

ГЕОТЕХНОЛОГІЯ

УДК 622.235

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА ЗОНЫ РАДИАЛЬНЫХ ТРЕЩИН В НЕГАБАРИТНЫХ КУСКАХ ТВЕРДОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ ВЗРЫВАХ НАКЛАДНЫХ ЗАРЯДОВ РАЗЛИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

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

Наведені результати розрахунків радіуса зони радіальних тріщин і формули для маси накладних зарядів із різних вибухових речовин для гарантованого вибухового руйнування негабаритних кусків по всій їхній товщині.

Приведены результаты расчетов радиуса зоны радиальных трещин и формулы для массы накладных зарядов из различных взрывчатых веществ для гарантированного взрывчатого разрушения негабаритных кусков по всей их толщине.

Results of calculations of radial cracks zone radius and formulas to determine the mass of mud caps from various explosives to guarantee explosive crushing of oversized pieces through their thickness are set out.

Проблема вторичного дробления твердых горных пород остается актуальной, так как уменьшения объемов негабарита в карьерах в ближней перспективе не предвидится. До последнего времени в нашей стране эту проблему решали и сейчас решают с помощью взрывов накладных зарядов, хотя крупные горные предприятия начинают покупать иностранные бутобои для механического дробления негабарита. Однако из-за большой стоимости бутобоев не все предприятия смогут их приобрести, кроме того, они могут оказаться неэффективными для средних и малых карьеров. Поэтому важным и актуальным остается применение и усовершенствование метода накладных зарядов с целью вторичного дробления негабаритных кусков твердой горной породы.

Приведенные ниже результаты являются развитием результатов исследований, изложенных в [1, 2]. В частности, в [1] исследованы закономерности передачи давления при взрыве накладных зарядов различных взрывчатых веществ (ВВ) на контакте заряд–негабарит, а в [2] определены размеры относительного углубления и зоны интенсивного дробления в негабаритных кусках твердой горной породы при взрывах накладных зарядов различных ВВ.

В соответствии с зонной теорией действия взрыва [3, 4] между зоной интенсивного дробления и упругой зоной находится зона радиальных трещин

(зона растрескивания), радиус которой b_0 можно определить по формуле, получаемой на основе уравнений равновесия для упругой среды,

$$b_0 = b_m \sqrt{\frac{\sigma_c}{2\sigma_p}}, \quad (1)$$

где b_m – радиус зоны интенсивного дробления, определяется по формуле (13) [2]; σ_c – прочность породы на раздавливание; σ_p – предельное упругое растягивающее напряжение на границе зоны растрескивания и упругой зоны при $r = b_0$.

С использованием формул (10) и (13), приведенных в [2], выражение (1) можно записать в виде

$$b_0 = \eta k_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{38}{\rho_0 C_y^2} m_a \rho_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}} \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_c}{2\sigma_p}}, \quad (2)$$

где $k_0 = (3/4\pi\rho_{\text{ВВ}})^{\frac{1}{3}}$; $\rho_{\text{ВВ}}$ – плотность ВВ; m_a – активная масса заряда; $Q_{\text{ВВ}}$ – удельная энергия ВВ; ρ_0 – плотность горной породы; C_y – скорость распространения продольной упругой волны; величина η определяется по выражению $\eta = \left(\frac{E}{3\sigma_c} \right)^{\frac{1}{3}}$; E – модуль Юнга породы.

Приравняв радиус зоны растрескивания, определяемый по (2), толщине негабарита h , получим

$$m_a^{\frac{1}{3}} \eta k_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{38}{\rho_0 C_y^2} \rho_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}} \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_c}{2\sigma_p}} = h. \quad (3)$$

Поскольку $m_a = (0,1 \dots 0,15)$, то массу заряда m , обеспечивающего полное разрушение негабарита до основания, можно записать в виде

$$m = \frac{3\xi\sigma_c h^3 \rho_0 C_y^2}{38(0,1 \dots 0,15) k_0^3 E \rho_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}} \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sigma_c}{2\sigma_p} \right)^{\frac{3}{2}}}, \quad (4)$$

где ξ – коэффициент согласования с экспериментальными данными, $\xi = 0,05, \dots, 0,15$.

Формулу (4) можно представить в упрощенной записи, выполнив в ней соответствующие математические преобразования:

$$m = \frac{37,1 \cdot \xi \cdot E^{-1}}{(0,1 \dots 0,15)} h^3 \rho_0^{\frac{1}{3}} C_y^{\frac{2}{3}} \sigma_c^{\frac{1}{6}} \sigma_p^{\frac{3}{2}} Q_{\text{ВВ}}^{-1}. \quad (5)$$

Применение формулы (5) обеспечивает только гарантированное разрушение негабарита. При этом будет наблюдаться перерасход ВВ и переизмельчение породы негабарита.

Выполним расчеты величины $\frac{b_0}{h}$ для различных ВВ и их качественный анализ.

Разделив обе части (2) на h , получим

$$\frac{b_0}{h} = \frac{m_a^{\frac{1}{3}} \eta k_0}{h} \cdot \sqrt[3]{\frac{38}{\rho_0 C_y^2} \rho_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}} \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{2 \sigma_p} \quad (6)$$

или

$$\frac{b_0}{h} = \frac{\eta}{h_0} \cdot \sqrt[3]{\frac{38}{\rho_0 C_y^2} \rho_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}} \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \sigma_c} \right)^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{2 \sigma_p}. \quad (7)$$

Данные расчетов, выполненных по формуле (7), приведены в табл. 1. Из анализа данных табл. 1 следует, что качественно относительный радиус зоны радиальных трещин под зарядом изменяется обратно пропорционально относительной толщине негабарита. При этом в исследуемом диапазоне относительных толщин негабарита максимальные значения $\frac{b_0}{h}$ на порядок превосходят минимальные значения.

Выполним теперь расчет радиусов зоны интенсивного дробления и радиальных трещин, исходя из предположения, что давления (напряжения) изменяются с расстоянием от очага взрыва r по степенному закону

$$P = P_x \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\mu_p}, \quad (8)$$

где P_x – начальное давление в отраженной ударной волне, Па (таблица [1]);

$r_0 = k_0 m_a^{\frac{1}{3}}$ – радиус заряда; μ_p – экспериментально определяемый показатель

степени. Как следует из результатов экспериментальных исследований [5, 6], для взрывов в граните $\mu_p = 2$.

Таблица 1. Расчетные значения относительного радиуса зоны радиальных трещин под накладным зарядом (формула 7)

При- веденная толщина негабарита $\bar{h} = \frac{h}{m_a^{\frac{1}{3}}}$	ВВ		Тротил (1)		Аммонит 6ЖВ (2)	
	$\bar{h}_0 = \frac{h}{r_0}$	$\frac{b_0}{h}$	$\bar{h}_0 = \frac{h}{r_0}$	$\bar{h} = \frac{h}{m_a^{\frac{1}{3}}}$	$\frac{b_0}{h}$	
0,3	5,679	3,100	4,991	0,3	3,121	
0,5	9,466	1,860	8,319	0,5	1,872	
1,0	18,932	0,920	16,638	1,0	0,936	
1,5	28,398	0,620	24,957	1,5	0,624	
2,0	37,864	0,465	33,276	2,0	0,468	
2,5	47,330	0,372	41,595	2,5	0,374	
3,0	56,796	0,310	49,914	3,0	0,312	
Граммонит 79/21 (3)			Комполайт ПС1 (4)			
0,3	4,75	3,123	4,29	0,3	3,015	
0,5	7,922	1,872	7,156	0,5	1,807	
1,0	15,844	0,936	14,312	1,0	0,903	
1,5	23,766	0,624	21,468	1,5	0,602	
2,0	31,688	0,468	28,624	2,0	0,451	
2,5	39,610	0,374	35,780	2,5	0,361	
3,0	47,532	0,312	42,936	3,0	0,301	
Комполайт ПС2 (5)			Комполайт ПС3 (6)			
0,3	4,290	2,932	4,39	0,3	2,993	
0,5	7,156	1,757	7,322	0,5	1,795	
1,0	14,312	0,878	14,644	1,0	0,897	
1,5	21,468	0,585	21,966	1,5	0,598	
2,0	28,624	0,439	29,288	2,0	0,448	
2,5	35,780	0,351	36,610	2,5	0,358	
3,0	42,936	0,292	43,932	3,0	0,313	

Примечание: в скобках табл. 1 указаны номера ВВ от $i = 1$ до $i = 6$.

Запишем равенство давления, определяемого соотношением (8), динамическому пределу прочности $k_{дл}\sigma_c$:

$$k_{ди} \sigma_c = P_{xi} \left(\frac{b_m}{k_0 m_a^{\frac{1}{3}}} \right)^{-2}, \quad (9)$$

где $k_{ди}$ – коэффициент динамичности, $i = 1..6$ – номер ВВ.

Величину коэффициента динамичности $k_{ди}$ при взрывах тротила в граните в первом приближении можно принять равной $k_{ди} = 2,3$ [7]. Величину этого коэффициента при взрыве иного ВВ определяем в виде произведения коэффициента динамичности при взрыве тротила на отношение начальной скорости ударной волны от взрыва этого ВВ к начальной скорости ударной волны при взрыве тротила, то есть принимаем, что

$$\frac{k_{д1}}{k_{ди}} = \frac{D_{уд1}}{D_{уди}}, \quad (10)$$

где $D_{уд1}$ и $D_{уди}$ – начальные скорости ударных волн от взрыва тротила и i -го ВВ.

Коэффициенты $k_{ди}$, вычисленные по формуле (10), имеют такие значения: для тротила $k_{д1} = 2,3$; для аммонита 6ЖВ $k_{д2} = 2,09$; для граммонита 79/21 $k_{д3} = 1,89$; для комполайта ПС1 $k_{д4} = 1,86$; для комполайта ПС2 $k_{д5} = 1,85$; для комполайта ПС3 $k_{д6} = 1,91$.

Из (9) имеем

$$\left(k_{ди} \frac{\sigma_c}{P_{xi}} \right)^{-\left(\frac{1}{2}\right)} = \frac{b_m}{k_0 m_a^{\frac{1}{3}}} \text{ или } b_m = k_0 m_a^{\frac{1}{3}} \left(k_{ди} \frac{\sigma_c}{P_{xi}} \right)^{-\left(\frac{1}{2}\right)}. \quad (11)$$

Выражение (11) можно представить в виде

$$\frac{b_0}{h} = \frac{1}{h_0} \left(k_{ди} \frac{\sigma_c}{P_{xi}} \right)^{-\left(\frac{1}{2}\right)}. \quad (12)$$

Воспользуемся также формулой для радиуса зоны интенсивного дробления в виде [3]

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

где $\eta = (E/3\sigma_c)^{\frac{1}{3}}$; a_m – радиус углубления от взрыва заряда активной массы.

Были выполнены расчеты радиуса зоны интенсивного дробления под зарядом по формулам (12) и (13). Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что при взрывании тротила, аммонита БЖВ, граммонита 79/21 радиусы зоны интенсивного дробления не сильно различаются. А для слабых ВВ (комполайтов ПС1, ПС2, ПС3) это различие существенно. Видно, что радиус зоны интенсивного дробления для слабых ВВ значительно меньше, чем для сильных.

Таблица 2. Сравнительные данные по радиусам зоны интенсивного дробления и растрескивания

ВВ	$\bar{h} = \frac{h}{m_a^3}$	$\bar{h}_0 = \frac{h}{r_0}$	Формула (13)	Формула (12)	Формула (7)	Формула (16)
			$\frac{b_m}{h}$	$\frac{b_m}{h}$	$\frac{b_0}{h}$	$\frac{b_0}{h}$
Тротил (ТНТ)	1,0	18,932	0,363	0,404	0,920	0,595
	1,5	28,398	0,242	0,269	0,620	0,396
	2,0	37,864	0,181	0,202	0,465	0,297
	2,5	47,330	0,145	0,161	0,372	0,238
	3,0	56,796	0,121	0,134	0,310	0,198
Аммонит БЖВ	1,0	16,638	0,363	0,302	0,936	0,454
	1,5	24,957	0,244	0,201	0,624	0,297
	2,0	33,276	0,182	0,151	0,468	0,222
	2,5	41,595	0,146	0,121	0,374	0,178
	3,0	49,914	0,121	0,100	0,312	0,148
Граммонит 79/21	1,0	15,844	0,365	0,264	0,936	0,389
	1,5	23,766	0,244	0,176	0,624	0,259
	2,0	31,688	0,182	0,132	0,468	0,198
	2,5	39,610	0,146	0,105	0,374	0,155
	3,0	47,532	0,121	0,088	0,312	0,129
Комполайт ПС1	1,0	14,312	0,353	0,230	0,903	0,292
	1,5	21,468	0,235	0,153	0,602	0,195
	2,0	28,624	0,176	0,154	0,451	0,146
	2,5	35,780	0,141	0,092	0,361	0,117
	3,0	42,936	0,117	0,076	0,301	0,097
Комполайт ПС2	1,0	14,312	0,343	0,214	0,878	0,316
	1,5	21,468	0,229	0,143	0,585	0,210
	2,0	28,624	0,171	0,107	0,439	0,158
	2,5	35,78	0,137	0,085	0,351	0,126
	3,0	42,936	0,114	0,071	0,292	0,105
Комполайт ПС3	1,0	14,644	0,350	0,191	0,897	0,327
	1,5	21,966	0,234	0,127	0,598	0,218
	2,0	29,288	0,175	0,095	0,448	0,163
	2,5	36,610	0,140	0,076	0,358	0,131
	3,0	43,932	0,117	0,063	0,313	0,109

Для записи формулы для радиуса зоны растрескивания воспользуемся теорией наибольших касательных напряжений. Так как наибольшее касательное напряжение в породе негабарита равняется половине разности между наибольшим и наименьшим главными напряжениями, то запишем равенство давления, определяемого соотношением (8), динамическому пределу прочности [8]

$$k_{di} \left(\frac{\sigma_c - \sigma_p}{2} \right) = P_{xi} \left(\frac{b_0}{k_0 m_a^3} \right)^{-2}. \quad (14)$$

Из (14) имеем

$$\left(k_{di} \frac{(\sigma_c - \sigma_p)}{2P_{xi}} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{b_0}{k_0 m_a^3}. \quad (15)$$

Выражение (15) представим в виде

$$\frac{b_0}{h} = \frac{1}{h_0} \left(k_{di} \frac{(\sigma_c - \sigma_p)}{2P_{xi}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Как видно из формул (7) и (16), они не могут дать идеально близкие результаты расчетов, так как в формулу (7) входит величина $\rho_{ВВ} Q_{ВВ}$, значения которой не сильно различаются для различных ВВ. А в формулу (16) входит начальное давление P_{xi} , значения которого существенно (на порядок) различаются для различных ВВ, что и обуславливает различие результатов, получаемых по этим формулам.

Анализ данных табл. 2 показывает, что расчеты по формулам (12) и (16) дают более резкое уменьшение относительных радиусов зон интенсивного дробления и растрескивания для взрывов новых ВВ по сравнению с тротилом, аммонитом 6ЖВ и граммонитом 79/21.

Следует также отметить, что данные, получаемые по формулам (12) и (16) при $k_{di} = 1$ для всех ВВ по сравнению с данными, получаемыми по этим же формулам с определенными $k_{di} \neq 1$, более близко подходят к данным, рассчитываемым по формулам (13) и (7).

Используя выражение (15), можно получить формулу для массы накладного заряда, обеспечивающего гарантированное разрушение негабарита

до основания. Для этого приравняем выражение (15) толщине h негабарита и используем то, что $m_a = (0,1 \dots 0,15)m$.

В результате получим

$$m = \frac{\chi}{(0,1 \dots 0,15)} \frac{h^3}{k_0^3} \left[\frac{k_{di} (\sigma_c - \sigma_p)}{2P_{xi}} \right]^{\frac{3}{2}}, \quad (17)$$

где χ – экспериментальный коэффициент; P_{xi} – давление, возникающее на границе заряд–негабарит, определяется из системы двух уравнений [2].

В следующей публикации будут изложены результаты исследования параметров отраженной волны разрежения при падении ударной волны, прошедшей через негабарит, на границу раздела негабарит–полупространство.

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. Прокопенко А. В., Лучко И. А. Определение размеров зоны интенсивного дробления в негабаритных кусках скальной горной породы при взрывах накладных зарядов различных взрывчатых веществ // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ». – 2008. – Вип. 16. – С. 25–31.

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

4. *Физика взрыва* / Под ред. Л. П. Орленко. – Изд-е 3-е, перераб. – В 2 т. – Т. 1. – М.: Физматлит, 2002. – 832 с.

5. *Поведение грунтов* под действием импульсных нагрузок / А. А. Вовк, Б. В. Замышляев, Л. С. Евтерев и др. – К.: Наук. думка, 1984. – 288 с.

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

7. *Ефремов Э. И., Петренко В. Д., Пастухов А. И.* Прогнозирование дробления горных массивов взрывом. – К.: Наук. думка, 1990. – 120 с.

8. *Ханукаев А. И.* Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. – М.: Недра, 1974. – 224 с.