

## РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗРЫВОВ НАКЛАДНЫХ ЗАРЯДОВ ПРИ ВТОРИЧНОМ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

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

*Изложены результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений массы накладных зарядов при вторичном разрушении горных пород.*

*Ключевые слова: заряд, взрыв, негабарит, разрушение.*

*Викладено результати порівняння розрахункових і експериментальних значень маси накладних зарядів при повторному руйнуванні гірських порід.*

*Ключові слова: заряд, вибух, негабарит, руйнування.*

*The results of comparison of theoretical and experimental values of the pressure charge mass during repeated rock shattering are considered.*

*Key words: charge, explosion, oversize piece, shattering.*

**Введение.** При разрушении твердых горных пород энергией взрыва промышленных взрывчатых веществ (ВВ) почти всегда образуются некондиционные куски горной породы – негабариты, которые необходимо додрабливать либо взрывами накладных (или шпуровых) зарядов или их комбинацией, либо с применением бутобоев. До сих пор в литературных источниках не имеется однозначного ответа на вопрос, какой метод вторичного разрушения горных пород является наиболее эффективным и безопасным. Это, очевидно, связано как с чрезвычайной сложностью математического описания процесса разрушения негабарита взрывом или бутобоем, так и с несовершенством технологических решений при практическом осуществлении этих методов разрушения пород.

В последнее время авторы [1–4], представляя действие взрыва накладного заряда ВВ в виде действия одномерного камуфлетного взрыва заряда активной массы, рассчитали начальное давление на фронте ударной волны, возникающей в породе куска при взрывах накладных зарядов различных ВВ, определили долю передачи относительного давления от детонационной волны в тело негабарита [1]; определили размеры зон интенсивного дробления [2] и радиальных трещин [3]; исследовали влияние параметров волны разрежения вблизи границы негабарит–полупространство на выбор массы накладного заряда [4]. Настоящая статья посвящена сравнению результатов теоретических расчетов массы накладного заряда с данными экспериментальных и опытно-промышленных взрывов.

**Изложение основных материалов исследования.** Воспользуемся формулой (5) из работы [3] для определения массы накладного заряда, которую легко можно представить в виде

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

или

$$\frac{m}{h^3} = \xi_i M_i, \quad (2)$$

где

$$M_i = \frac{37,1}{0,125EQ_{\text{ВВ}}} \rho_0^{\frac{1}{3}} c_y^{\frac{2}{3}} \sigma_c^{\frac{1}{6}} \sigma_p^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

$I = 1, 2 \dots n$  – номер фиксированного сочетания горной породы и ВВ.

В формулах (1)–(3):  $m$  – масса накладного заряда, кг;  $h$  – высота негабарита, м;  $\xi_i$  – параметр согласования данных теоретических расчетов с экспериментальными данными;  $E$  – модуль упругости горной породы, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho_0$  – плотность горной породы, кг/м<sup>3</sup>;  $c_y$  – скорость распространения продольной упругой волны, м/с;  $\sigma_c$  – прочность породы на раздавливание, Н/м<sup>2</sup>;  $\sigma_p$  – прочность породы на растяжение, Н/м<sup>2</sup>;  $Q_{\text{ВВ}}$  – удельная энергия ВВ, Дж/кг;  $0,125 = (0,1 + 0,15)/2$  – усредненная доля передачи энергии от ВВ к негабариту.

Используем результаты экспериментальных и опытно-промышленных взрывов накладных зарядов (табл. 1).

Взрывы 1, ..., 49 выполнены на негабаритах из кварца магнетитового. Для кварца магнетитового  $\rho_0 = 3470$  кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_c = 2,1 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>;  $\sigma_p = 0,208 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>;  $c_y = 5410$  м/с;  $E = 8,3 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>.

Поскольку взрывы 1, ..., 20 выполнены с применением аммонита бЖВ, то для этого ВВ известно  $Q_{\text{ВВ}} = 1030$  ккал/кг =  $4312 \cdot 10^3$  Дж/кг.

Подставив значения известных параметров в (3), получим  $M_1 = 8,942$  кг/м<sup>3</sup>.

Введем теперь в рассмотрение коэффициент формы негабарита  $k_\phi$ , значение которого равно отношению высоты негабарита к среднему арифметическому из других поперечных размеров негабарита  $a$  и  $b$ , то есть  $k_\phi = 2h/(a + b)$ . Найдем корреляционную зависимость коэффициента согласования  $\xi$  от коэффициента формы  $k_\phi$ .

Общий вид этой зависимости установим исходя из физических соображений, а именно: при уменьшении толщины  $h$  и, соответственно, уменьшении формы  $k_\phi$  масса  $m$  заряда разрушения должна уменьшаться, а при увеличении толщины и соответственного увеличения коэффициента формы, масса заряда разрушения должна увеличиваться. Таким условиям удовлетворяет степенная корреляционная зависимость

$$\frac{m}{h^3 M_i} = \xi_i = \alpha_i k_\phi^{-\beta_i},$$

где значения величин  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  определяем при обработке экспериментальных данных одним из методов математической статистики.

Таблица 1. Данные экспериментальных и промышленных взрывов накладных зарядов аммонита бЖВ (1,...,20) и комполайта ПС4 (взрывы 21,...,49) для условий ОАО «Полтавский ГОК»

№	$a$ , м	$b$ , м	$h$ , м	$m_{\text{э}}$ , кг	$m_p$ , кг	№	$a$ , м	$b$ , м	$h$ , м	$m_{\text{э}}$ , кг	$a$ , м
1	2	1,8	1,7	12	11,92	25	2,4	1,2	2,2	16	17,32
2	1,3	1	0,8	2	2,18	26	1,2	0,8	0,8	2	1,89
3	1,0	1,1	0,7	2	1,61	27	1,4	1,0	1,2	4	4,14
4	1,7	1,7	1,4	8	8,01	28	2,7	1,3	1,4	12	13,12
5	1,0	1,0	1,7	3	2,83	29	2,2	2	2,2	24	23,34
6	1,1	2,3	1,1	6	6,67	30	0,9	0,9	1,0	2	1,96
7	1,0	1,5	1,0	3	3,11	31	1,0	1,0	1,2	3	2,91
8	1,4	1,6	1,2	5	5,38	32	1,6	1,2	1,2	6	5,59
9	1,3	1,1	2,1	6	5,33	33	1,1	1,0	1,3	4	3,49
10	1,8	1,5	1,1	6	6,24	34	1,0	0,7	1,0	2	1,75
11	1,2	1,2	1,8	5	4,45	35	1,2	0,8	1,8	4	4,48
12	1,6	1,5	1,0	5	5,04	36	1,5	1,0	1,3	5	4,89
13	1,5	1,5	1,6	7	6,71	37	0,9	0,8	1,1	2	1,94
14	1,1	1,1	1,1	3	2,52	38	1,0	1,2	1,2	4	3,5
15	1,7	1,0	1,2	4	4,25	39	1,2	1,0	1,2	4	3,5
16	1,4	0,9	1,3	3	3,15	40	0,7	1,1	1,5	3	3,01
17	0,4	1,1	1,5	1	1,35	41	1,0	1,1	2,2	6	6,10
18	1,8	1,6	1,6	9	8,88	42	1,1	0,6	1,2	2	2,12
19	1,6	0,9	1,0	3	3,11	43	0,9	1,1	0,9	2	2,14
20	1,2	1,0	0,8	2	1,98	44	0,9	1,1	0,8	2	1,89
21	1,2	1,1	1,0	3	3,14	45	0,9	1,0	1,1	2	2,4
22	1,7	0,8	1,0	3	3,69	46	1,1	0,9	0,9	2	2,14
23	2,6	1,8	1,8	21	20,63	47	0,9	1,1	1,0	2	2,39
24	1,2	0,9	1,3	4	3,49	48	0,9	1,4	0,9	3	3,14
						49	2,2	2,1	1,7	20	18,57

Применение метода наименьших квадратов к данным первых 20 опытов табл. 1 дает, что

$$\xi_1 = 0,2116k_{\phi}^{-2,2381} \quad (4)$$

в интервале  $0,64 \leq k_{\phi} \leq 2$ . Коэффициент достоверности аппроксимации составляет  $i_R^2 = 0,9861$ .

Подставив (4) в (2), получим формулу для определения массы накладного заряда аммонита бЖВ, взрыв которого обеспечивает разрушение негабарита:

$$m = 0,2116M_1h^3k_{\phi}^{-2,2381} \quad (5)$$

Как видно из табл. 1, рассчитанные по формуле (5) значения масс зарядов близки к экспериментальным значениям. Среднее отклонение расчетных данных от экспериментальных составляет  $\delta_{\text{cp}} = 7,92\%$ .

Рассмотрим теперь результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных, полученных в условиях ОАО «Полтавский ГОК» при взрывах накладных зарядов комполайта ПС4 (опыты 21,...,49) в табл. 1). Для комполайта ПС4  $Q_{\text{ВВ}} = 3881 \cdot 10^3$  Дж/кг. Характеристики породы те же, что и в опытах 1,..., 20.

Подставив значения известных параметров в (3), получим при взрывании негабаритов комполайтом ПС4  $M_2 = 9,942$  кг/м<sup>3</sup>.

Обработав с помощью метода наименьших квадратов данные опытов 21,..., 49 из табл. 1, получим корреляционную зависимость

$$\xi_2 = 0,2413k_{\phi}^{-1,9354} \quad (6)$$

в интервале  $0,7 \leq k_{\phi} \leq 2,1$ . Коэффициент достоверности аппроксимации составляет  $i_R^2 = 0,9431$ .

Подставив (6) в (2), получим формулу для определения массы накладного заряда комполайта ПС4, взрыв которого обеспечивает разрушение негабарита,

$$m = 0,2413M_2h^3k_{\phi}^{-1,9354}. \quad (7)$$

Как видно из табл. 1, рассчитанные по формуле (7) значения масс зарядов близки к экспериментальным. Среднее отклонение расчетных данных от экспериментальных составляет  $\delta_{\text{cp}} = 8,06\%$ .

Совместное рассмотрение теории и эксперимента выполнено и для других карьеров. В частности, в условиях Стрижавского гранитного карьера проведено 13 взрывов накладных зарядов комполайта ПС1 (табл. 2). Для расчетов взято:  $\rho_0 = 2790$  кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_c = 1,35 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>;  $\sigma_p = 0,06 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>;  $c_y = 4200$  м/с;  $E = 4,6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $Q_{\text{ВВ}} = 3881 \cdot 10^3$  Дж/кг.

В результате подстановки известных параметров в (3) получено  $M_3 = 2,014$  кг/м<sup>3</sup>.

Применив метод наименьших квадратов к данным табл. 2, получим корреляционную зависимость

$$\xi_3 = 1,116k_{\phi}^{-2,1291} \quad (8)$$

в интервале  $0,36 \leq k_{\phi} \leq 1,7$ . Коэффициент достоверности аппроксимации составляет  $i_R^2 = 0,9539$ .

Подставив (8) в (2), получим формулу для определения массы накладного заряда комполайта ПС1, взрыв которого обеспечивает разрушение негабарита,

$$m = 1,116M_3h^3k_{\phi}^{-2,1291}. \quad (9)$$

Как видно из табл. 2, рассчитанные по формуле (9) и экспериментальные значения массы зарядов удовлетворительно согласуются между собой. Среднее отклонение расчетных данных  $m_p$  от экспериментальных  $m_э$  равно  $\delta_{ср} = 16,86\%$ .

Таблица 2. Данные экспериментальных взрывов накладных зарядов комполайта ПС1 для условий Стрижавского гранитного карьера

№	$a$ , м	$b$ , м	$h$ , м	$m_э$ , кг	$m_p$ , кг	№	$a$ , м	$b$ , м	$h$ , м	$m_э$ , кг	$m_p$ , кг
1	1,4	0,76	0,57	1,6	1,62	8	1,65	0,9	0,7	3,2	2,76
2	1,2	1,05	0,75	1,6	2,24	9	1,45	0,5	1,17	2,4	2,44
3	0,95	0,90	0,60	1,6	1,22	10	1,28	0,86	0,8	1,6	2,13
4	1,1	1,0	0,38	1,6	1,07	11	1,40	1,85	0,7	4,8	4,63
5	1,0	1,37	0,63	1,6	2,15	12	2,0	1,05	0,9	4,8	5,03
6	0,66	1,08	1,44	2,4	2,3	13	1,3	1,2	2,0	8,0	6,61
7	1,23	0,8	0,6	1,6	1,49						

**Выводы.** Из изложенного следует, что выведенные формулы (5), (7) и (9) дают расчетные значения массы зарядов, удовлетворительно совпадающие с экспериментальными их значениями. Эти формулы могут быть успешно использованы и при прогнозировании массы накладных зарядов при повторном разрушении горных пород с фиксированным значением величины  $M$ , зависящей от характеристик горной породы и ВВ.

В дальнейшем представляет интерес рассмотрение влияния параметров волны разрежения, идущей внутрь негабарита от границы негабарит-полупространство, на выбор массы накладного заряда.

1. Прокопенко А. В., Лучко И. А. Исследование закономерностей передачи давления при взрыве накладных зарядов различных взрывчатых веществ на контакте заряд–негабарит // Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – Вип. 15. – С. 2–10.

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

3. Прокопенко А. В., Лучко И. А. Определение радиуса зоны радиальных трещин в негабаритных кусках твердой горной породы при взрывах накладных зарядов различных взрывчатых веществ // Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». – Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – Вип. 17. – С. 52–59.

4. Прокопенко А. В., Лучко И. А. Исследование влияния параметров волны разрежения вблизи границы негабарит–полупространство на выбор массы накладного заряда // Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». – Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – Вип. 18. – С. 35–42.