

УДК 622.235.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРАТЕРА ПРИ НАЗЕМНОМ МЕЛКОМАСШТАБНОМ ВЗРЫВЕ

И. Бжеловук¹, С. Ярамаз², П. Элек², Д. Мицкович², Л. Кричак²

¹Академия криминалистики и полицейских исследований, 11080 Белград, Сербия
ivana.bjelovuk@kra.edu.rs

²Университет Белграда, 11000 Белград, Сербия

Приведены эмпирическая и численная модели, описывающие размеры кратера, образующегося при наземном взрыве небольшого заряда тротила. Предлагаемые модели полезны для оценки массы взрывчатого вещества на основе размеров кратера. Модели удовлетворительно приближают экспериментальные данные и подтверждают предположение, что размеры кратера определяются массой взрывчатого вещества и площадью контакта заряда с поверхностью грунта. Предложены два уравнения для оценки массы взрывчатого вещества по объему кратера.

Ключевые слова: наземный взрыв, грунт, кратер, моделирование, масса взрывчатого вещества.

DOI 10.15372/FGV20150317

ВВЕДЕНИЕ

При контактном взрыве бризантного взрывчатого вещества (ВВ) на поверхности грунта образуется кратер (воронка). Опубликовано множество работ по воздействию взрыва на конструкции и по их сопротивляемости взрывным нагрузкам, например [1–4]. Но исследований, касающихся моделирования характеристик кратера для целей судебной оценки массы ВВ на основе эффектов взрыва, известно немного. Большинство исследований связано с подземными взрывами и содержит информацию, базирующуюся в основном на результатах экспериментальных исследований [3, 5]. Часто сведения о взрывах хранятся в государственных архивах, некоторые из них классифицированы как секретные или имеют ограниченный доступ. Все это создает трудности для использования такой информации в практических целях. Кроме того, применение реальных взрывчатых веществ в экспериментальных исследованиях связано с риском, особенно если приходится иметь дело с большими зарядами ВВ, требуется аккуратное обращение с ВВ, что трудно реализовать

в гражданском исследовании [6]. В связи с этим построение адекватных моделей имеет большое значение.

Механизм формирования кратера сложный. В этом плане данные о типе и массе используемого ВВ представляют значительный интерес [7, 8]. Масса ВВ может быть оценена на основе размеров воронки. Существуют эмпирические соотношения, связывающие объем кратера и массу заряда ВВ [7, 9]. Установлено [10], что при исследовании проблем, связанных со взрывом, силой тяжести можно пренебречь. По мнению многих авторов (см., например, [3]), прежде всего важны масса ВВ и глубина заложения заряда, которые определяют профиль и размеры воронки. При исследовании характеристик взрывного кратера широко используются теория подобия и статистические методы [11–13].

В настоящее время для нелинейного динамического анализа и численного моделирования взрыва разработано множество компьютерных программ: Dytran, Epic, HEMP, Hull, Cth, Blastx, Feflo, Foil, Share, Dyna 3D, Ale3D, Air3D, Conwep, Abaqus, ANSYS-Autodyn, LS-Dyna и пр. [14]. В нашей работе приведены эмпирическая и численная модели для получения характеристик воронки в случае наземного контактного взрыва заряда ТНТ, основанные на методе размерностей, экспериментальных данных и программном коде Abaqus. В пакете Abaqus/Explicit ис-

© Bjelovuk I.¹, Jaramaz S.², Elek P.², Micković D.², Kričak L.³, 2015.

¹Academy for Criminalistics and Police Studies, Belgrade, 11080 Zemun, Serbia. ²University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, 11000 Belgrade, Serbia.

³University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, 11000 Belgrade, Serbia.

пользуется метод конечных элементов [15]. Основная гипотеза модели: размеры воронки зависят только от характеристик заряда ВВ и грунта.

МАТЕРИАЛ И МЕТОД

Были проведены взрывы небольших зарядов тротила, контактирующих с поверхностью грунта, и измерены размеры образующихся воронок. Плотность грунта составляла $\rho_{tla} = 1500 \text{ кг/м}^3$. Использовались заряды ТНТ массой $m_e = 0.1 \text{ кг}$ (размер $\varnothing 0.033 \times 0.108 \text{ м}$), 0.2 кг (размер $0.1 \times 0.05 \times 0.025 \text{ м}$) или их комбинации массой $0.18, 0.36, 0.54$ и 2 кг . Заряд располагался на грунте двумя способами: горизонтально (наиболее длинная ось симметрии параллель-

на плоскости грунта) и вертикально (наиболее длинная ось симметрии перпендикулярна плоскости грунта), что позволяло получать различные площади контакта при одинаковой массе ВВ. Объем кратера рассчитывался в приближении, что воронка имеет форму конуса с эллиптическим основанием: $V_k = d_1 d_2 h \pi / 12$, где d_1 и d_2 — диаметры, м, h — глубина воронки, м. Размеры кратера определены аналогично [15]. На рис. 1, 2 показаны экспериментальные зависимости объема кратера V_k от массы ВВ m_e и площади контакта P_k .

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРАТЕРА

В модели формирования кратера использована теория подобия для уменьшения количества необходимых экспериментальных данных. В качестве основных переменных, характеризующих результаты наземного взрыва, выбраны масса заряда ВВ m_e и объем кратера V_k . Полученные данные аппроксимировались модельной зависимостью, построенной методом наименьших квадратов. В предлагаемой модели, в отличие от уже разработанных, принималась во внимание площадь контакта между зарядом и поверхностью грунта. В модели рассматривался кратер, очищенный от выброшенного грунта, упавшего обратно в воронку.

Эмпирическая модель

Характеристики грунта, предел прочности и предел текучести во внимание не принимались, поскольку они не оказывают заметного влияния на размеры кратера [5, 11]. Ожидалось, что модель подтвердит гипотезу о пропорциональности объема кратера и массы ВВ и об обратной пропорциональности объема кратера и плотности грунта, а также прямую зависимость объема кратера от площади контакта заряда ВВ с грунтом. ВВ и грунт рассматривались как гомогенные среды. Предполагалось, что известно, какое ВВ использовалось, так как это можно установить при помощи химического анализа образцов грунта из воронки. При мелкомасштабном наземном взрыве из кратера выбрасывается небольшое количество грунта, так что силой тяжести можно пренебречь. Объем кратера V_k [м³] зависит от пяти переменных: массы ВВ m_e [кг], удельной энергии взрыва E_e [Дж/кг], плотности ВВ ρ_e

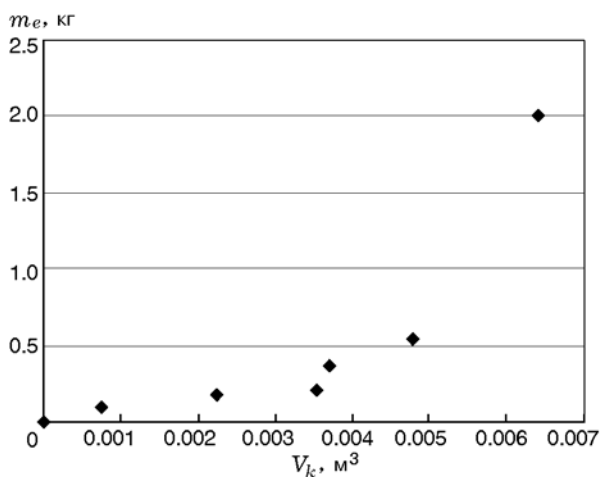


Рис. 1. Зависимость объема кратера от массы ВВ

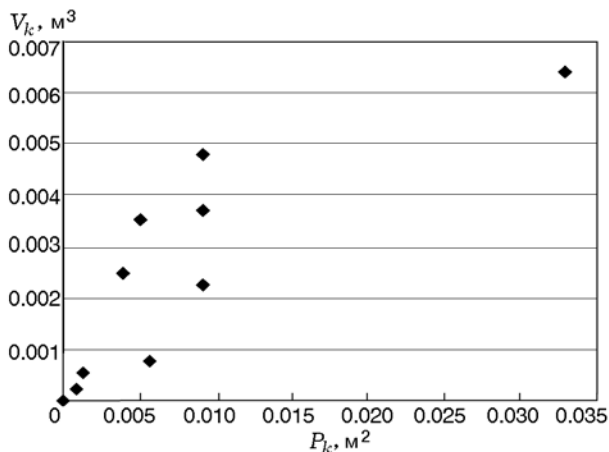


Рис. 2. Зависимость объема кратера от площади контакта

[кг/м³], плотности грунта ρ_{tla} [кг/м³], площади контакта P_k [м²] заряда ВВ с поверхностью грунта:

$$V_k = f_1(m_e, E_e, \rho_e, \rho_{tla}, P_k). \quad (1)$$

Размерности физических величин, входящих в (1), могут быть выражены через размерность массы (M), длины (L) и времени (t). В соответствии с теоремой Бакингема (π -теорема) уравнение (1) можно переписать в виде $f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0$, где f_1 — функция n безразмерных переменных [16]. В рассматриваемой задаче $n = 6$, переменные содержат $m = 3$ основных размерностей (M, L, t). Поэтому уравнению (1) соответствуют $n - m = 3$ безразмерных параметра подобия. Произведение всех переменных имеет постоянное значение Π :

$$V_k^a m_e^b E_e^c \rho_e^d \rho_{tla}^e P_k^k = \Pi. \quad (2)$$

Безразмерные параметры подобия Π_1, Π_2, Π_3 определяются уравнениями

$$\Pi_1 = \rho_e P_k^{3/2} / m_e, \quad (3)$$

$$\Pi_2 = \rho_{tla} P_k^{3/2} / m_e, \quad (4)$$

$$\Pi_3 = V_k / P_k^{3/2}. \quad (5)$$

В соответствии с теоремой Бакингема существует функциональное соотношение f_2 между параметрами подобия:

$$f_2(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 0. \quad (6)$$

Ввиду того что объем кратера V_k появляется только в одном из параметров подобия, уравнение (6) можно переписать в виде зависимости одной переменной Π_3 от двух других:

$$V_k = P_k^{3/2} f(\rho_e P_k^{3/2} / m_e, \rho_{tla} P_k^{3/2} / m_e). \quad (7)$$

Аналогично устанавливается связь объема кратера с площадью контакта, массой заряда ВВ и плотностью грунта:

$$V_k = g_1(P_k, m_e, \rho_{tla}), \quad (8)$$

$$m_e / V_k \rho_{tla} = g(P_k / V_k^{2/3}). \quad (9)$$

Эти модели базируются на экспериментальных данных и являются эмпирическими.

Предполагаемые зависимости строятся на основе аппроксимирующих функций с использованием результатов эксперимента, и отдельные точки могут отклоняться от этих кривых. Для определения параметров функций аппроксимации использовался метод наименьших квадратов.

Из экспериментальных данных следует прямая корреляция наблюдаемых значений m_e и V_k , а также V_k и P_k (см. рис. 1, 2). Зависимость $m_e(V_k)$ похожа на степенную функцию. Изменение площади контакта показало, что при большем ее значении и той же массе ВВ образуется кратер большего размера. Можно предположить, что зависимости (7) и (9) являются степенными функциями. Аппроксимирующая функция, связывающая массу используемого ВВ и объем воронки, в случае наземного взрыва заряда ТНТ выражается уравнением

$$m_e = 317 V_k^{1.177}. \quad (10)$$

Зависимости безразмерных величин $m_e / V_k \rho_{tla} = \pi_1$ и $P_k / V_k^{2/3} = \pi_2$ аппроксимировали степенной функцией $m_e / V_k \rho_{tla} = a(P_k / V_k^{2/3})^b$, где значения параметров a и b получены методом наименьших квадратов:

$$m_e = 327 V_k^{0.247} P_k^{1.130}. \quad (11)$$

Уравнения (10), (11) определяют зависимость массы заряда ВВ от объема воронки, образующейся при наземном взрыве, и представляют собой эмпирическую модель.

Численная модель

Численная модель наземного взрыва ТНТ построена на базе программы Abaqus. Варьировалась масса заряда ВВ. Для газообразных продуктов взрыва использовалось уравнение состояния JWL (Jones — Wilkins — Lee). Трехмерная модель формулировалась для призмы размером $1 \times 1 \times 0.6$ м и включала в себя две области — ВВ и грунт, которые моделировались в эйлеровых координатах из-за больших деформаций расчетной сетки, обусловленных взрывной нагрузкой. Воздух не учитывался, так как его характеристики незначительно влияют на размеры кратера. Граничные условия выбирали такими, чтобы угловые точки модели не двигались. JWL-параметры и материальные свойства грунта взяты такими же,

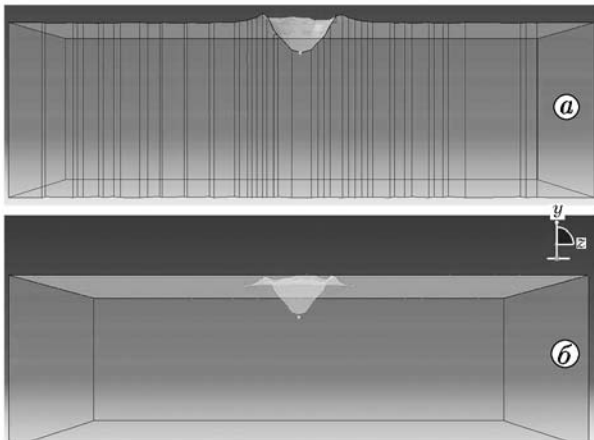


Рис. 3. Результат численного анализа взрыва заряда ТНТ массой 0.1 кг:

a — кратер, образующийся при горизонтальном расположении ВВ на грунте, *б* — при вертикальном расположении

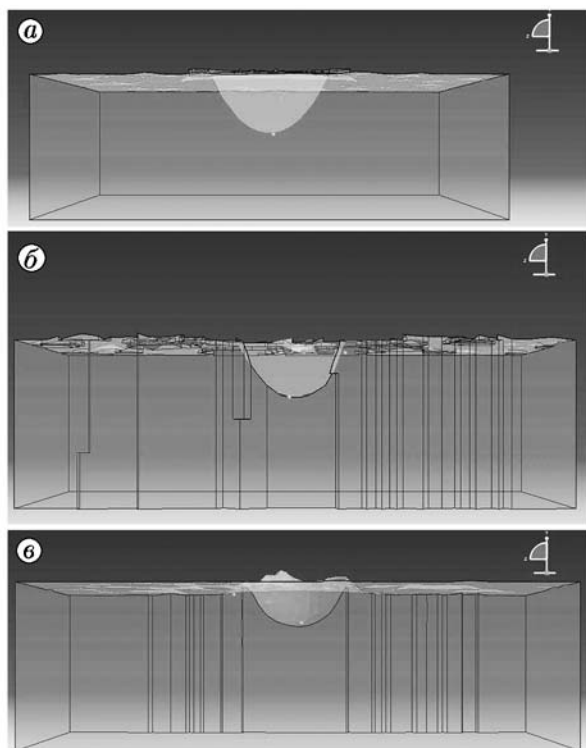


Рис. 4. Результат численного анализа взрыва заряда ТНТ массой 0.2 кг:

a — кратер, образующийся при горизонтальном, максимальном по площади контакта расположении заряда ВВ на грунте, *б* — при горизонтальном, минимальном по площади контакта расположении заряда ВВ на грунте, *в* — при вертикальном расположении заряда ВВ на грунте

как в [17]: $A = 373.8$ ГПа, $B = 3.74$ ГПа, $\omega = 0.35$, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.95$, $E = 4.4$ МДж, модуль Юнга 51.7 МПа, коэффициент Пуассона 0.45, когезия материала 0.036 МПа, угол трения материала 24° и т. д. Точка инициирования детонации предполагалась внутри заряда ВВ в соответствии с размерами детонатора. Влияние силы тяжести не учитывалось. В расчетной сетке был выбран ЕС3D8R гексаэдрический тип конечных элементов. Во всех численных тестах число узлов сетки составляло $\approx 10^5$.

Результаты численного моделирования наземного взрыва 0.1 кг ТНТ и вертикальный разрез кратера, образовавшегося после взрыва, показаны на рис. 3. Результаты взрыва заряда ТНТ массой 0.2 кг, расположенного горизонтально на грунте, при наименьшей и наибольшей площади контакта приведены на рис. 4, *a, б*, а на рис. 4, *в* — результат взрыва при вертикальном расположении заряда (показан вертикальный разрез образованного кратера).

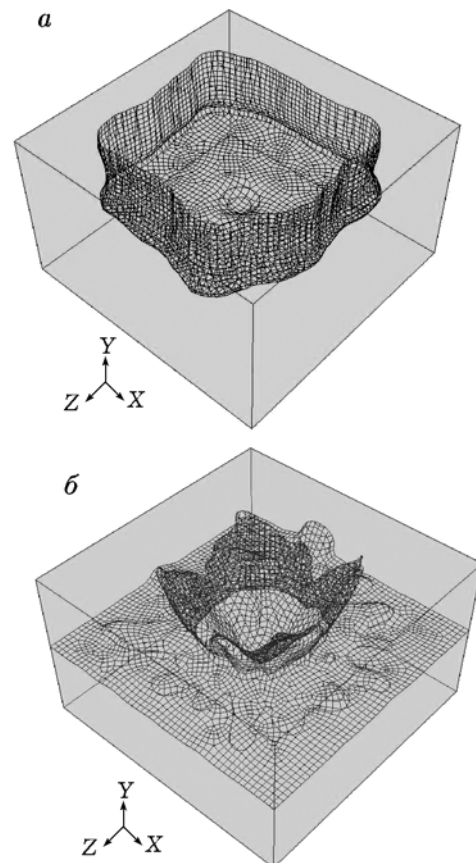


Рис. 5. Кратер в моменты времени $t = 0.1$ мс (*a*) и $t = 1.0$ мс (*б*)

Результаты экспериментов и численного анализа

№ п/п	m_e , кг	R_{exp} , м	h_{exp} , м	R_{num} , м	h_{num} , м	N	δ_R , %	δ_h , %
1	0.1	0.055	0.07	0.0732	0.078	99 534	33	11
2	0.2	0.08	0.08	0.1442	0.060	89 940	80	24
3	0.2	0.165	0.13	0.1453	0.145	90 630	12	11
4	0.2	0.15	0.15	0.1009	0.080	92 876	32	47

Формирование кратера при численном моделировании иллюстрирует рис. 5, на котором приведен вид кратера в моменты времени 0.1 и 1.0 мс. При выборе соответствующих узлов можно по значениям их координат получить размеры кратера. Так, координата узла Y указывает на глубину воронки, а координаты X и Z — на размеры, связанные с радиусом воронки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

После наземного взрыва бризантного ВВ на грунте всегда остается область разрушения — кратер. Его размеры можно использовать для оценки массы заряда ВВ. Воронке большего размера соответствует заряд большей массы. Помимо массы ВВ, оказывают влияние способ расположения заряда и плотность грунта. При одной и той же массе заряда ВВ объем кратера (соответственно, диаметр и глубина) возрастает при увеличении площади контакта ВВ с грунтом. Результаты наземных взрывов ТНТ указывают, что эта зависимость имеет вид возрастающей степенной функции.

В экспериментах большинство кратеров имело диаметр в $3 \div 5$ раз больше глубины. Для наземных взрывов ТНТ уравнение (10) дает минимум отклонения экспериментальных значений от модельных (8 %) для заряда массой 0.54 кг. При предварительно известной площади контакта наиболее точные результаты (отклонение 5 %) получены по уравнению (11) при взрыве 1 кг ТНТ.

Модель дает большие размеры кратера в случае наземного взрыва на грунте малой плотности. Эксперимент подтверждает этот результат. Эмпирические модели предсказывают увеличение объема воронки при возрастании плотности и массы ВВ и уменьшение при увеличении плотности грунта. Численное моделирование показало, что взрывной процесс заканчивается за время порядка миллисекунды (для контактного взрыва заряда ТНТ массой

0.1 кг, расположенного вертикально на грунте, время образования кратера 0.6 мс). Эти результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. В таблице приведены результаты экспериментального измерения радиуса и глубины кратера, численного моделирования кратера радиусом R и глубиной h , их относительные отклонения $\delta_R = \frac{R_{num} - R_{exp}}{R_{exp}}$, $\delta_h = \frac{h_{num} - h_{exp}}{h_{exp}}$ и число конечных элементов N , используемых в модели.

При вертикальном расположении на грунте зарядов ТНТ массой 0.1 кг отклонения численных и экспериментальных значений радиуса и глубины кратера составили 33 и 11 % соответственно (строка 1 в таблице), а для зарядов ТНТ массой 0.2 кг расхождение значений оказалось больше — 80 и 24 % (строка 2). Для зарядов ТНТ массой 0.2 кг, расположенных на грунте горизонтально и имеющих максимальную площадь контакта с ним, отклонения относительных значений радиуса и глубины кратера равны 12 и 11 % (строка 3), а в случае, когда площадь контакта заряда с поверхностью грунта ($P_k = 0.0025 \text{ м}^2$) была наименьшей, отклонения составили 32 и 47 % соответственно (строка 4).

Численная модель дает результаты, удовлетворительно соответствующие экспериментальным данным, что подтверждает предположение, что влиянием гравитации можно пренебречь. Наилучший результат при численном анализе получен при горизонтальном расположении заряда ТНТ массой 0.2 кг: по радиусу и глубине кратера отклонения порядка миллиметра, т. е. 12 и 11 % соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель подтверждает предположение о прямой зависимости размеров воронки (диаметр, глубина, объем) от массы заряда ВВ, а также объема кратера от площади контакта

грунта с зарядом ВВ. Размеры кратера увеличиваются с ростом плотности ВВ, но при этом обратно пропорциональны плотности грунта. По результатам численного моделирования и экспериментов процесс формирования кратера длится порядка миллисекунды.

Оценки параметров по модельным зависимостям, основанным на теории подобия, могут быть улучшены при более тщательном отборе экспериментальных данных, а также при учете других параметров, которые эта модель во внимание не принимает. Предлагаемые модели справедливы при малых значениях массы ВВ. В целом из сравнения экспериментальных и численных размеров кратера можно заключить, что предлагаемые эмпирические уравнения для оценки массы ВВ достаточно достоверны.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Jaramaz S.** Physics of Explosion. — Belgrade: University of Belgrade, Mechanical Engineering Faculty, 1997.
2. **Ambrosini D., Luccioni B., Jacinto A., Danesi R.** Location and mass of explosive from structural damage // Eng. Struct. — 2005. — V. 27, N 2. — P. 167–176.
3. **Ambrosini R. D., Luccioni B. M., Danesi R. F., Riera J. D., Rocha M. M.** Size of craters produced by explosive charges on or above the ground surface // Shock Waves. — 2002. — V. 12. — P. 69–78.
4. **Draganić H., Sigmund V.** Blast loading on structures // Tech. Gazette. — 2012. — V. 19, N 3. — P. 643–652.
5. **Ambrosini D., Luccioni B.** Craters produced by explosions above the soil surface // Mecánica Computacional. — 2007. — V. 27. — P. 2253–2266.
6. **De A.** Numerical simulation of surface explosion over dry, cohesionless soil // Comput. Geotech. — 2012. — N 43. — P. 72–79.
7. **Bjelovuk I.** Analysis of the traces after the explosion of an unknown device // Security. — 2005. — V. 47, N 2. — P. 302–310. — (in Serbian).
8. **Bjelovuk I. D., Jaramaz S., Micković D.** Estimation of explosive charge mass used for explosions on concrete surface for the forensic purpose // Science & Justice. — 2012. — V. 52, N 1. — P. 20–24.
9. **Адушкин В. В., Христофоров Б. Д.** Воронки наземных крупномасштабных взрывов // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 6. — С. 71–75.
10. **Neuberger A., Peles S., Rittel D.** Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part I: Air-blast loading // Intern. J. Impact Eng. — 2007. — V. 34, N 5. — P. 859–873.
11. **Luccioni B., Ambrosini D., Nurick G., Snyman I.** Craters produced by underground explosions // Comput. Struct. — 2009. — V. 87, N 21–22. — P. 1366–1373.
12. **Schmidt R., Housen K.** Problem solving with dimensional analysis // The Ind. Physicist. — 1995. — V. 1, N 1. — P. 21–24. — <http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-1/iss-1/p21.pdf>.
13. **Ма Кин Йонг, Кэй Мей Фенг.** Определение подобия взрывчатых веществ для модельного взрывного эксперимента // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 5. — С. 133–137.
14. **Ngo T., Mendis P., Gupta A., Ramsay J.** Blast loading and blast effects on structures — An overview // Electronic J. Structural Eng. Special Iss.: Loading on Structures. — 2007. — P. 76–91. — <http://www.ejse.org/Archives/Fulltext/2007/Special/200707.pdf>.
15. **Cooper P.** Explosive's Engineering. — N. Y.: Wiley-VCH, 1996.
16. **Giordano F., Weir M., Fox W.** A First Course in Mathematical Modeling. — Thomson Learning Asia and China Machine Press, 2003.
17. **Nagy N. M., Eltehawy E. A., Elhanafy H. M., Eldesouky A.** Numerical modelling of geometrical analysis for underground structures // 13th Intern. Conf. on Aerospace Sciences and Aviation Technology, ASAT-13. — 2009. — <http://www.mtc.edu.eg/asat13/pdf/CV22.pdf>.

*Поступила в редакцию 24/X 2013 г.,
в окончательном варианте — 26/III 2014 г.*