикального циліндричного заряду й одержані формули для визначення швидкості зміщення ґрунту при вибусі подовженого заряду для об'ємної і поверхневої хвиль у різних ґрунтах. Досліджено вплив конструктивних особливостей циліндричного заряду на параметри сеймовибухових хвиль.

The inconsistency of use of the spherical charge formula for definition of a ground displacement velocity caused by a cylindrical charge explosion is shown. There are given the results of experimental researches of intensity of ground fluctuations at a vertical cylindrical charge explosion and are received the formulas for definition of a ground displacement velocity for volumetric and superficial waves in various grounds at the lengthened charge explosion. The influence of constructed features of a cylindrical charge on parameters of seismic-exploding waves is investigated.

### ВВЕДЕНИЕ

Использование энергии взрыва как полезной и эффективной силы при взрывных работах неотъемлемо связано с обеспечением безопасности, так как сейсмические и воздушные волны, возникающие при взрыве, отрицательно действуют на окружающую среду. Основным критерий сеймоопасности – скорость смещения грунта, рассчитываемая по формуле [1]

$$u = k \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-n}, \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние от заряда до точки наблюдения;  $Q$  – общая масса рассредоточенного заряда.

Формула (1) была предложена М.А. Садовским для поверхностной волны при взрыве сосредоточенного заряда около 50 лет тому назад. За это время технология взрывных работ (ВР) значительно усовершенствовалась: применяется взрывание вертикальных и наклонных скважинных зарядов различного диаметра, комбинированных зарядов, одиночных вертикальных или горизонтальных зарядов, короткозамедленное взрывание (КЗВ). В плане конструкции симметрия этих зарядов и близко не напоминает сосредоточенный заряд, но расчет сейсмотехнических расстояний проводится на основе формулы (1) сосредоточенного заряда и, как следствие, возникает несоответствие

между расчетом и фактическими данными. Отмеченное явление несоответствия в большей мере относится к объемным волнам и в меньшей – к поверхностным.

Известно, что в идеально упругой среде функция расхождения цилиндрической волны с расстоянием прямо пропорциональна величине  $\sqrt{r_3/r}$  ( $r_3$  – радиус заряда), а сферической –  $r_3/r$ , поэтому не должно существовать области равновеликих значений параметров указанных волн. Однако в условиях горных пород, как показывают экспериментальные исследования, на определенном расстоянии от заряда различие между количественными показателями параметров сферической и цилиндрической волн приближается к уровню ошибки измерения и практически не влияет на технологические задачи ведения ВР, т.е. можно говорить о существовании области вырождения цилиндрической волны в сферическую. Расстояние от указанной области до заряда зависит от конструктивных особенностей цилиндрического заряда. Так, для зарядов с цилиндричностью 200–300 рассматриваемая область находится на расстоянии (5–6)  $l$  ( $l$  – длина заряда) [2]. Указанные расстояния охватывают диапазон, где преобладают, в основном, объемные волны.

Исследователи взрывного дела стремятся всячески приблизиться к правильному расчету параметров цилиндрических волн. В основу наи-

более распространенных теоретических решений этой задачи заложено суммирование полей напряжений или массовых скоростей, создаваемых каждым элементарным зарядом, на который разделяется удлиненный заряд. При этом элементарный заряд рассматривается как сферический [3–9].

В указанных теоретических работах не учитываются некоторые особенности удлиненного заряда: цилиндричность (отношение длины заряда к его радиусу) и ее влияние на интенсивность затухания энергии волны с расстоянием; взаимодействие распределенной по длине массы заряда и др. Процесс суммирования волновых полей, генерируемых элементарными зарядами, содержит много условностей и приближений. Поэтому результаты указанных теоретических решений только при определенных обстоятельствах могут приближаться к экспериментальным данным. Поскольку в указанных [3–9] и других аналогичных работах нет целенаправленных экспериментальных данных по исследованию волнового процесса при взрыве цилиндрического заряда, то проверка теоретических решений отсутствует или используются случайные данные. Например, в работе [6] проведено сравнение теоретических результатов исследования скорости смещения грунта при взрыве цилиндрического заряда с данными при взрыве отдельных сферических зарядов, рассредоточенных вдоль линии, и при этом утверждается об удовлетворительных результатах.

В работе [10] теоретическим путем, а в работе [11] экспериментальным определяется массовая скорость в волне сжатия при взрыве удлиненного заряда, но эти исследования относятся к примыкающей к заряду зоне, на относительных расстояниях  $\bar{r} = 10\text{--}30$  ( $\bar{r} = r/r_0$ ), и не устанавливают закономерностей распространения сейсмических волн в упругой области, не связаны с задачами определения сейсмобезопасных расстояний при ведении ВР.

В работе [12] динамическим методом конечных элементов выполнены исследования колебаний свободной поверхности, вызванных взрывом вертикального цилиндрического заряда, однако не учитывается цилиндричность заряда, (принимается во внимание только его длина), поэтому показатель затухания для различных по длине зарядов получился постоянным. Экспериментальные исследования в работе отсутствуют.

Теоретические решения, например, задачи о затухании параметров волнового процесса с расстоянием при взрыве цилиндрического заряда являются очень громоздкими, состоят из многочислен-

ных условностей, дополнительных решений и допущений, поэтому не могут быть использованы в практике взрывного дела даже по своей форме, не говоря уже об их достоверности.

Основной причиной использования до настоящего времени формулы (1) для определения интенсивности сейсмозрывных волн при взрыве цилиндрического заряда является отсутствие у исследователей экспериментального материала при взрывах цилиндрических зарядов.

Образовавшийся пробел в исследованиях цилиндрических зарядов может быть в какой-то мере заполнен работами отдела прикладной геодинамики взрыва Института гидромеханики НАН Украины, где проведены по обсуждаемому вопросу целенаправленные широкомасштабные экспериментальные исследования, в результате которых зарегистрированы параметры сейсмических волн при взрывах более трехсот удлиненных зарядов массой от одного до тысячи килограммов. Результаты этих экспериментальных исследований частично изложены в последующем материале настоящей статьи.

## 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Исследования проводились в различных грунтах, определяющие характеристики которых приведены в табл. 1. Основной объем исследований проведен в суглинках на территории полигона НАН Украины.

Наблюдения за параметрами сейсмозрывных волн осуществлялись по методике измерений, согласованной с Главной метрологической службой НАН Украины. При этом использовалась стандартная сейсмоизмерительная аппаратура, а именно: сейсмоприемники ВВП-Ш, ВИБ-А, ВЭГИК, СМ-3, СВ-5, светолучевые регистраторы с гальванометрами МОО2, МОО1.2, МО17.400, что обеспечивало, в зависимости от комбинации сейсмоприемник-гальванометр, запись смещения или скорости смещения грунта во времени. Масштаб записи для каждого измерительного канала определялся тарировкой с помощью вибростенда ВЭДС-100, а также расчетным путем по техническим характеристикам приборов, уточненных при лабораторной поверке.

Изучение зависимости интенсивности действия волн от расстояния проводилось на продольных профилях наблюдений, охватывающих диапазон расстояний в зависимости от массы заряда и пределов прослеживаемости изучаемой волны от 100 до 500 м.

Мерой вариации (разброса) экспериментальных

Табл. 1. Характеристика грунтов экспериментальных площадок

Грунт, площадка	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Предел прочности на сжатие, МПа	Скорость продольной волны, м/с
Суглинок, полигон НАН Украины	1.9–1.92	30–36	0.04–0.05	500–800
Известняк прибалтийский	2.3–2.32	3.1–3.2	39–50	2100–2300
Гранит, Вировское МР	2.7–2.73	0.6–0.65	230–260	4900–5000
Базальт, Берестовецкое МР	2.85–2.88	0.4–45	250–290	5100–5400

точек является коэффициент вариации

$$K_{\text{вар}} = \frac{\sigma}{K_{\text{ср}}} \cdot 100\%,$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение от средней;  $K_{\text{ср}}$  – среднеарифметическая величина ряда, а по сути является коэффициентом в уравнении прямой, вокруг которой группируются экспериментальные точки.

Минимальное и необходимое число сейсмометрических измерений вычисляется по формуле

$$N = 0.2 \frac{3K_{\text{вар}}^2 + 1}{S_0^2},$$

где  $S_0$  – вероятная ошибка определения коэффициента вариации.

Анализ волнового процесса основывается на том, что при взрывах в полупространстве вблизи дневной поверхности действуют два источника излучателя волн: первый – волна сжатия (волна объемных напряжений) и второй – волны сдвига и растяжения, связанные с вертикальным перемещением массива и куполообразным его поднятием в связи с воздействием продуктов детонации. Действия первого и второго источников не разделены во времени (практически) и накладываются друг на друга. Такое волновое воздействие в пределах ближней зоны взрыва (зоны необратимых деформаций грунтов  $r_H$ ) мы отождествляем с объемной волной  $P_0$  (рис. 1), которая является в этой зоне доминирующей по интенсивности колебаний. В упругой зоне происходит разделение волны  $P_0$  на продольную волну  $P$  и поверхностную  $R$ . Последняя является доминирующей по интенсивности воздействия на свободную поверхность в дальней зоне.

Размер зоны необратимых деформаций грунтов  $r_H$ , по наши исследования, имеет разные значения при прохождении вертикальной  $z$  и горизонтальной  $x$  составляющих волны и определяется

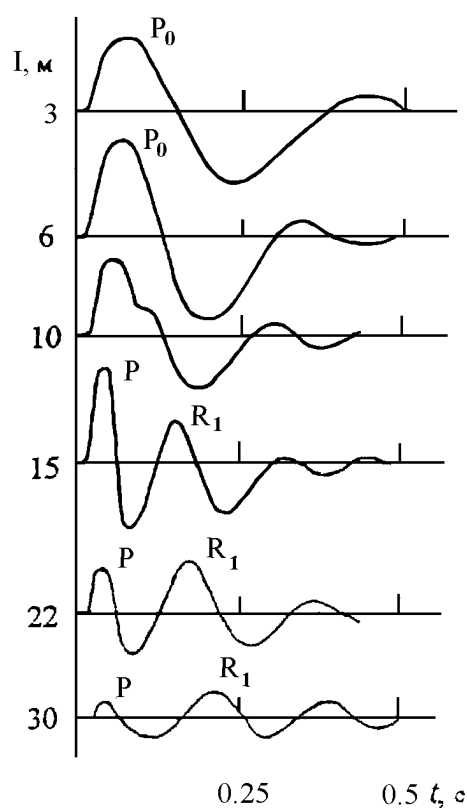


Рис. 1. Оциллограмма волнового процесса при взрыве в суглинке вертикального цилиндрического заряда массой 12 кг и длиной 6 м

следующей зависимостью:

$$r_H = K_0 \sqrt[3]{Q}, \quad (2)$$

где  $K_0$  для рассматриваемых грунтов по направлениям  $z$  и  $x$  соответственно будут такими: суглинистые грунты – 8 и 12; известняк – 5.5 и 7.6; гранит – 4.5 и 6.5; базальт – 4 и 6.

Конструктивно цилиндрические заряды отличаются от сферических (сосредоточенных) линейно

Табл. 2. Характеристика зарядов

Показатель	Глубинная серия					Масштабная серия				
	Позиция на рис. 2, а и 3, а					Позиция на рис. 2, б и 3, б				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Длина заряда $l$ , м	4	8	10.5	12	30	8	8	8	8	8
Линейная масса $Q_{\text{л}}$ , кг/м	1	1	1	1	1	1	1.5	3.85	16.5	30
Цилиндричность $S$	280	555	730	830	2080	555	390	250	154	105
$K_{\text{вар}}$ , %, волна $P$	7.64	9.6	5.68	5.89	10.8	9.6	10.34	19.6	17.22	13.57
$K_{\text{вар}}$ , %, волна $R$	12.06	9.05	6.78	7.11	7.95	9.1	8.11	7.9	5.62	8.38

распределенной массой заряда, т. е. для них характерны такие конструктивные особенности как длина заряда  $l$  и линейная масса заряда  $Q_{\text{л}}$ . В настоящей работе вводится новое понятие удлинённого заряда – цилиндричность  $S$ , которая является величиной отношения длины заряда к его радиусу и которая для исследованных зарядов составляла от 100 до 2000.

В настоящей работе рассмотрим, как зависит скорость смещения грунта в объемной и поверхностной волнах от расстояния при взрыве вертикального цилиндрического заряда вблизи дневной поверхности. За структурную основу указанной зависимости примем формулу М.А.Садовского

$$u = k\bar{r}^{-n}, \quad (3)$$

где  $u$  – скорость смещения грунта;  $k$  – коэффициент пропорциональности (он же и коэффициент, отражающий условия взрывания);  $\bar{r}$  – приведенное расстояние ( $\bar{r} = r/Q^{\nu}$ );  $n$  – показатель степени затухания интенсивности колебательного процесса, который включает в себя диссипативные потери в грунте при распространении волны и показатель расхождения волны.

## 2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Приведенный на рис. 1 волновой процесс по вертикальной составляющей  $z$  при взрыве цилиндрического заряда в качественном отношении подобен процессу, наблюдаемому при взрыве сферического заряда. В количественном отношении между параметрами волн не только при взрывах цилиндрического и сферического зарядов, но и при взрывах цилиндрических зарядов с разной цилиндричностью существуют значительные различия. Последнее является новым положением в теории распространения цилиндрических волн, так как используемая исследователями в настоящее время функция расхождения волн с расстоянием для

цилиндрического заряда  $f_{\text{расх}}(r) = \sqrt{r_3/r}$  не учитывает длину заряда. Как показывают настоящие исследования, чем больше цилиндричность заряда, тем меньше его коэффициент затухания, а последний у цилиндрического заряда всегда меньше, чем у сферического при равной массе зарядов.

Для более детального изучения влияния конструктивных особенностей цилиндрического заряда на зависимость  $u = f(r)$  проведены взрывы глубинной серии зарядов (постоянная линейная масса зарядов и переменная их длина) и масштабной серии (постоянная длина зарядов и переменная линейная масса). При этом, один из зарядов являлся общим, т.е. входил и в глубинную, и в масштабную серии. В табл. 2 приведены конструктивные особенности цилиндрических зарядов и показатель качества экспериментального материала ( $K_{\text{вар}}$ ) глубинной и масштабной серий взрывов, а на рис. 2 и 3 – зависимости скорости смещения грунта от гипоцентрального расстояния для этих же взрывов. Коэффициенты корреляции зависимостей  $u = f(r)$  составляют  $(-0.97) - (-0.99)$ .

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ

Для удобства анализа особенностей распространения волнового процесса, а также выяснения моделируемости скорости смещения целесообразно построить зависимость последней от приведенного расстояния. Признаком моделируемости является группирование опытных точек, относящихся, например, к зависимости  $u = f(\bar{r})$  при взрывах различных зарядов, вокруг одной прямой. Поэтому значения тех расстояний, где была замерена скорость смещения, умножены на коэффициенты  $1/Q^{1/2}, 1/Q^{1/3}, 1/Q^{1/4}$  и построены зависимости типа  $u = f(\bar{r})$ , (рис. 2 и 3). Моделируемость, которая определялась по коэффициенту вариации опытных данных ( $K_{\text{вар}}$ ), представлена в табл. 3.

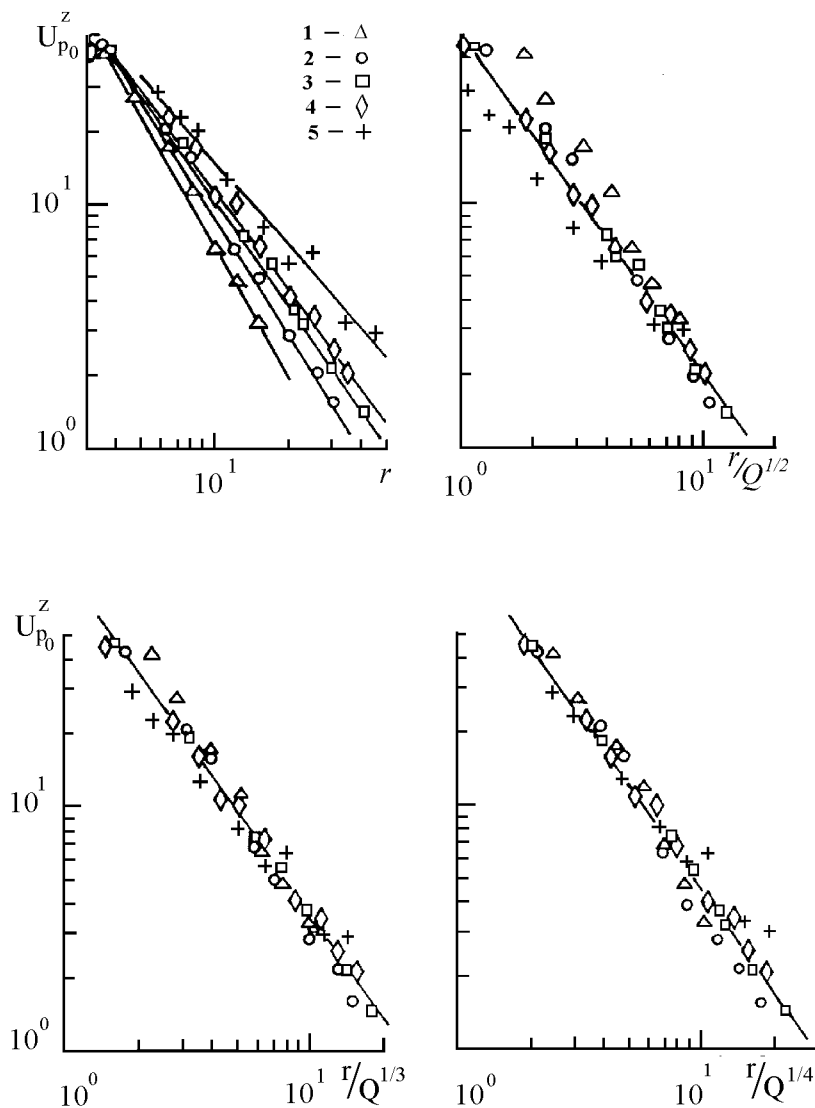


Рис. 2. Зависимости скорости смещения грунта в объемной волне от расстояния при взрывах глубинной серии зарядов и их моделируемость

Проанализировав данные табл. 3, отдадим предпочтение масштабному коэффициенту  $1/Q^{1/3}$ , т.е. действию сил упругости (признак Коши).

Используя математические методы обработки экспериментальных данных, выразим зависимости скорости смещения грунта от приведенного расстояния  $r/Q^{1/3}$  в следующем виде:

глубинная серия

$$1. \quad u_{P_0}^z = 186 \cdot \bar{r}^{-1.79};$$

$$2. \quad u_{P_0}^z = 120 \cdot \bar{r}^{-1.59};$$

$$3. \quad u_{P_0}^z = 100 \cdot \bar{r}^{-1.46};$$

$$4. \quad u_{P_0}^z = 89 \cdot \bar{r}^{-1.38};$$

$$5. \quad u_{P_0}^z = 59 \cdot \bar{r}^{-1.15};$$

(4)

масштабная серия

$$1. \quad u_{P_0}^z = 120 \cdot \bar{r}^{-1.59};$$

$$2. \quad u_{P_0}^z = 175 \cdot \bar{r}^{-1.69};$$

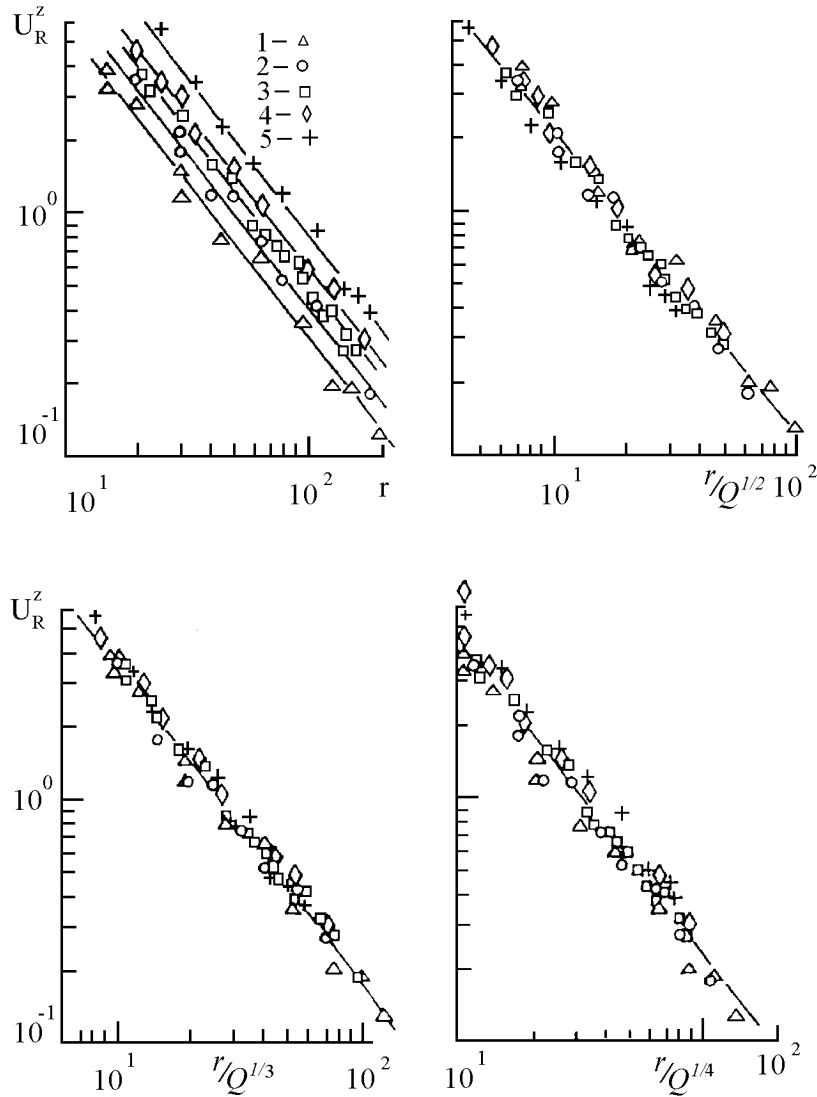


Рис. 3. Зависимости скорости смещения грунта в поверхностной волне от расстояния при взрывах глубинной серии зарядов и их моделируемость

$$\begin{aligned}
 3. \quad u_{P_0}^z &= 298 \cdot \bar{r}^{-1.81}; \\
 4. \quad u_{P_0}^z &= 472 \cdot \bar{r}^{-2.06}; \\
 5. \quad u_{P_0}^z &= 556 \cdot \bar{r}^{-2.14}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

зависимостью

$$k_1 = 175 \left( \frac{1.25}{V_P} + 1 \right).$$

Из зависимостей (4) и (5) определим коэффициент  $k$ , входящий в формулу (3) и состоящий из двух частей:  $k_1$  учитывает свойства грунта,  $k_2$  – конструкцию вертикального цилиндрического заряда.

Свойства грунта связаны со скоростью распространения продольной волны ( $V_P$ , км/с) линейной

зависимостью  $k_2$  для вертикального цилиндрического заряда по  $z$ -составляющей определяется по формуле

$$k_2 = \frac{2.5 \lg Q_n + 1}{\sqrt{l}},$$

из которой видно, что коэффициент  $k_2$ , учитыва-

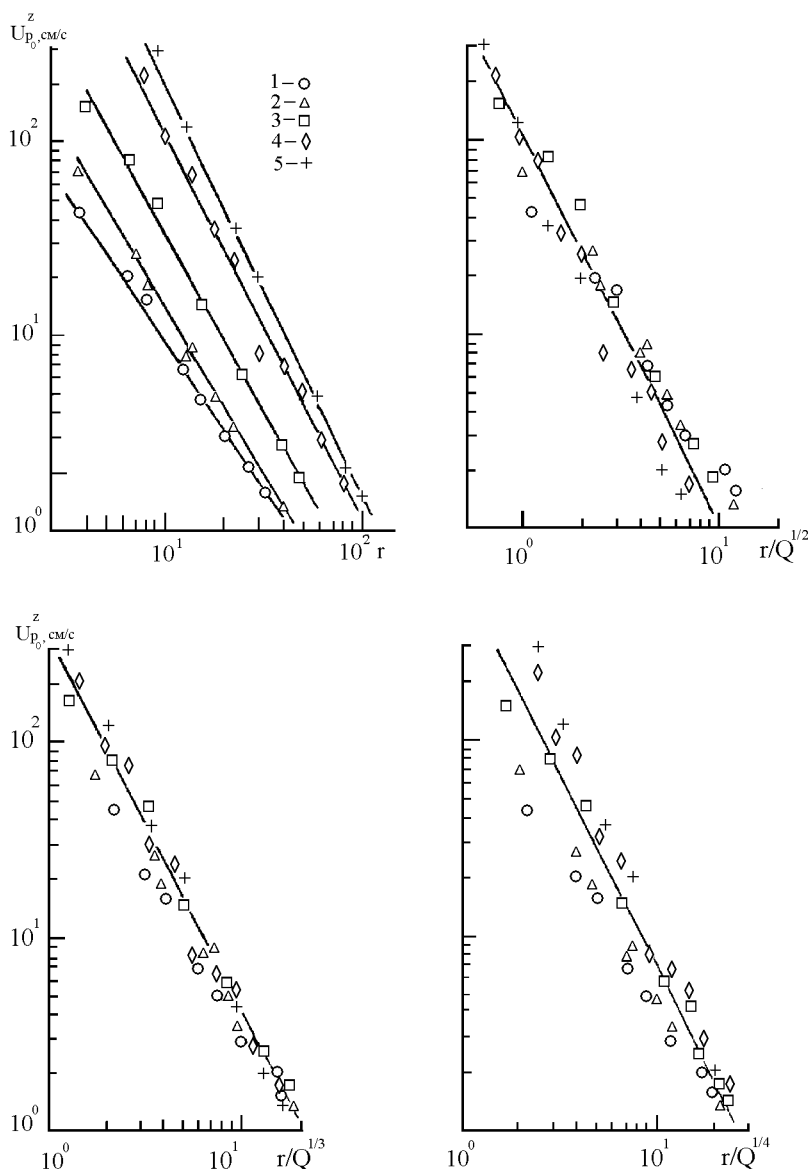


Рис. 4. Зависимости скорости смещения грунта в объемной волне от расстояния при взрывах масштабной серии зарядов и их моделируемость

ющий конструкцию заряда, прямо пропорциональный линейной массе заряда и обратно пропорциональный его длине, т.е. в полной мере формула отражает качественные показатели особенностей действия цилиндрического заряда, наблюдаемые при экспериментальных исследованиях.

Как показал анализ экспериментальных данных и зависимостей (4) и (5), коэффициент  $n$  в формуле (3) описывается следующей зависимостью:

$$n = 5.5S^{-1/5}.$$

Таким образом, формула скорости смещения грунта (см/с) в объемной волне в ближней зоне по  $z$ -составляющей при взрыве вертикального цилиндрического заряда имеет вид

$$u_{P_0}^z = k_1 \frac{2.5 \lg Q_{\text{л}} + 1}{\sqrt{l}} \cdot \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-5.5S^{-1/5}} \quad (6)$$

Аналогичным образом была получена формула для горизонтальной (радиальной) составляющей колебаний грунта при взрыве вертикального ци-

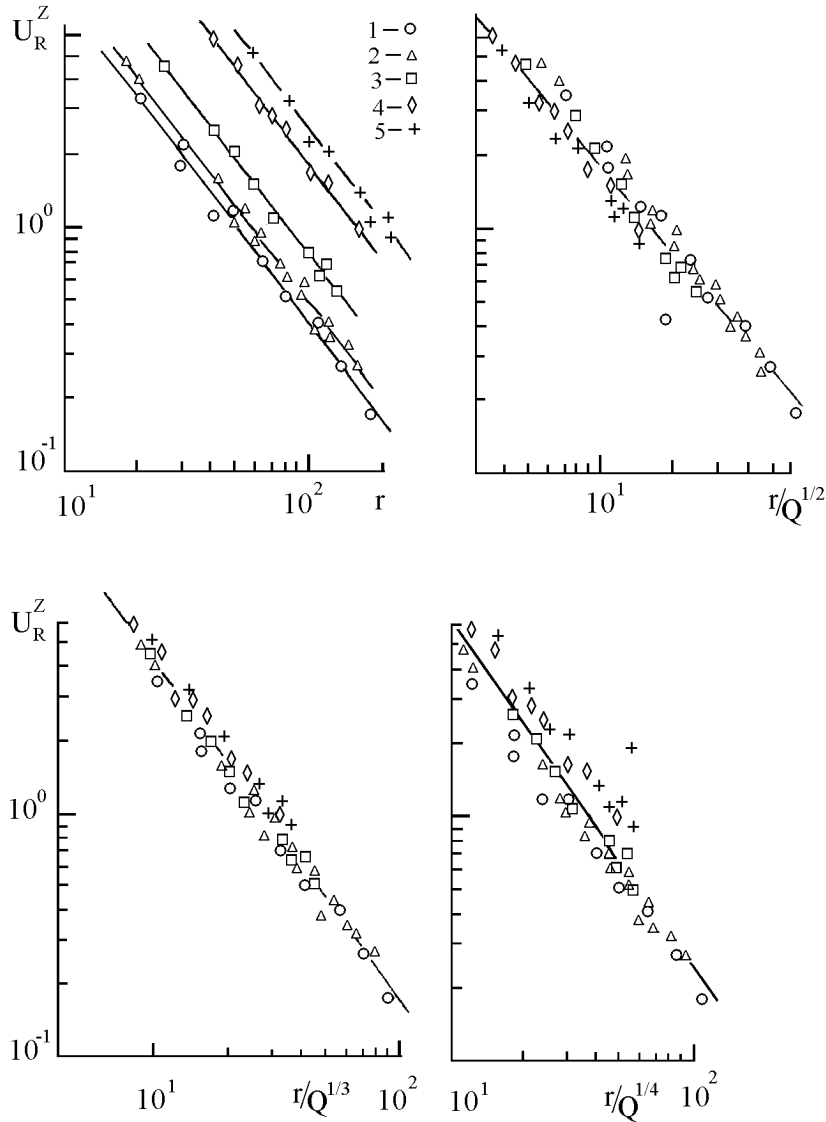


Рис. 5. Зависимости скорости смещения грунта в поверхностной волне от расстояния при взрывах масштабной серии зарядов и их моделируемость

цилиндрического заряда

$$u_{P_0}^x = k_1 \sqrt{\frac{Q_d}{l}} \cdot \bar{r}^{-5.5} S^{-1/6}, \quad (7)$$

где  $k_1 = 650(1 - 0.9 \lg V_P)$ .

Формулы (6) и (7) применимы на гипоцентральных расстояниях  $l/2 \leq r \leq (2 - 7)l$ , т.е. от половины длины заряда до области вырождения цилиндрической волны в сферическую. При этом указанное расстояние обратно пропорционально

величине цилиндричности рассматриваемых зарядов. Длина забойки зарядов составляет  $(100 - 150) r_{\Sigma}$ .

Используя экспериментальные данные и действуя аналогично как при изучении объемной волны, получим формулу скорости смещения грунта (см/с) в поверхностной волне в дальней упругой зоне колебаний грунта по  $z$ -составляющей при взрыве вертикального цилиндрического заряда:



Табл. 3. Моделируемость взрывов

Тип волны	Серия взрывов	Коэффициент вариации опытных данных ( $K_{\text{вар}}, \%$ )		
		$r/Q^{1/2}$	$r/Q^{1/3}$	$r/Q^{1/4}$
Объемная	Глубинная	25.0	16.9	17.2
	Масштабная	30.5	33.8	57.0
Поверхностная	Глубинная	12.2	11.2	15.9
	Масштабная	15.7	14.2	29.9

Табл. 4. Коэффициенты свойств грунта

Грунт	Вертикальная составляющая волны			Горизонтальная составляющая волны		
	Объемной	Поверхностной		Объемной	Поверхностной	
	$k_1$	$k_1$	$n$	$k_1$	$k_1$	$n$
Суглинок	400	58	1.30	650	68	1.4
Известняк	300	65	1.40	475	74	1.5
Гранит	250	83	1.55	345	87	1.6
Базальт	230	90	1.65	300	93	1.7

$$u_R^z = k_1 \cdot l^{0.07} \cdot Q_n^{0.1} \left( r/Q^{1/3} \right)^{-n}, \quad (8)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий свойства грунта, связан с размером очага взрыва (2) и определяется из следующей зависимости:

$$k_1 = \frac{K_0}{0.05(0.47K_0 - 1)}.$$

Между показателем затухания поверхностной волны с расстоянием по  $z$ -составляющей  $n$  и скоростью распространения волны  $V_P$  в зоне малых скоростей существует линейная зависимость

$$n = 1.2(0.125V_P + 1).$$

Скорость смещения (см/с) в поверхностной волне по  $x$ -составляющей определяется по формуле

$$u_R^x = k_1 \cdot l^{0.15} \cdot Q_n^{0.1} \cdot \bar{r}^{-n}, \quad (9)$$

где  $k_1 = K_0/[0.05(0.4K_0 - 1)]$ , а  $n = 1.3(0.1V_P + 1)$ .

Формулы (8) и (9) применимы в упругой области распространения сейсмозврывных волн, т.е. после расстояний  $r_H$ .

Скорость смещения грунта при взрыве вертикального цилиндрического заряда можно также определить по формулам (6)–(9), используя значения коэффициентов  $k_1$  и  $n$ , представленные в табл. 4.

Проверка работоспособности формул (6)–(9) при взрывах вертикальных цилиндрических зарядов, отличающихся между собой конструкцией

в различных грунтах [13,14] показала, что расхождение расчетных данных от фактических составляет не более 10%, что является вполне удовлетворительным результатом для практических расчетов в таких сложных условиях прогнозирования как взрывные работы в горных породах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги проведенных исследований, можно сделать следующие выводы.

1. Показана несостоятельность предыдущих теоретических исследований по определению поля напряжений вокруг цилиндрического заряда путем разделения последнего на элементарные заряды.

2. До настоящего времени основным инструментом по определению основного критерия сейсмоопасности (скорости смещения грунта) при ВР является формула М.А.Садовского, полученная для взрывов сферических зарядов. Однако исследования настоящей работы показывают резкое отличие значений параметров сейсмических волн при взрывах цилиндрических и сферических зарядов. В работе даны формулы (6)–(9) для определения скорости смещения грунта при взрыве цилиндрического заряда.

3. Исследованиями установлено влияние конструктивных особенностей цилиндрического заряда (его длины, линейной массы и цилиндричности) на интенсивность сейсмозврывной волны и закономерностей ее затухания с расстоянием.

4. Используя результаты настоящих исследований, основанных на уникальном по своему научному значению экспериментальном материале, и особенности взрывов групповых зарядов, представляется возможным надежно прогнозировать сейсмобезопасность ВР в промышленности.

1. Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов.– М.: Изд. АН СССР, 1946.– 29 с.
2. Рулев Б.Г., Харин Д.А. Взрывное дело // М.: Недра.– 1968.– N64/21.– С. 211–231.
3. Kuzmenko A.A., Vorobev V.D., Denisyuk I.I., Daetas A.A. Seismic effects of blasting in rock.– Oxford and IBN Publishing Co. Pvt. Ltd: New Delhi, 1993.– 169 p.
4. Hawkes I. A study of stress waves in rock and blasting action of an explosive charge // Colliery engineering.– 1959.– Vol.36, N425.– P. 299-307.
5. Миронов П.С. Взрывы и сейсмобезопасность сооружений.– М.: Недра, 1973.– 168 с.
6. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф. К расчету параметров волны напряжения при взрыве удлиненного заряда в горных породах // Взрывное дело.– 1976.– N76/33.– С. 74-85.
7. Паздников Н.В. Учет временных характеристик при определении сейсмoeffекта взрыва линейного заряда ВВ // Тр. института горного дела МЧМ СССР.– 1980.– N64.– С. 50-54.
8. Азаркович А.Е., Шуйфер М.И., Тихомиров А. П. Взрывные работы вблизи охраняемых объектов.– М.: Недра, 1984.– 213 с.
9. Фокин В.А. Определение сейсмобезопасных параметров скважинной отбойки в условиях подземного строительства.– Тр. горного института Кольского НЦ АН СССР.– Апатиты: Деп. в ВИНТИ 24.05.90, N2857.– В90, 1990.– 16 с.
10. Оніка С.Г. Прогноз та керування сейсмікою масових вибухів на залізрудних кар'єрах при їх наближенні до охороняємих об'єктів.– Автореф. дис. доктора техн. наук: Кривий Ріг, 1996.– 41 с.
11. Назаров Л.А. Волновое действие скважинного заряда, взрываемого вблизи свободной поверхности // Физико–технические проблемы разработки полезных ископаемых.– 1999.– N1.– С. 45–51.
12. Адушкин В.В., Крындушкин С.К., Тихомиров А.М. Волна сжатия при взрыве цилиндрического заряда в твердой среде // Физико–технические проблемы разработки полезных ископаемых.– 1986.– N4.– С. 38–47.
13. Blair D.P., Jiang J.J. Surface Vibrations due to a Vertical Column of Explosive // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Absir.– 1995.– Vol.32, N2.– P. 149–154.
14. Кузьменко А.А., Воробьев В.Д., Савельев Ю.Я., Крук П.Т., Сикорский Ю.А. Обеспечение сейсмобезопасного ведения ВР при подземной добыче руды // Горный журнал.– 1992.– N11.– С. 33–34.
15. Вовк А.А., Кузьменко А.А., Зых Я., Барановский Э. О сейсмическом эффекте взрыва рассредоточенных зарядов // VIII Miedzynarodowe Symposium "Geotechnika-98", Gliwice – Ustron.– 1998.– 18-21 pazdziernik.– С. 193–206.