ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 622.235

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРУШАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ НОВЫХ СМЕСЕВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В РАЗЛИЧНЫХ ТВЕРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

А. И. Лучко, инж., Н. С. Ремез, докт. техн. наук (Институт гидромеханики НАН Украины)

Наведено результати дослідження взаємодії ударних хвиль із однорідними гірськими породами під час вибухів циліндричних зарядів еталонних і нових промислових сумішевих вибухових речовин у вапняках, гранітоїдах і кварцитах.

Ключові слова: вибух, вибухові речовини, гірські породи, руйнування, циліндричний заряд.

Приведены результаты исследования взаимодействия ударных волн с однородными горными породами во время взрывов цилиндрических зарядов эталонных и новых промышленных смесевых взрывчатых веществ в известняках, гранитоидах и кварцитах.

Ключевые слова: взрыв, взрывчатые вещества, горные породы, разрушение, цилиндрический заряд.

Research results on interaction of shock waves with homogeneous rocks at explosions of cylindrical charges of reference and new industrial mixed explosives in limestones, granitoids and quartzites are set out.

Key words: explosion, explosives, rocks, destruction, cylindrical charge.

Анализ состояния проблемы. В настоящее время в Украине разрабатываются и внедряются промышленные смесевые ВВ местного приготовления, имеющие преимущества по сравнению со штатными ВВ. Применение таких ВВ обусловлено, прежде всего, возрастанием требований как к качеству дробления горной массы, так и к улучшению экологической обстановки по сравнению с использованием традиционных заводских ВВ. Кроме того, эти ВВ дешевле заводских, и пункты их приготовления максимально приближены к местам проведения взрывных работ. Результаты исследований некоторых физико-механических и химических свойств нових смесевых ВВ изложены в работах [1–3].

Для разработки эффективных методик расчета параметров взрывных работ с применением новых смесевых ВВ необходимы точные знания о механизме действия этих ВВ на грунты и горные породы.

Цель работы – сравнение действия взрыва зарядов ВВ заводского и местного приготовления на основе численного моделирования волновых процессов в продуктах детонации и горной породе.

Материал и результаты исследований. Рассматривается осесимметричное деформирование и разрушение хрупкой горной породы под действием мгновенного взрыва цилиндрического заряда ВВ бесконечной длины и радиусом a_0. На границе с горной породой устанавливается давление P_n и плотность продуктов детонации (ПД) ρ_n, равная начальной плотности ВВ. Расширение ПД полагается происходящим по двучленной изоэнтропе

$$P(a) = A\rho^{n} + B\rho^{\gamma+1}. \qquad (1)$$

Константы A, B, n, γ в соотношении (1) однозначно определяются по известным детонационным характеристикам ВВ.

Деформирование среды принято плоским, волновые процессы не учитываются. При этом полагается, что ударная волна в среде быстро уходит от полости взрыва, поля напряжений и деформаций считаются близкими к статическим и определяются для нагрузки в данный момент времени. В развитии взрыва выделяются следующие этапы [4–7].

На первом этапе волна разрушения движется со скоростью, превышающей максимальную скорость движения трещин $v_{\max}$. На этом этапе имеются две зоны: пластическая при $a \le r \le b$ и упругая при $r \ge a$. При этом $a(t)$ – радиус полости взрыва, $b(t)$ – граница пластической зоны, r – текущая координата.

На втором этапе при уменьшении роста пластической зоны и выполнении неравенства $\dot{b} \le v_{\max}$ появляется зона радиальных трещин при $b \le r \le l$, где $l(t)$ – радиус фронта радиальных трещин. На расстояниях $r \ge l(t)$ находится зона упругих деформаций [7].

В модели полагается, что в зоне радиальных трещин для напряжений и деформаций выполняются статические соотношения для нагрузок в текущий момент времени. В зоне переизмельчения вблизи заряда выполняется уравнение движения механики сплошной среды. Для одномерного случая осевой симметрии в цилиндрических координатах (r, θ) оно имеет вид

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial r}\right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r}. \qquad (2)$$

Здесь ρ – плотность среды; v – радиальная скорость; σ_r, σ_θ – компоненты тензора напряжений. Уравнением состояния горной породы служит закон Кулона–Мора [4]

$$\tau = C - \sigma \cdot \mathrm{tg}\varphi, \qquad (3)$$

где τ, σ – касательное и нормальное напряжения на площадке сдвига; C – сцепление.

Для первого этапа взрыва выполняются такие граничные условия. На полости взрыва радиальное напряжение в зоне переизмельчения равно давлению газов в полости $\sigma_r = -P(a)$ при $r = a(t)$.

Введем безразмерные переменные. В качестве масштаба длины выберем a_0, времени – a_0 / c_0 ($c_0 = \sqrt{E/\ }$ – местная скорость звука), напряжения – E. Пропустив промежуточные выкладки, изложенные в работе [7], получаем для $a(t)$ в обезразмеренном виде камуфлетное уравнение:

$$K_1(a)a\ddot{a} + \left(K_1(a) - K_2(a)\dot{a}^2\right) + K_3 - P(a) = 0, \tag{4}$$

где

$$K_1(a) = \left((1+\ \ )\ \ \alpha\right)\left[m^{\alpha/(1+\alpha)} - \ \right];$$

$$K_2 = \left((1+\ \ )\ (\ \ +\ \ )\right)\left[\ - m^{-(2+\ \ \ +\ \ }\ \right] - \left(a\ \ \left(a\ -\ \right)\right)m\ \ ; \tag{5}$$

$$K_3 = \left(\left(Y_2 + 2\left(1+\ _2\right)p\right)\ (\ \ +\ _2) + Y\ \ \right)m^{\alpha/(1+\alpha)} - Y\ \ ,\ m = n\sqrt{1-1/a^2} = b/a.$$

На втором этапе разрушения граничные условия следующие: на полости взрыва $\sigma_r = -P(a)$ при $r = a(t)$, на границе зоны переизмельчения $u(b-0) = u(b+0)$, $\ _r(b-\ ) = \ _r(b+\ ) = \ _1\ \ \ _1 \leq \ _c$ при $r = b(t)$; на фронте радиальных трещин $u(l-0) = u(l+0)$, $\ _r(l-\ ) = \ _r(l+\ ) = q$ при $r = l(t)$.

Камуфлетное уравнение для второго этапа разрушения имеет вид (4), где

$$\bar{K}_1(a) = \left((1+\ \ )\ \ \alpha\right)\left[m^{\alpha/(1+\alpha)} - \ \right],\ \ \bar{K}_2 = \left((1+\ \ )\ (\ \ +\ \ )\right)\left[\ - m^{-(2+\ \ }\ \right],$$

$$\bar{K}_3 = \left(\sigma_1 + Y/\alpha\right)(m^{\alpha/(1+\alpha)} - 1) + \sigma_1, \tag{6}$$

при $\sigma_1 < \sigma_c$ $\quad \sigma_1 = \dfrac{\left(a^2-1\right)/\left(2b^2\right) + (1+\nu)\,p\left(2(1-\nu)l/b - 1 + 2\nu\right)}{(1+\nu) + \left(1-\nu^2\right)\ln\left(l/b\right)}.$

Для $l(t)$ в безразмерном виде имеем

$$\dot{l} = \begin{cases} 0 & \ \ < \ _0 \\ \dfrac{v_{\max}}{c_0}\dfrac{1-\exp\left(-\ \ \sqrt{\ \ \ _0} - \ \right)}{1-\exp\left(-\ \left(\sqrt{\ _1\ \ _0} - \ \right)\right)} & \text{при}\ \ \ _0\ \ \ \ _1 \\ \dfrac{v_{\max}}{c_0}\ \ \text{при} & \ \ \geq \ _1 \end{cases} \tag{7}$$

где γ_0, γ_1 – удельная поверхностная энергия трещинообразования при страгивания с места и начале ветвления.

Интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка (4)–(7) проводилось численно четырехшаговым методом Рунге–Кутта. При этом уравнения второго порядка сводились к системе дифференциальных уравнений первого порядка.

Исследования проводились с горными породами: известняк выветренный, кварцит железистый выветренный, гранитоиды. Физико-механические характеристики горных пород приведены в табл. 1. Детонационные характеристики ВВ приведены в табл. 2.

Таблица 1. Физико-механические свойства горных пород

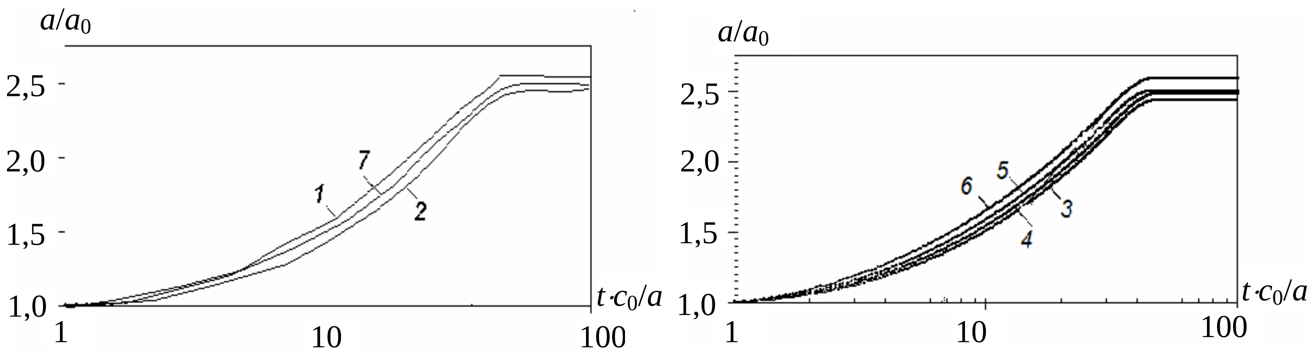
Параметр	Порода		
	Известняк	Кварцит	Гранитоиды
Плотность ρ, кг/м^3	2500	3350	2690
Модуль Юнга $E\cdot10^{-10}$, Па	3,4	4,1	4,6
Коэффициент Пуассона ν	0,25	0,16	0,12
Модуль сдвига $G\cdot10^{-10}$, Па	1,36	1,77	2,05
Предел прочности на сжатие $Y_2=\sigma_c\cdot10^{-8}$, Па	0,5	0,8	0,62
Предел прочности на растяжение $\sigma_p\cdot10^{-7}$, Па	0,45	0,72	0,57
Сцепление $C\cdot10^{-5}$, Па	30	98	44
Угол внутреннего трения φ, град	42	42	41
Максимальная скорость трещинообразования $v_{тр}$, м/с	1766	2169	2556
Удельная поверхностная энергия трещинообразования: при страгивании трещин γ_0, Дж/м^2 в начале ветвления γ_1, Дж/м^2	54,1 216,4	119,3 477,2	63,7 254,8
α/α_2	4,04/10,11	4,04/10,11	3,81/9,877

Таблица 2. Детонационные характеристики взрывчатых веществ

ВВ	Теплота взрыва, кДж/кг	ρ, кг/м^3	Скорость детонации, м/с	A, Па$\cdot$(кг$\cdot$м^3)$^{-n_0}$	n_0	$B\cdot10^5$, Па$\cdot$(кг$\cdot$м^3)$^{-\gamma_0-1}$	γ_0+1	Давление, ГПа
1	4312,4	950	3300	2,7769	2,82	1,452	1,248	1,46
2	3885,3	850	2500	$1{,}112\times10^{-5}$	4,41	1,502	1,264	0,834
3	3864,4	872	3150	5,67	2,73	1,279	1,245	1,234
4	3943,9	875	3600	56,682	2,47	1,015	1,245	1,587
5	3604,0	950	3700	43,96	2,48	0,772	1,242	2,085
6	3366,0	1000	3900	59,345	2,48	0,4048	1,242	3,07
7	3919,7	852	2550	7,671	2,24	1,638	1,235	0,95

Примечание. В табл. 2 обозначено: *1* – граммонит 79/21; *2* – игданит; *3* – полимикс ГР4-Т10; *4* – полимикс ГР-1/8; *5* – полимикс ГР-1/8 (85 %) + КЖУ К2 (15 %); *6* – полимикс ГР-1/8 (74 %) + КЖУ К2 (26 %); *7* – комполайт ГС6.

На рис. 1, *а, б* представлены зависимости относительного радиуса полости a/a_0 от относительного времени при взрывах в известняке цилиндрических зарядов различных ВВ. Нумерация кривых на рисунках соответствует нумерации ВВ в табл. 2.

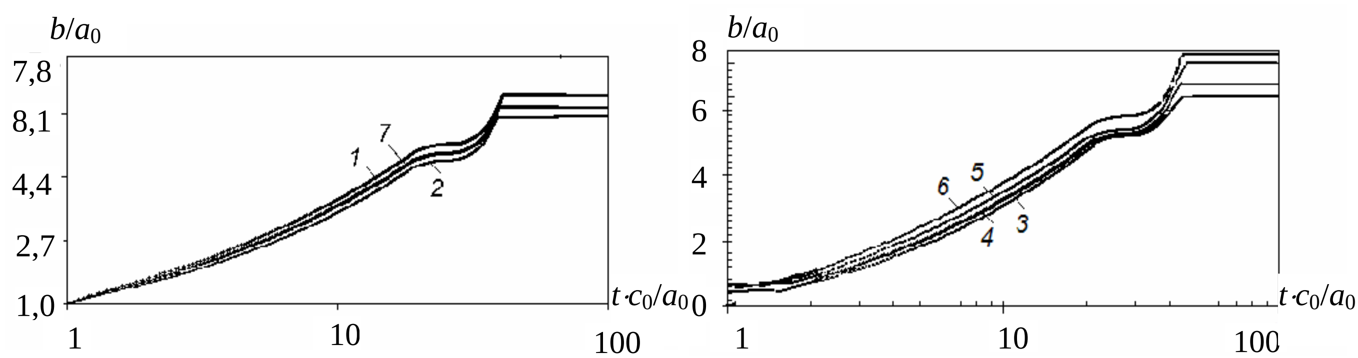


а *б*

Рис. 1. Зависимость относительного радиуса полости от относительного времени при взрывах в известняке цилиндрических зарядов различных ВВ

Из анализа рис. 1 следует, что наибольшее значение относительного радиуса полости достигается при взрывах зарядов полимикса ГР1/8 (74 %) + КЖУ К2 (26 %), затем – полимикса ГР1/8 (85 %) + КЖУ К2 (15 %), полимикса ГР-1/8, далее граммонита 79/21, далее полимикса ГР4-Т10, комполайта ГС6 и игданита. Такое распределение максимальных значений относительных радиусов полости находится в прямой зависимости от детонационных характеристик ВВ – начального давления и плотности продуктов детонации: чем больше давление и плотность продуктов детонации, тем больше значение радиуса полости.

На рис. 2, *а, б* изображены зависимости относительного радиуса зоны переизмельчения b/a_0 от относительного времени.



а *б*

Рис. 2. Зависимость относительного радиуса зоны переизмельчения от относительного времени при взрывах в известняке цилиндрических зарядов различных ВВ

Из рис. 2 следует, что распределение максимальных значений зон переизмельчения при взрывании зарядов различных ВВ такое же, как и для радиусов полости. Единственное отличие состоит в том, что при взрывах полимикса ГР4-Т10 и граммонита 79/21 достигаются одинаковые значения относительных зон переизмельчения b/a_0.

На рис. 3, *а*, *б* показаны зависимости относительных радиусов зон радиальных трещин от относительного времени при взрывах цилиндрических зарядов различных ВВ в выветренном известняке. Из анализа рисунков следует, что распределение максимальных значений относительных радиусов радиальных трещин l / a_0 при взрывании зарядов различных ВВ такое же, как и для относительных радиусов полости и радиусов зон переизмельчения, и находится в прямо пропорциональной зависимости от величин давления и плотности продуктов детонации ВВ. Только l / a_0 при взрыве заряда полимикса ГР4-Т10 больше, чем для взрыва граммонита 79/21. Это объясняется тем, что показатель политропы n у граммонита 79/21 больше, чем у полимикса ГР4-Т10, что обусловливает более интенсивное угасание ударных волн, то есть большую диссипацию энергии. Поэтому с течением времени на больших расстояниях от эпицентра взрыва взрыв заряда полимикса ГР4-Т10 создает большую зону радиальных трещин.

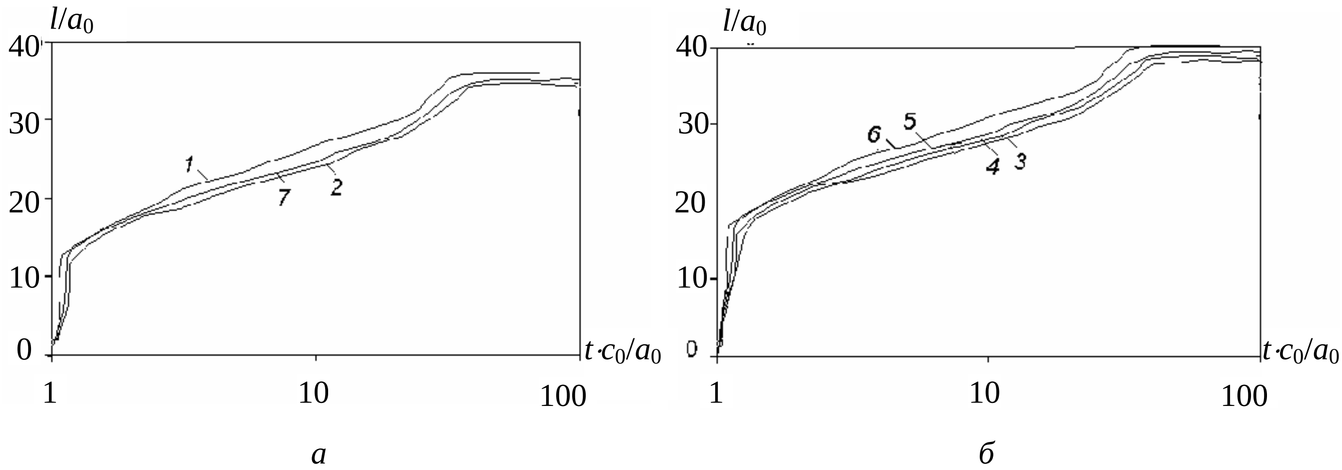


Рис. 3. Зависимость относительного радиуса зоны радиальных трещин от относительного времени при взрывах в известняке цилиндрических зарядов различных ВВ

В результате численного расчета были получены также зависимости относительных радиусов полости a / a_0, зон переизмельчения b / a_0 и радиальных трещин l / a_0 от относительного времени при взрывах цилиндрических зарядов новых смесевых ВВ в выветренных железистых кварцитах и гранитоидах. Установлено, что закономерности распределения максимальных значений этих параметров в кварцитах в зависимости от типов ВВ такие же, как и в известняке. Однако максимальные значения a / a_0, b / a и l / a_0 в кварцитах меньше, чем в известняке. Это объясняется тем, что кварцит имеет большую плотность и большие прочностные характеристики (модуль сдвига, коэффициент объемного сжатия, пределы прочности на растяжение, сжатие и сдвиг, сцепление). Для гранитоидов значения радиусов этих зон меньше, чем для известняка и кварцита, поскольку прочностные характеристики у гранитоидов значительно выше, чем у известняка. По сравнению с кварцитом гранитоиды имеют меньшую плотность и меньшие прочностные характеристики, но у гранитоидов значительно меньшая удельная энергия трещинообразования, что и обусловливает увеличение зон разрушения в кварцитах.

Выводы

На основании численного моделирования волновых процессов в горном массиве при взрывах цилиндрических зарядов новых смесевых ВВ исследованы закономерности влияния на параметры зон разрушения характеристик ВВ. Установлено, что распределение максимальных значений относительных радиусов полости, зон переизмельчения и радиальных трещин l/a_0 в зависимости от различных ВВ находится в прямой пропорциональной зависимости от величин давления и плотности продуктов детонации. Только l/a_0 при взрыве заряда полимикса ГР4-Т10 больше, чем при взрыве граммонита 79/21. Это объясняется тем, что показатель политропы n у граммонита 79/21 больше, чем у полимикса ГР4-Т10, что обуславливает более интенсивное угасание ударных волн, то есть большую диссипацию энергии.

Исследовано влияние физико-механических свойств различных горных пород на развитие зон разрушения. Обнаружено, что наибольшие значения радиусов зон разрушения при взрывах цилиндрических зарядов смесевых ВВ достигаются в известняке, имеющем наименьшие значения плотности и прочностных характеристик, а наименьшие – в гранитоидах. Это объясняется тем, что хотя по сравнению с кварцитом гранитоиды имеют более низкую плотность и меньшие прочностные характеристики, но у гранитоидов значительно меньшая удельная энергия трещинообразования, что и обусловливает увеличение зон разрушения в кварцитах.

Установлено, что значения параметров зон разрушения в горных массивах при взрывах зарядов новых смесевых ВВ превышают значения параметров штатных ВВ, поэтому они могут быть эффективно использоваться для дробления горных пород на карьерах.

1. *Прокопенко В. С.* Совершенствование и разработка взрывчатых веществ местного приготовления / В. С. Прокопенко, И. В. Косьмин, П. Л. Лещ // Охрана труда. – К.: Основа. – 2000. – № 12. – С. 31–34.

2. *Крысин Р. С.* Современные взрывчатые вещества местного приготовления / Р. С. Крысин, В. Н. Домничев. – Днепропетровск: Наука и образование, 1998. –140 с.

3. *Термодинамічні характеристики комполайтів* – безтротилових вибухових сумішей / В. С. Прокопенко, І. В. Косьмін, А. І. Лучко и др. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія» Гірництво». – К., 2003. – Вип. 8. – С. 65–73.

4. *Шер Е. Н.* О динамическом развитии зоны радиальных трещин при камуфлетном взрыве / Е. Н. Шер // ПМТФ. – 1988. – № 1. – С. 164–167.

5. *Механический эффект* подземного взрыва / [В. Н. Родионов, В. В. Адушкин, В. Н. Костюченко и др.]. – М.: Недра, 1971. – 220 с.

6. *Шер Е. Н.* Учет динамики при описании разрушения хрупких сред взрывом шпурового заряда / Е. Н. Шер // ПМТФ. – 1997. – № 3. – С. 174–183.

7. *Шер Е. Н.* Пример расчета движения радиальных трещин, образующихся при взрыве в хрупкой среде в квазистатическом приближении / Е. Н. Шер // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. – 1982. – № 2. – С. 40–42.