

УДК 622.235

**Р.В. МИХЕЛЬСОН**, *д-р техн. наук, главный научный сотрудник ЮЛПП Горный институт им. Г.А. Цулукидзе, г.Тбилиси, Грузия*

**С.К. ХОМЕРИКИ**, *д-р техн. наук, главный научный сотрудник, руководитель отдела взрывных технологий ЮЛПП Горный институт им. Г.А. Цулукидзе, г.Тбилиси, Грузия*

**Д.Г. ХОМЕРИКИ**, *ЮЛПП Горный институт им. Г.А. Цулукидзе, г.Тбилиси, Грузия*

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА СЕЙСМИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ

Разработаны методика определения и компьютерная программа расчета сейсмически безопасных параметров промышленных взрывов для различных горнотехнических условий и типов охраняемых инженерных и природных сооружений.

**Ключевые слова:** взрывные работы взрывчатое вещество, сейсмический эффект, сейсмометрические измерения

Сейсмический эффект промышленных взрывов оказывает негативное воздействие на сохранность близлежащих инженерных и природных сооружений, включая здания различного назначения, транспортные коммуникации, откосы природных ландшафтов и уникальные пещерные комплексы. Тем не менее, методика расчета сейсмически безопасных расстояний, представленная в действующих правилах безопасности по взрывным работам, оказывается неприемлемой для зданий и сооружений уникального характера, что создает серьезные проблемы не только проектным организациям, но и государственным органам, выдающим лицензии на ведение горных работ. Учитывая вышеизложенное Горный институт им. Г.А. Цулукидзе при финансовой поддержке Национального фонда им. Шота Руставели выполнил Проект «Установление сейсмометрических параметров промышленных взрывов и разработка компьютерной программы их расчета» (грант GNFST 08/5-45). В рамках указанного Проекта был обобщен мировой опыт исследования сейсмического эффекта промышленных взрывов и подтверждена целесообразность выбора в качестве критерия сейсмической опасности векторной скорости смещения грунта в основании охраняемых сооружений, как параметра наиболее тесно коррелирующего с массой одновременно взрываваемых зарядов взрывчатых

веществ и с расстоянием между точкой наблюдения и очагом взрыва [1, 2, 3, 4].

В соответствии с теорией подобия [5], связь между указанными параметрами в области распространения сейсмических волн описывается формулой:

$$V = K_c \left( \frac{\sqrt[3]{Q_{гр}}}{r} \right)^v \quad (1)$$

где  $V$  – векторная скорость смещения грунта в основании охраняемых объектов, см/с;  $K_c$  – коэффициент сейсмичности горных пород,  $Q_{гр}$  – масса одновременно взрываваемых зарядов взрывчатых веществ, кг при условии, что величина интервала замедления между взрывами смежных групп одновременно взрываваемых зарядов  $\tau \geq 20$  мс, а масса каждой группы зарядов не превышает 2/3 сейсмически безопасной суммарной массы всех зарядов при их одновременном взрывании;  $r$  – расстояние между очагом взрыва и охраняемым сооружением, м;  $v$  – показатель степени затухания сейсмической волны, расчетное значение которого в соответствии с рекомендациями работы [1] принято равным 1,5.

Если в формулу (1) вместо фактической величины  $V$  ввести её допустимое значение  $V_d$  (таблица 1) и решить уравнение относительно  $r$ , получим выражение для определения сейсмически безопасного расстояния:

$$r_{\delta} = \sqrt[3]{\frac{Q_{гр} \cdot K_c^2 \cdot K_3^2}{V_{\delta}^2}} \quad (2)$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса;  $V_{\delta}$  – допустимая векторная скорость смещения в основании охраняемых объектов, см/с.

Допустимые значения векторной скорости смещения грунта в основании охраняемых объектов установлены в результате анализа литературных данных [6, 7, 8, 9] и представлены в таблице 1.

Таблица 1. Допустимые значения векторной скорости смещения грунта в основании охраняемых объектов ( $V_{\delta}$ )

Тип сооружения	$V_{\delta}$ , см/с	
	при многократном взрывании	при однократном взрывании
I. Здания, стоящие на оползнях или просадочных грунтах, лечебные и детские учреждения	0,6	-
II. Крупнопанельные жилые здания; ветхие каменные здания; исторические и архитектурные памятники	0,8	2,0
III. Жилые и общественные здания всех типов, кроме крупнопанельных	3,0	6,0
IV. Административно-бытовые и промышленные здания промплощадок; высокие трубы, транспортные тоннели; эстакады, мосты; подземные пустотылегкие постройки	5,0	10,0
V. Одноэтажные каркасные промышленные здания; металлические и монолитные железобетонные сооружения; гидротехнические тоннели	12,0	24,0
VI. Грунтовые откосы, уступы карьеров и ярусы отвалов, сложенные: - рыхлыми и/или обломочными породами, - трещиноватыми скальными породами, - относительно монолитными породами, содержащими отдельные трещины и пустоты, - крепкими и монолитными породами	8,0 19,0 30,0 36,0	16,0 38,0 60,0 72,0

При определении коэффициента сейсмичности горных пород  $K_c$  использовались фактические данные натуральных сейсмометрических измерений, проведенных в течение длительного периода в различных горно-геологических условиях.

При этом, в отличие от всех известных методик, аппроксимация зависимости (1) выполнялась не по средним значениям составляющих векторной скорости смещения

грунта (метод наименьших квадратов), а по огибающим их максимальных значений, что позволило понизить уровень риска получения заниженных показателей критериального параметра.

Это положение проиллюстрировано сопоставлением кривых зависимостей  $V=f(\rho)$ , где  $\rho = \frac{\sqrt[3]{Q_{гр}}}{r}$  по двум месторождениям Грузии (рисунки 1 и 2).

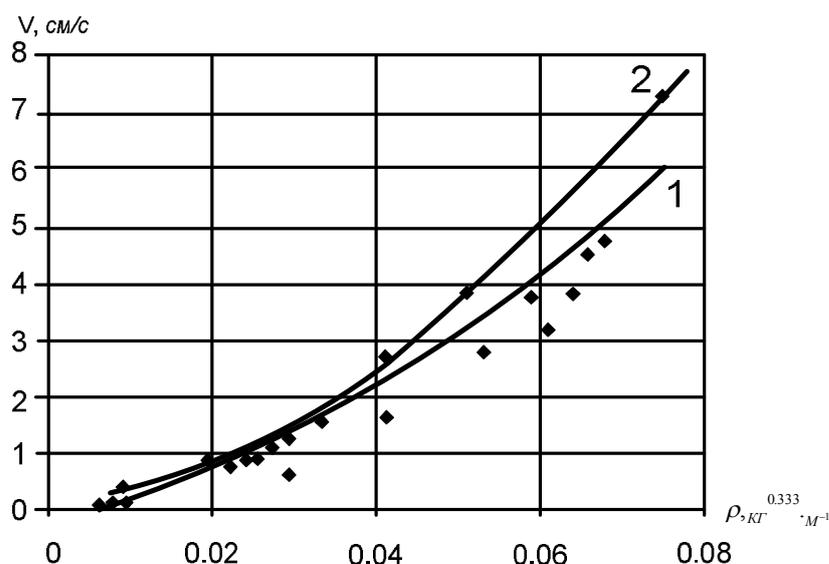


Рисунок 1 – Графики зависимости векторной скорости смещения горных пород Маднеульского золото-медно-полиметаллического месторождения от приведенной массы одновременно взрывааемых зарядов

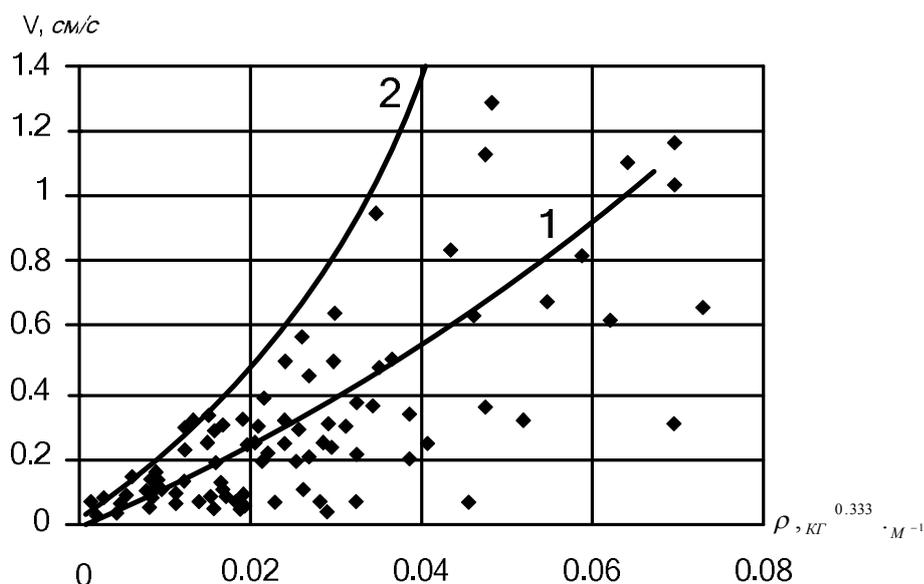


Рисунок 2 – Графики зависимости векторной скорости смещения горных пород Каспского месторождения известняков от приведенной массы одновременно взрывааемых зарядов

На представленных рисунках график под номером 1 получен в результате аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов (штатная методика), а под номером 2 – по огибающим максимальных значений скоростей смещения.

Кроме внесения коррективов в методологию математической обработки экспериментальных данных сейсмометрических измерений, повышение надежности расчетных величин  $r$  и  $Q$  обусловлено также введением в расчетные формулы (по аналогии с методикой расчета устойчивости породных отко-

сов [10]) тридцатипроцентного коэффициента запаса надежности ( $K_s=1,3$ ).

Расчетные значения коэффициента сейсмичности горных пород некоторых месторождений Грузии представлены в таблице 2. Предполагается постоянно пополнять эту базу данных, но в экстремальных условиях можно воспользоваться рекомендациями работы [1] и принять априори  $K_c=400$  с гарантией, что в 84% случаев фактическая скорость смещения грунта будет ниже расчетной величины.

Таблица 2. Коэффициент сейсмичности горных пород некоторых месторождений и регионов Грузии

Горная порода	Месторождение, регион	Характеристика горных пород		
		плотность, т/м <sup>3</sup>	категория трещиноватости	коэффициент сейсмичности
Андезито-базальты	Кинкиша	2,7 - 2,9	II	80
Андезито-базальты	Дологани	2,7 - 2,9	IV	225
Порфириды, туфобрекчии	Ахалшени	2,7 - 2,9	II - III	90 - 150
Известняки	Моцамета-гелатский регион	2,45 - 2,48	IV	250
Известняки сильно закарстованные и сильно трещиноватые	Каспи, Чишура	2,53 - 2,66	II	40 - 60
Тешенит сильно трещиноватый	Курсеби	2,7 - 2,88	II	50 - 80
Туфы и альбитофиры	Маднеули	2,62 - 2,66	III	190
Туфобрекчии и медносульфидная руда	Маднеули	2,6 - 2,61	III - IV	245
Медные и барит-полиметаллические руды	Маднеули	3,67	III - IV	360
Карьерное поле Маднеульского золото-медно-полиметаллического месторождения			III - IV	310
Суглинки с прослоями супесей	Тбилиси	1,62 - 1,92	III	100
Песчаники туфогенные и аргиллиты	Тбилиси	2,67 - 2,71	III - IV	230

В практике взрывных работ зачастую приходится решать обратные задачи, когда для заданного расстояния между очагом взрыва и охраняемым объектом необходимо определить сейсмобезопасную массу одновременно взрываемых зарядов. Искомая величина определяется из уравнения (2) путем его решения относительно  $Q_{гр}$ :

$$Q_{гр} = \left( \frac{V_0}{K_c \cdot K_3} \right)^2 r^3, \dots кг \quad (3)$$

Установлено, что скорость смещения грунта при прочих равных условиях зависит только от энергии одновременно взрываемых зарядов взрывчатых веществ [11]. Поэтому, с целью объективной оценки условий сейсмической безопасности охраняемых объектов, в формулах (2) и (3) фактическое значение  $Q_{гр}$  необходимо привести к  $Q_{гр}$  стандартного взрывчатого вещества.

В мировой практике в качестве стандартного взрывчатого вещества принят тротил, удельная энергия взрыва которого

$E_{TNT}=4100$  кДж/кг. Исходя из этого сейсмически безопасная масса одновременно взрываемых зарядов, приведенная к тротилловому эквиваленту, определяется из выражения:

$$Q_{TNT} = Q_{гр} \cdot K_{TNT} \quad (4)$$

где  $K_{TNT} = \frac{E}{4100}$  - коэффициент приведения используемого взрывчатого вещества к тротилловому эквиваленту;  $E$  - удельная энергия взрыва используемого взрывчатого вещества, кДж/кг.

Таким образом, выполненными исследованиями установлено:

- тротилловый эквивалент сейсмически безопасной массы зарядов взрывчатых веществ при одновременном их взрывании:

$$Q_{TNT \max} = \left( \frac{V_0}{K_c \cdot K_3} \right)^2 r^3, кг \quad (5)$$

- при распределении суммарного заряда  $Q_{TNT \max}$  по отдельным группам взрывания с интервалом замедления  $\tau \geq 20$  мс, тротильный эквивалент сейсмобезопасной массы каждой группы зарядов

$$Q_{TNTN} \leq 0,67 Q_{TNT \max}, \quad \text{кг} \quad (6)$$

- сейсмически безопасное расстояние при одновременном взрывании всех зарядов

$$r_{\delta \max} = \sqrt[3]{\left(\frac{K_c \cdot K_s}{v_{\delta}}\right) Q_{TNT \max}}, \quad \text{м} \quad (7)$$

- при групповом взрывании зарядов взрывчатых веществ с интервалом замедления между группами одновременно взрывааемых зарядов  $\tau \geq 20$  мс

$$r_{\delta} = \sqrt[3]{\left(\frac{K_c \cdot K_s}{v_{\delta}}\right) Q_{TNT \text{ГР}}}, \quad \text{м} \quad (8)$$

Представленная методика была положена в основу разработки алгоритма компьютерной программы расчета сейсмически безопасных параметров промышленных взрывов.

Указанная компьютерная программа описана в работе [12] и апробирована в различных горнотехнических условиях с регистрацией скоростей смещения грунта в основании самых различных сооружений. Она предназначена для проектных организаций и предприятий, выполняющих взрывные работы, а также окажет существенную помощь государственным структурам, занятым лицензионной деятельностью и/или надзором за безопасным ведением горных работ.

#### Перечень ссылок

1. Цейтлин Я.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я.И. Цейтлин, Н.И. Смолий. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
2. Суханов А.Ф. Разрушение горных пород взрывом: [учеб. для вузов] / А.Ф. Суханов, Б.Н. Кутузов. – М.: Недра, 1983. – 344 с.
3. Проектирование взрывных работ в промышленности / [Башкуев Э.Б., Бейсебаев А.М., Богацкий В.Ф. и др.]. – М.: Недра, 1983. – 359 с.
4. Богацкий В.Ф. Сейсмическая безопасность при взрывных работах / В.Ф. Богацкий, В.Х. Пергамент - М.: Недра, 1978. – 128 с.
5. Садовский М.А. Сейсмический эффект взрывов. Труды всесоюзного совещания по буровзрывным работам / М.А. Садовский // Москва-Ленинград: Гостоптехиздат, 1940. – С. 290-319.
6. Справочник. Открытые горные работы. / [Трубецкой К.Н., Потапов М.Г., Виницкий К.Е. и др.]. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.
7. Arnold Karleins. Gedanken zur Neujestlegung von Anhaltswarten jur den Sprengershutterungs mission shutz gegen ube baulichen Anlagen "Nobel Hefje", 1980. – 46 p.
8. Барон В.Л. Техника и технология взрывных работ в США / В.Л. Барон, В.Х Кантор. – М. : Недра, 1989. – 376 с.
9. Слепцов М.Н. Подземная разработка месторождений цветных и редких металлов/ Слепцов М.Н., Азимов Р.Ш., Мосинец В.Н. - М.: Недра, 1986. – 206 с.
10. Шапарь А.Г. Механика горных пород и устойчивость бортов карьеров / А.Г. Шапарь – К.: Выша школа, 1973. – 120 с.
11. Зависимость параметров сейсмических колебаний от свойств взрывчатых веществ и массива горных пород (на грузинском языке) / С.К. Хомерики, Р.В. Михельсон, Н.Д. Кукуладзе [и др.] // Труды Горного института им. Г.А.Цулукидзе. Тбилиси, 2010. – С. 30-36.
12. Компьютерная программа расчета массы сейсмически безопасных зарядов промышленных взрывчатых веществ (на грузинском языке) / Р.В. Михельсон, С.К. Хомерики, Д.Г. Хомерики [и др.] // Горный журнал. Тбилиси, 2012. – №1 (28). – С. 73-77.

*Стаття надійшла до редколегії 13.11.2012 р. російською мовою  
Стаття рекомендована членом редколегії канд. техн. наук П.І. Копачем*

**Р.В. МІХЕЛЬСОН, С.К. ХОМЕРИКИ, Д.Г. ХОМЕРИКИ**  
*ЮЛПП Гірничий інститут ім. Г.А. Цулуکیدзе, м. Тбілісі, Грузія*

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СЕЙСМІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ПРОМИСЛОВИХ ВИБУХІВ**

Розроблена методика визначення та комп'ютерна програма розрахунку сейсмічно безпечних параметрів промислових вибухів для різних гірничотехнічних умов та типів інженерних та природних споруд, що охороняються.

*Ключові слова:* вибухові роботи, вибухова речовина, сейсмічний ефект, сейсмометричні вимірювання.

**P.V. MIKHELSON, S.K. KHOMERIKI, D.G. KHOMERIKI**  
*Grigol Tsulukidze Mining Institute, Tbilisi, Georgia*

**THE METHODOLOGY OF CALCULATION OF SEISMIC SAFE PARAMETERS  
FOR INDUSTRIAL EXPLOSIONS**

The Methods of detection and computer program for calculation of seismic safe parameters for Industrial explosions of various Mining-Technical conditions and for protected engineering and natural structures are developed.

*Keywords:* explosive works, explosive, seismic effect, seismometry measurings.