

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КУМУЛЯТИВНОГО ЭФФЕКТА НА ДАВЛЕНИЕ В ВОЗДУШНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ПРИ ВЗРЫВЕ РАССРЕДОТОЧЕННОГО ЗАРЯДА

Л. Д. Воробьева, инж. (Кременчугский ГПУ)

Викладено результати теоретичних досліджень дії вибуху розосередженого повітряним проміжком циліндричного заряду вибухової речовини, одна з частин якого в торці сформована у вигляді кумулятивної виїмки і спрямована у бік повітряного проміжку. Наведено розрахункові формули для визначення параметрів вибуху кумулятивного заряду в комбінації з повітряним проміжком. Показано, що така конструкція заряду в порівнянні із звичайною забезпечує збільшення імпульсу вибуху та підвищення якості дроблення гірських порід.

Увеличение доли полезной энергии взрыва при разрушении массивов скальных пород на горнодобывающих предприятиях различных отраслей промышленности было и остается актуальной научно-прикладной задачей. Достижение положительных результатов в этом направлении неразрывно связано с исследованием комплекса вопросов, определяющих эффективность взрывного разрушения горных пород [1–3].

Известно, что одним из основных методов управления энергией взрыва в скальных породах является конструкция заряда взрывчатых веществ (ВВ) [1, 3, 4]. Оптимальное сочетание ее элементов (тип ВВ, способ инициирования, величина перебура, параметры забойки и др.) обуславливает технологическую, экологическую и экономическую эффективность взрыва [1, 5]. За счет выбора конструкции заряда можно осуществлять регулирование параметров импульса взрыва и, тем самым, повысить его энергию на дробление горных пород с достижением требуемого качества горной массы.

Ранними исследованиями Н. В. Мельникова и Л. Н. Марченко (1964 г.) была доказана эффективность применения зарядов ВВ, рассредоточенных воздушным промежутком (ВП). При взрывании зарядов с ВП снижается давление газов и уменьшается скорость истечения продуктов детонации из зарядной камеры (скважины, шпура), другими словами, снижается пик амплитуды давления головной части импульса взрыва и увеличивается его продолжительность действия, что повышает качество разрушения горных пород. Однако повышение физической эффективности за счет применения ВП в удлиненных зарядах в достаточной степени еще не обосновано.

Целью настоящей работы является обоснование влияния кумулятивного эффекта на изменение давления в ВП при взрывах скважинных зарядов в массивах скальных пород. При этом решались следующие задачи:

определение плотности продуктов взрыва в момент выхода контактной поверхности, разделяющей продукты взрыва и воздух, на основании кумулятивной выемки;

определение скорости движения элементов кумулятивной струи и прохождения ее по продуктам взрыва;

обоснование величины дополнительного давления и доли увеличения взрывного импульса за счет действия кумулятивной струи с выемкой из полиэтилена.

При совершенствовании параметров указанных зарядов ВВ необходимо детальное изучение тех физико-механических явлений, которые обуславливают повышение интенсивности взрывного дробления горных пород. Для этого рассмотрим один из вариантов конструкции рассредоточенного ВП удлиненного цилиндрического заряда, состоящего из двух отдельных частей: первая – обычный цилиндрический заряд с плоскими торцами; вторая – такая же часть, но с кумулятивной выемкой в торце со стороны ВП (рис. 1).

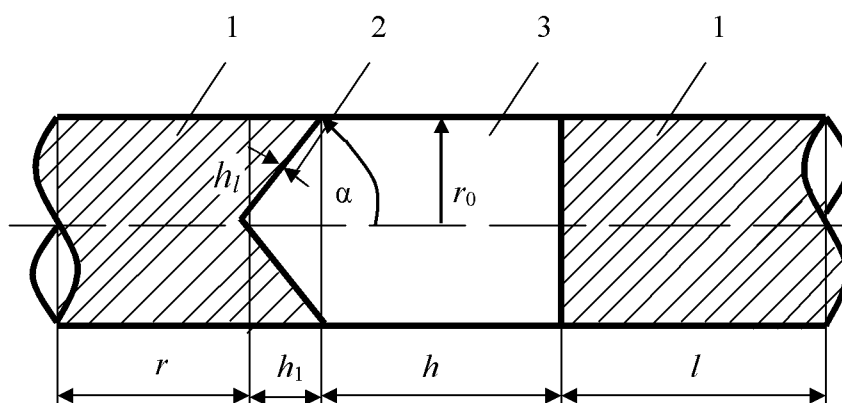


Рис. 1. Конструкция рассредоточенного ВП удлиненного цилиндрического заряда ВВ: 1 – ВВ; 2 – кумулятивная выемка; 3 – ВП

На рис. 1 приведены следующие обозначения: r – длина кумулятивного заряда до вершины выемки; h_1 – высота кумулятивной выемки; h – длина ВП; l – длина обычной цилиндрической части заряда.

Объем цилиндрического заряда с конической кумулятивной выемкой

$$V_0 = \pi r_0^2 (r + h_1) - \frac{1}{3} \pi r_0^2 h_1 = \pi r_0^2 \left(h + \frac{2}{3} h_1 \right). \quad (1)$$

Объем кумулятивной части заряда, которая участвует в образовании кумулятивного эффекта [6],

$$V_a = \pi r_0^3 / 3. \quad (2)$$

С технологической и экономической точек зрения принимаем кумулятивную выемку в виде полиэтиленовой формы с такими физико-механическими свойствами: плотность полиэтилена $\rho_j = 1,1 \text{ т/м}^3$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,4$; модуль упругости $E = 0,8 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

Масса полиэтиленовой облицовки для конической кумулятивной выемки

$$m_0 = \rho_j \pi r_0^2 \frac{h_1}{\cos \alpha} h_1. \quad (3)$$

Кумулятивная часть удлиненного заряда с ВП инициируется с торца, противоположного выемке. Считаем, что во всех точках облицовки выемки начальная скорость (средняя скорость обжатия облицовки) равна [6]

$$V_m = 0,41 \eta D_{\text{ВВ}} \sqrt{m_0 / m_a + 1/3}, \quad (4)$$

где $D_{\text{ВВ}}$ – скорость детонации ВВ; m_a – масса активной части заряда. Коэффициент η учитывает неполноту использования энергии активной части заряда и поправку на среднее увеличение угла наклона облицовки к оси при ее обжатии. Для нашего случая $\eta \leq 0,67$, поскольку технология изготовления кумулятивного заряда предусматривает его конусность (см. рис. 1).

Поскольку взрыв химических ВВ представляет собой экзотермическую реакцию, то можно полагать, что объем $\pi r_0^2(l+h)$ больше или равен объему продуктов детонации от взрыва заряда объемом $\pi r_0^2 l$ в момент, когда контактная поверхность выходит на основание кумулятивной выемки. В этом случае плотность продуктов взрыва $\rho_{\text{ПВ}}$ для рассматриваемых конструкций рассредоточенных зарядов [7] можно приблизительно оценить как отношение объема заряда ВВ плюс объем ВП рассредоточенного заряда к объему обычного цилиндрического заряда [6].

$$\left(\frac{\pi r_0^2 l}{\pi r_0^2 (l+h)} \right)^{-1} = \left(\frac{l}{l+h} \right)^{-1} = \frac{\rho_{\text{ПВ}}}{\rho_{\text{ВВ}}} \Rightarrow \rho_{\text{ПВ}} = \frac{\rho_{\text{ВВ}}(l+h)}{l}. \quad (5)$$

Плотность продуктов взрыва $\rho_{\text{ПВ}}$ можно также приближенно оценить, пользуясь теорией детонационных волн в конденсированных ВВ. Поскольку взрыв цилиндрической части рассредоточенного заряда генерирует сильную ударную волну, то для нее справедливо соотношение

$$\rho_{\text{ПВ}} = \rho_{\text{ВВ}} \frac{\kappa + 1}{\kappa}, \quad (6)$$

где κ – показатель изэнтропы ($P = A \rho^\kappa$).

Отметим, что $\kappa = 3$ предпочтительнее любых других значений, поскольку позволяет относительно просто решать различные задачи, связанные с одномерным разлетом продуктов детонации [6].

Как показывают результаты расчетов и экспериментов, плотность воздуха во фронте ударной волны примерно в 20...30 раз меньше плотности потока продуктов взрыва. Разница в плотности воздуха и кумулятивного потока еще больше значительна. Это еще раз подтверждает, что для достижения максимального эффекта кумулятивного заряда последний необходимо

инициировать таким образом, чтобы при взрыве рассредоточенного заряда момент образования кумулятивной струи совпадал с выходом контактной поверхности воздух промежутка–продукты взрыва цилиндрической части на основание кумулятивной выемки. Это условие позволяет определить время замедления инициирования кумулятивного и цилиндрического зарядов в рассредоточенном комбинированном заряде.

Для рассматриваемого случая необходимо обратить внимание на процесс образования кумулятивной струи для полиэтиленовой облицовки. Известно [6], что скорости движения элементов струи w_1 и песта w_2 определяются углом α , под которым элемент облицовки наклонен к осевой линии струи (см. рис. 1). Они определяются по формулам

$$w_1 = V_m \frac{1 + \cos\alpha}{\sin\alpha}; \quad w_2 = V_m \frac{1 - \cos\alpha}{\sin\alpha}. \quad (7)$$

Для конкретных зарядов угол α изменяется от 0° в апексе кумулятивной выемки до 60° в ее основе. Скорость прохождения кумулятивной струи из полиэтилена по продуктам взрыва рассчитывается по формуле

$$V_{\text{кв}} = w_1 \left(\sqrt{\rho_{\text{пв}} / \rho_j} + 1 \right). \quad (8)$$

Дополнительное давление, которое передается на стенку скважины за счет действия кумулятивной струи из полиэтилена, определяется по формуле

$$P = \rho_j w_1^2 \left(\sqrt{\alpha_1} + \sqrt{\frac{\alpha_2 \rho_j}{\rho_{\text{пв}}}} \right)^2, \quad (9)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты сжимаемости соответственно струи и продуктов взрыва. Примем $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, тогда из (9) получим

$$P = \rho_j w_1^2 \left(1 + \sqrt{\rho_j / \rho_{\text{пв}}} \right)^2. \quad (10)$$

Используя в этой формуле среднее значение $V_{\text{кв}}^{\text{ср}}$ для w_1 , получим среднее значение дополнительного давления на стенку скважины за счет прохождения полиэтиленовой кумулятивной струи по продуктам взрыва цилиндрической части рассредоточенного заряда. Время действия этого давления можно принять равным времени прохождения кумулятивной струей цилиндра высотой h (см. рис. 1), заполненного продуктами детонации, которые, в свою очередь, создают давление на стенки скважины:

$$\Delta t_p = 2h / w_1. \quad (11)$$

Таким образом, использование эффекта кумулятивного запираания продуктов взрыва цилиндрической части рассредоточенного заряда приводит к увеличению импульса давления на величину

$$\frac{\rho_j w_1^2}{\left(1 + \sqrt{\rho_j / \rho_{\text{гв}}}\right)^2} \frac{2h}{w_1} = \frac{2hw_1 \rho_j}{\left(1 + \sqrt{\rho_j / \rho_{\text{гв}}}\right)^2}, \quad (12)$$

что способствует повышению интенсивности взрывного разрушения горных пород.

Для определения скорости ударной волны в воздушном промежутке при взрыве заряда такой конструкции воспользуемся соотношениями для сильной ударной волны [6]:

$$D_{\text{уд}} = \frac{\kappa_a + 1}{2} U_{\text{уд}}; \quad P_{\text{уд}} = \frac{\kappa_a + 1}{2} \rho_a U_{\text{уд}}^2, \quad (13)$$

где $\kappa_a \ll 1, 2$ – показатель изэнтропы для воздуха (атмосферы); $U_{\text{уд}}$ – скорость ударной волны; ρ_a – начальная плотность воздуха.

Приняв $P_{\text{уд}} = \frac{\rho_{\text{ВВ}} D_{\text{ВВ}}^2}{8}$, получим выражение для $U_{\text{уд}}$:

$$U_{\text{уд}} = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{ВВ}} D_{\text{ВВ}}^2}{\rho_a 8(\kappa_a + 1)}} = \frac{D_{\text{ВВ}}}{2} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ВВ}}}{\rho_a (\kappa_a + 1)}}. \quad (14)$$

Таким образом, если цилиндрический и кумулятивный заряды состоят из одного и того же ВВ, и оба инициируются с концов противоположных ВП, то время прохождения детонационных волн от взрыва этих зарядов будет соответственно равно: $t_1 = (r + h_1) / D_{\text{ВВ}}$; $t_2 = l / D_{\text{ВВ}}$, а время прохождения ударной волной ВП $t_3 = h / D_{\text{уд}}$.

Рассмотрим четыре случая инициирования комбинированного заряда:

1) $t_2 > t_1$, тогда для наиболее сильного действия кумулятивного эффекта при подрывании цилиндрического заряда время замедления $\Delta t_1 = t_2 + t_3 - t_1$;

2) $t_1 > t_2 + t_3$, тогда время замедления подрывания кумулятивного заряда $\Delta t_2 = t_1 - t_2 - t_3$;

3) когда $t_1 = t_2 + t_3$, тогда кумулятивный и цилиндрический заряды следует инициировать одновременно;

4) при использовании рассредоточенных зарядов, как правило, $l > r + h_1$, поэтому для создания условий, наиболее благоприятствующих увеличению кумулятивного эффекта, цилиндрический заряд следует инициировать на расстоянии m от ближнего торца к кумулятивной выемке, которое определяется из условия: $t_1 = t_3 + m / D_{\text{ВВ}}$; $m = D_{\text{ВВ}}(t_1 - t_3)$.

Следует отметить, что из условия $t_1 - t_3 > 0$ вытекает ограничение на размер ВП:

$$\frac{r + h_1}{D_{\text{ВВ}}} - \frac{h}{D_{\text{уд}}} > 0; \quad h > \frac{D_{\text{уд}}(r + h_1)}{D_{\text{ВВ}}}.$$

Результаты теоретических расчетов подтверждены данными экспериментальных взрывов скважинных зарядов указанной конструкции на железорудных карьерах Полтавского ГОКа [7]. Применение таких зарядов обеспечило повышение качества дробления горной массы. Выход мелких фракций в развале горной массы увеличился на 17,3%, выход негабаритных фракций снизился на 13,5%.

1. *Проблемы экологии массовых взрывов в карьерах* / Э. И. Ефремов, П. В. Бересневич, В. Д. Петренко и др. – Дніпропетровськ: Січ, 1996. – 179 с.
2. *Бережецький А. Я., Вороб'єв В. Д., Пашков А. П.* Технологии взрывных работ и оценка их конкурентоспособности на карьерах // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія “Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2003. – Вип. 9. – С. 39–53.
3. *Прокопенко В. С.* Фізико-технічні основи руйнування скельних порід вибухами свердловинних зарядів вибухових речовин у рукавах: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.15.11 / ННДІОП. – К., 2003. – 35 с.
4. *Кравець В. Г., Вороб'їов В. Д., Кузьменко А. О.* Підривні роботи на кар'єрах: Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1994. – 376 с.
5. *Ресурсосберегаючі технології взрывного руйнування горних порід* / Э. И. Ефремов, В. М. Комир, И. А. Краснопольский, В. П. Мартыненко. – К.: Техника, 1990. – 149 с.
6. *Физика взрыва* / Под ред. Л. Н. Орленко. Изд. 3-е, перераб. – В 2-х томах. – М.: Физматгиз, 2002, Т. 1. – 832 с.
7. *Пат. 6916 України, МПК F42D 1/02.* Кумулятивний замикаючий пристрій / В. Т. Щетінін, Г. В. Славко, Л. Д. Воробйова та ін. (Україна); Заявлено 04.01.05; Опубл. 16.05.05. – Бюл. № 5. – 3 с.