

УДК 622.235

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ ИНТЕНСИВНОГО ДРОБЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВАХ НАКЛАДНЫХ ЗАРЯДОВ РАЗЛИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А. В. Прокопенко, инж., И. А. Лучко, докт. техн. наук (НТУУ «КПИ»)

Наведені результати розрахунків зони інтенсивного дроблення скельної гірської породи під час вибухів накладних зарядів із різних вибухових речовин.

Calculations data for intensive rock crushing zone during mud blasting using different explosives are resulted.

В работе [1] изложены общие научные представления о физических явлениях, возникающих при взрывании негабаритных кусков скальных горных пород накладными зарядами взрывчатых веществ (ВВ), основные исходные предпосылки решения этой задачи с учетом реакции подстилающего полу-пространства, приведены расчетные значения начального давления на фронте ударной волны, возникающей в породе негабаритного куска при взрывах накладных зарядов тротила, аммонита 6ЖВ, граммонита 79/21 и новых бестро-тиловых ВВ комполайтов ПС1, ПС2, ПС3, а также определена доля передава-емого детонационного давления внутрь негабарита. При этом возникает задача об определении размеров зон углубления и интенсивного дробления.

Для решения этой задачи воспользуемся тем, что в определенном диапазоне изменения параметров взрыва (деформации на фронте взрывной волны ε : $10^{-3} < \varepsilon < 10^{-2}$; отношения $\frac{P_n}{\rho_0 C_y^2} : 1 < \frac{P_n}{\rho_0 C_y^2} < 10$; показателя адиабаты продуктов детонации k : $1,2 < k < 1,67$) для расчета максимального радиуса полости a_m можно пользоваться аппроксимирующей формулой [2]

$$\frac{4 \pi a_m^3 \rho_0 C_y^2}{3 E_B} = 38 \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

где P_n – давление во фронте детонационной волны, Па; ρ_0 – плотность горной породы, кг/м³; E_B – энергия взрыва, Дж; C_y – скорость распространения продольной упругой волны, м/с; σ_c – прочность среды на раздавливание, Па.

Проверим применимость формулы (1) в нашем случае. Известно, что энергия взрыва заряда активной массы m_a равна $E_B = m_a Q_{ВВ}$ ($Q_{ВВ}$ – удельная энергия взрыва, Дж/кг). В частности, для взрыва накладного заряда тротила массой $m = 2$ кг имеем $m_a = 0,1m = 0,2$ кг. Учитывая, что удельная энергия

тротила $Q_{\text{ВВ}} = 4230 \cdot 10^3$ Дж/кг, имеем $E_{\text{В}} = 0,2 \cdot 4230 \cdot 10^3$ Дж. За данными [3]: $\rho_0 = 2600$ кг/м³; $\sigma_c = 1570 \cdot 10^5$ Па; $C_y = 5720$ м/с. Величину ε определим из условий, что на фронте ударной волны радиальные напряжения равны прочности среды на раздавливание, а скорость фронта волны равна скорости распространения упругой продольной волны.

Имеем

$$\varepsilon = \frac{\sigma_c}{\rho_0 C_y^2} = \frac{1570 \cdot 10^5}{2600 \cdot 5720^2} = 0,0018 \quad \text{и} \quad \frac{P_{\text{н}}}{\rho_0 C_y^2} = \frac{19,8 \cdot 10^9}{2600 \cdot 5720^2} = 2,37. \quad (2)$$

Относительно величины k заметим, что нами принимается конечное значение радиуса полости, то есть на момент, когда продукты взрыва разрядятся настолько (радиус фронта волны составляет примерно 3...6 радиусов заряда), что дальнейшее расширение будет происходить по адиабатическому закону с $k \approx 1,3$.

Следовательно, формула (1) пригодна для использования в нашем случае. Используя (1), запишем выражение для радиуса полости (максимального углубления) в явном виде

$$a_m = \sqrt[3]{\frac{38 \cdot 3}{4} \frac{E_{\text{В}}}{\pi \rho_0 C_y^2} \left(\frac{\rho_0 C_y}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}}}, \text{ м.} \quad (3)$$

Представляя активный заряд в виде сферического заряда с массой, равной массе активного заряда m_a , для каждого из исследуемых ВВ запишем

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{ВВ}} = m_a. \quad (4)$$

Отсюда имеем

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi\rho_{\text{ВВ}}} m_a} = k_0 m_a^{\frac{1}{3}}, \quad (5)$$

$$\text{где } k_0 = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi\rho_{\text{ВВ}}}}. \quad (6)$$

Рассчитанные значения k_0 для исследуемых ВВ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения исходных характеристик ВВ и коэффициента k_0

№ п/п	ВВ	$\rho_{\text{ВВ}}$, кг/м ³	$Q_{\text{ВВ}}$, кДж/кг	k_0
1	Тротил (ТНТ)	1620	4230	0,0528
2	Аммонит 6ЖВ	1100	4312	0,0601
3	Граммонит 79/21	950	4312	0,0631
4	Комполайт ПС1	700	3881	0,0698
5	Комполайт ПС2	700	3567	0,0698
6	Комполайт ПС3	750	3797	0,0682

Так как $E_B = m_a Q_{BB}$, то формулу (3) можно представить в виде

$$a_m = \sqrt[3]{\frac{38 \cdot 3}{4} \frac{m_a Q_{BB}}{\pi \rho_0 C_y^2} \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (7)$$

или, вводя в рассмотрение толщину негabarита h , получим

$$\frac{a_m}{h} = \frac{1}{\bar{h}} \sqrt[3]{\frac{38 \cdot 3}{4} \frac{Q_{BB}}{\pi \rho_0 C_y^2} \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}}}, \quad (8)$$

где $\bar{h} = h/m_a^{\frac{1}{3}}$ – приведенная толщина негabarита.

Поскольку используемые ВВ различаются по плотности, то желательно, чтобы в расчетную формулу в явном виде входила плотность ВВ. Используя (4), (5) и (6), получаем

$$E_B = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_{BB} Q_{BB} = \frac{4}{3} \pi k_0^3 m_a \rho_{BB} Q_{BB}. \quad (9)$$

Подставив (9) в (3), получим

$$a_m = k_0 \sqrt[3]{\frac{38}{\rho_0 C_y^2} m_a \rho_{BB} Q_{BB} \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}}}. \quad (10)$$

Введем в рассмотрение толщину негabarита h , тогда выражение (10) можно записать в виде

$$\frac{a_m}{h} = \frac{k_0}{\bar{h}} \sqrt[3]{\frac{38}{\rho C_y^2} \rho_{BB} Q_{BB} \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}}}. \quad (11)$$

Если ввести в рассмотрение относительную толщину негabarита $\bar{h}_0 = \frac{h}{r_0}$, то формулу (11) можно записать в виде

$$\frac{a_m}{h} = \frac{1}{\bar{h}_0} \sqrt[3]{\frac{38}{\rho C_y^2} \rho_{BB} Q_{BB} \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}}}. \quad (12)$$

Выполним по формуле (12) расчеты относительного углубления, возникающего в результате взрыва активного заряда на поверхности негabarита.

Данные расчетов, выполненных по формуле (12), сведены в табл. 2 и изображены на рис. 1.

Из анализа данных табл. 2 и кривых на рис. 1 следует, что с увеличением относительной толщины негабарита уменьшается по гиперболической зависимости относительное углубление (радиус углубления). Кривые располагаются пропорционально корню кубическому от объемной энергии взрыва, то есть величине $(\rho_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}})^{\frac{1}{3}}$ (при фиксированных остальных параметрах, входящих в формулу). Как видно из рис. 1, наибольшее углубление дает взрыв ТНТ, от взрыва аммонита 6ЖВ и граммонита 79/21 возникают углубления почти одинакового радиуса. Наименьшее углубление образуется при взрыве исследуемых новых ВВ – комполайтов ПС1, ПС2, ПС3.

Таблица 2. Расчетные значения радиусов зон действия взрыва накладного заряда

Приведенная толщина негабарита $\bar{h} = \frac{h}{m_a^{\frac{1}{3}}}$	ВВ			Тротил			Аммонит 6ЖВ			
	$\bar{h}_0 = \frac{h}{r_0}$	$\frac{a_m}{h}$	$\frac{b_m}{h}$	$\bar{h}_0 = \frac{h}{r_0}$	$\frac{a_m}{h}$	$\frac{b_m}{h}$	$\bar{h}_0 = \frac{h}{r_0}$	$\frac{a_m}{h}$	$\frac{b_m}{h}$	
0,3	5,679	0,3036	1,2124	4,991	0,3056	1,2204				
0,5	9,466	0,1821	0,7272	8,319	0,1833	0,7320				
1,0	18,932	0,0910	0,3634	16,638	0,0916	0,3634				
1,5	28,398	0,0607	0,2424	24,957	0,0611	0,2440				
2,0	37,864	0,0455	0,1817	33,276	0,0458	0,1829				
2,5	47,330	0,0364	0,1454	41,595	0,0366	0,1462				
3,0	56,796	0,0303	0,1210	49,914	0,0305	0,1218				
Граммонит 79/21				Комполайт ПС1						
0,3	4,750	0,3057	1,2208	4,290	0,295	1,1781				
0,5	7,922	0,1833	0,7320	7,156	0,1770	0,7068				
1,0	15,844	0,0916	0,3658	14,312	0,0885	0,3534				
1,5	23,766	0,0611	0,2440	21,468	0,0590	0,2356				
2,0	31,688	0,0458	0,1829	28,624	0,0442	0,1765				
2,5	39,610	0,0366	0,1462	35,780	0,0354	0,1413				
3,0	47,532	0,0305	0,1218	42,936	0,0295	0,1178				
Комполайт ПС2				Комполайт ПС3						
0,3	4,290	0,287	1,1461	4,390	0,2930	1,1701				
0,5	7,156	0,1721	0,6872	7,322	0,1757	0,7016				
1,0	14,312	0,0860	0,3434	14,644	0,0878	0,3506				
1,5	21,468	0,0574	0,2292	21,966	0,0586	0,2340				
2,0	28,624	0,0430	0,1717	29,288	0,0439	0,1753				
2,5	35,780	0,0344	0,1373	36,610	0,0351	0,1401				
3,0	42,936	0,0287	0,1146	43,932	0,0293	0,1170				

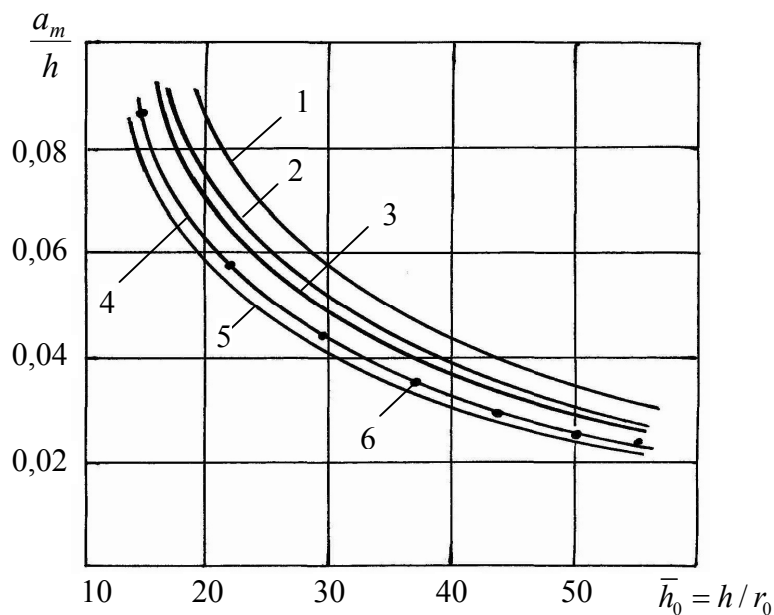


Рис. 1. Зависимость относительного углубления под зарядом от относительной толщины негабарита при взрывах накладных зарядов различных ВВ: 1 – тротил; 2 – аммонит 6ЖВ; 3 – граммонит 79/21; 4 – комполайт ПС1; 5 – комполайт ПС2; 6 (•) – комполайт ПС3

Рассчитаем радиус зоны интенсивного дробления (зоны переизмельчения) под накладным зарядом. При радиальном напряжении на границе зоны разрушения ($r = b_m$), равном в любой момент предельному напряжению σ_c (то есть $\sigma_r = -\sigma_c$), радиус зоны интенсивного дробления определяется формулой [2]

$$b_m = \eta a_m, \quad (13)$$

где $\eta = \left(\frac{E}{3\sigma_c} \right)^{\frac{1}{3}}$; E – модуль Юнга породы.

Так как для гранита $E = 3 \cdot 10^{10}$ Па [3], то

$$\eta = \left(\frac{3 \cdot 10^{10}}{3 \cdot 1570 \cdot 10^5} \right)^{\frac{1}{3}} = 3,9936. \quad (14)$$

В табл. 2 и на рис. 2 приведены данные расчетов относительного радиуса зоны $\frac{b_m}{h}$ интенсивного дробления под накладным зарядом.

Как видно из табл. 2, взрывы зарядов на негабаритах с приведенной их толщиной $\bar{h} < 1$ приводят к большим значениям относительного радиуса зоны интенсивного дробления. Так, при $\bar{h} = 0,3$ получаем, что при взрыве тротила $\frac{b_m}{h} = 1,2124$; аммонита 6ЖВ и граммонита 79/21 – 1,2204 и 1,2208; комполайта

ПС1 – 1,1781; комполайта ПС2 – 1,1461; комполайта ПС3 $\frac{b_m}{h} = 1,1701$.

Распределение кривых на рис. 2 подобно распределению кривых на рис. 1.

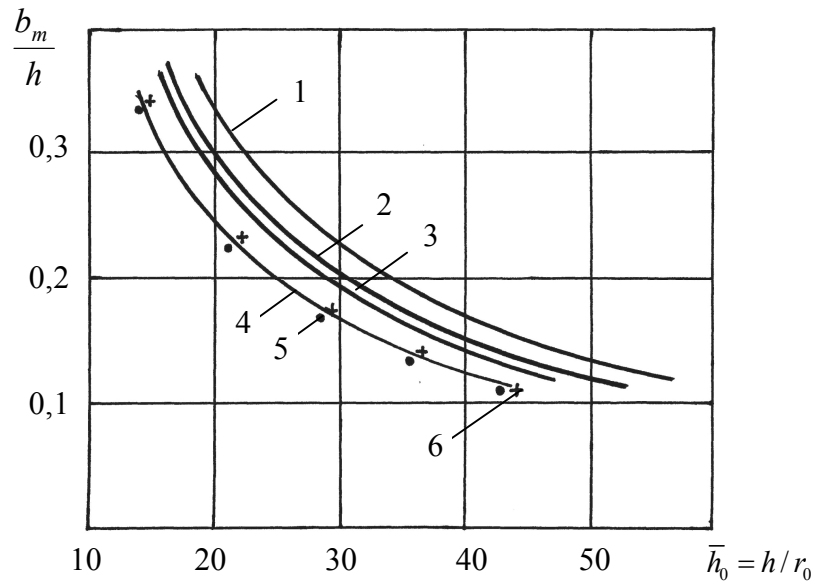


Рис. 2. Зависимость относительного радиуса зоны интенсивного дробления под зарядом от относительной толщины негabarита при взрывах накладных зарядов различных ВВ: 1 – ТНТ; 2 – аммонит 6ЖВ; 3 – граммонит 79/21; 4 – комполайт ПС1; 5 (•) – комполайт ПС2; 6 (+) – комполайт ПС3

Выводы

С использованием основных положений зонной теории действия камуфлетного взрыва В. Н. Родионова получены:

а) расчетная зависимость для относительного углубления, возникающего в результате взрыва активного заряда на поверхности негabarита. Анализ расчетных данных и построенных кривых показал, что с увеличением относительной толщины негabarита уменьшается по гиперболической зависимости относительное углубление (радиус углубления). Кривые располагаются пропорционально корню кубическому от объемной энергии взрыва, то есть величине $(\rho_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}})^{\frac{1}{3}}$ (при фиксированных остальных параметрах формулы). Наибольшее относительное углубление дает взрыв ТНТ, от взрыва аммонита 6ЖВ и граммонита 79/21 возникают углубления почти одинакового радиуса. Наименьшее относительное углубление образуется при взрыве новых взрывчатых веществ комполайтов ПС1, ПС2, ПС3;

б) расчетная зависимость для определения относительного радиуса зоны интенсивного дробления (зоны переизмельчения) $\frac{b_m}{h}$ (b_m – абсолютный радиус зоны интенсивного дробления, h – толщина негabarита). Анализ расчетных данных и графических зависимостей показал, что взрывы зарядов на негabarитах с малой приведенной толщиной приводят к большим значениям относительного радиуса зоны интенсивного дробления. Это убеждает в нецелесообразности выполнения взрывов при таких малых приведенных толщинах негabarита. Значения относительных радиусов зон интенсивного дробления для каждого ВВ изменяются с относительной толщиной негabarита

также по гиперболической зависимости, и значения относительных радиусов зон интенсивного дробления для каждой из относительных толщин тем меньше, чем слабее ВВ. При этом значения $\frac{b_m}{h}$ для новых ВВ близки между собой для каждой из относительных толщин негабарита и группируются около единой для этих ВВ кривой.

В следующей публикации авторы изложат результаты исследования зависимости относительного радиуса зоны растрескивания под накладным зарядом от относительной толщины негабарита при взрывах различных ВВ.

1. Прокопенко А. В., Лучко И. А. Исследование закономерностей передачи давления при взрыве накладных зарядов различных взрывчатых веществ на контакте заряд–негабарит // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2007. – Вип. 15. – С. 3–10.

2. *Механический эффект* подземного взрыва / В. Н. Родионов, В. В. Адушкин, В. Н. Костюченко и др. – М.: Недра, 1971. – 200 с.

3. Михалюк А. В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1980. – 154 с.