

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.235.5

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗРЫВНОГО ДРОБЛЕНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАССРЕДОТОЧЕННЫХ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ

А. П. Андриевский¹, Б. А. Ахпашев²

¹Институт химии и химической технологии СО РАН,
Академгородок, д. 50, стр. 24, г. Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, E-mail: 79050863461@yandex.ru,
пр. Красноярский рабочий, 95, 660025, г. Красноярск, Россия

Приведены расчетные формулы и схемы определения длины зарядов и инертных промежутков при формировании рассредоточенного заряда. В основу расчетов положена теория наложения волн напряжения в массиве при взрыве. Предлагаемая методика позволяет рассчитать параметры рассредоточенных скважинных зарядов для любых горно-геологических и горно-технологических условий производства взрывных работ, обеспечивающих качественное дробление массива, которое исключает разлет отбитой горной массы и снижает объем бурения.

Взрывная отбойка, рассредоточенные заряды, волны напряжений, зона трещин

При разрушении горных пород взрывом в горной и строительной отраслях наибольшее распространение получил способ сплошного колонкового заряда. Однако не всегда результат взрыва с использованием такого заряда получается удовлетворительным. Происходит это, когда проектная длина заряда, выбранная согласно горно-геологическим и техническим условиям, оказывается или меньше, или больше оптимальной длины заряда [1–3], обеспечивающей получение качественного дробления и необходимой кучности разлета. В случае короткого заряда ухудшается качество дробления, растет выход негабарита. Применение длинных зарядов приводит к существенному разлету отбитой горной массы.

Одним из способов решения проблемы оптимизации взрывных работ является использование рассредоточенного заряда. Несмотря на его высокую эффективность, улучшение качества дробления и кучный развал отбитой горной массы после взрыва [4], он не получил широкого распространения. Объясняется это усложнением технологии производства взрывных работ и отсутствием научно обоснованных параметров формирования заряда. Как правило, параметры заряда определяются экспериментально и при изменении горно-геологических условий полученные ранее параметры не дают желаемых результатов.

Для обоснования параметров формирования рассредоточенного заряда рассмотрим схему его работы (рис. 1). При взрыве удлиненного заряда в массиве формируется зона разрушения (трещин) в виде фигуры, состоящей из цилиндра радиусом R вдоль заряда и примыкающего к нему со стороны недозаряда — полукруга, имеющего в осевом сечении полуокружности радиусом $0.5R$.

Данная фигура сформируется, если продольная волна, распространяющаяся в массиве от точки инициирования заряда, успеет охватить фигуру разрушения за период действия взрывной нагрузки, в противном случае эта зона трещин будет ограничена продольной волной, пройденной за период действия взрывной нагрузки [5].

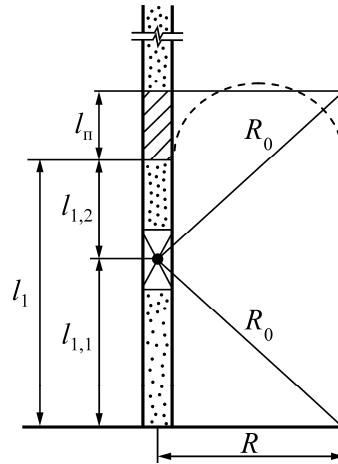


Рис. 1. Схема работы первой (призайбойной) части заряда: l_1 — длина заряда; l_n — длина промежутка между зарядами; R — радиус зоны разрушения цилиндрического заряда; R_0 — радиус оптимального распространения продольной волны за время действия взрывного импульса; • — точка инициирования заряда, штриховая линия — граница зоны разрушения со стороны промежутка между зарядами

Таким образом, для обоснования параметров рассредоточенного заряда необходимо определить минимально допустимый размер (длину) заряда, обеспечивающий прохождение продольной волны за период действия взрывной нагрузки, а также максимально возможный размер инертного промежутка, в котором возникающие напряжения в массиве от действия двух ступеней заряда достаточны для его разрушения.

В зависимости от принятой схемы инициирования удлиненного заряда время действия взрывного импульса (с достаточной степенью точности) рассчитывается из выражений [5, 6]:

$$t_n = \frac{l}{D}; \quad t_c = 2 \frac{0.5l}{D}; \quad t_o = \frac{2l}{D}, \quad (1)$$

где t_n, t_c, t_o — время действия взрывного импульса для прямого, центрального и обратного инициирования, мс; l — длина заряда, м; D — скорость детонации применяемого ВВ, м/с.

Исходя из (1) примем, что время действия взрывного импульса в любой точке инициирования призайбойной части заряда (рис. 1) определяется так:

$$t = \begin{cases} t_{1,2}, & \text{если } t_{1,2} > t_{1,1}; \\ t_{1,1}, & \text{если } t_{1,1} > t_{1,2}, \end{cases}$$

где $t_{1,2} = 2l_{1,2} / D$ — обратное инициирование (для заряда l_1); $t_{1,1} = 2l_{1,1} / D$ — прямое инициирование (для заряда l_1).

Минимальная длина первой призайбойной части заряда удовлетворяет равенству $R_0 = 2l_{1,2}c / D$, где R_0 — расстояние, пройденное продольной волной за период действия взрывной нагрузки, м; $l_{1,2}$ — длина первой (призайбойной) части заряда, м; c — скорость распространения продольной волны в массиве, м/с.

Из условия реализации разрушения в цилиндре диаметром $2R$ следует, что расстояние, на которое должна уйти волна напряжений, находится в зависимости от необходимого (принятого) размера инертного промежутка (рис. 1):

$$R_0 = \sqrt{(l_{1,2} + l_n)^2 + R^2}. \quad (2)$$

Здесь $R = 0.21dg^{0.75}D^{0.75}\sigma^{-0.25}\tau^{-0.5}K_c^{-0.5}$ — радиус зоны трещин в разрушаемом массиве, м [7]; l_n — длина инертного промежутка, м; d — диаметр заряда, м; g — плотность заряжения, кг/м³; σ — предел прочности пород на сжатие, Па; τ — предел прочности пород на срез, Па; $K_c = 1/(0.97 + 0.13(R_i/l))$ — коэффициент структурного ослабления массива, где l — расстояние между трещинами, м; R_i — радиус зоны трещин в монолитном массиве, м.

Из (2) для $l_{1,2}$ следует:

$$\sqrt{(l_{1,2} + l_n)^2 + R^2} = \frac{2l_{1,2}c}{D}. \quad (3)$$

После преобразований из (3) получаем минимально допустимую длину первой призабойной части заряда:

$$l_{1,2} = \frac{-2l_n \pm \sqrt{4l_n^2 - 4\left(\frac{D^2 - 4c^2}{D^2}\right)(l_n^2 + R^2)}}{2\left(\frac{D^2 - 4c^2}{D^2}\right)}.$$

Вторая часть первой ступени заряда определится следующим образом:

$$R_0 = \sqrt{l_{1,1}^2 + R^2} = \frac{2l_{1,2}c}{D},$$

или после преобразований:

$$l_{1,1} = \frac{\sqrt{4l_{1,2}^2c^2 - R^2D^2}}{D}.$$

Окончательно для первой ступени заряда имеем два значения:

— минимальное

$$l_{1,2} = \frac{-2l_n \pm \sqrt{4l_n^2 - 4\left(\frac{D^2 - 4c^2}{D^2}\right)(l_n^2 + R^2)}}{2\left(\frac{D^2 - 4c^2}{D^2}\right)};$$

— максимальное

$$l_1 = l_{1,2} + l_{1,1} = \frac{-2l_n \pm \sqrt{4l_n^2 - 4\left(\frac{D^2 - 4c^2}{D^2}\right)(l_n^2 + R^2)}}{2\left(\frac{D^2 - 4c^2}{D^2}\right)} + \frac{\sqrt{4l_{1,2}^2c^2 - R^2D^2}}{D}.$$

На практике может быть $l_{1,2} \leq l_1 \leq (l_{1,1} + l_{1,2})$.

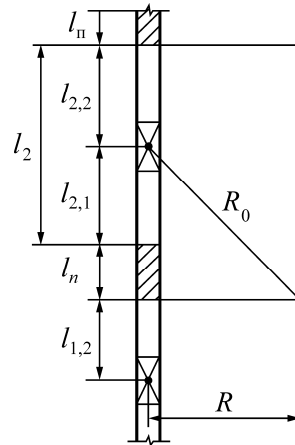


Рис. 2. Схема для определения длины второй (и последующих) степени заряда по продолжительности действия взрывной нагрузки

Рассмотрим работу второй и последующих ступеней заряда (рис. 2). Видно, что для обеспечения одновременности работы первой и второй ступеней заряда в массиве должно соблюдаться условие $l_{2,1} = l_{1,2}$, а продолжительность действия взрывной нагрузки обеспечивается за счет работы второй ступени $l_{2,2}$ рассредоточенного заряда.

Из условия реализации разрушения в цилиндре диаметром $2R$ находим

$$R_0 = \sqrt{(l_{2,1} + l_n)^2 + R^2} = \frac{2l_{2,2}c}{D},$$

после преобразований

$$l_{2,2} = \frac{D\sqrt{(l_{2,1} + l_n)^2 + R^2}}{2c}.$$

Окончательно для второй и последующих ступеней заряда получим $l_2 = l_{2,1} + l_{2,2}$ или

$$l_2 = \frac{-2l_n \pm \sqrt{4l_n^2 - 4\left(\frac{D^2 - 4c^2}{D^2}\right)(l_n^2 + R^2)}}{2\left(\frac{D^2 - 4c^2}{D^2}\right)} + \frac{D(l_{2,1} + l_n)^2 + R^2}{2c}.$$

Размер инертного промежутка необходимо определять с учетом одновременного действия двух ступеней заряда (рис. 3) и возникающих при этом напряжений в самой удаленной от торцов зарядов точке B разрушаемого цилиндра радиусом R .

При воздействии давления от продуктов детонации цилиндрического заряда в массиве, представляемом в виде толстостенной трубы, возникают две компоненты тензора напряжений: σ_r и σ_τ (тангенциальные и радиальные).

При бесконечно большом наружном радиусе трубы имеем:

$$\sigma_r = \frac{-Pr^2}{r_i^2}, \quad \sigma_\tau = \frac{Pr^2}{r_i^2},$$

где r — радиус заряда, м; P — давление продуктов детонации, Па; r_i — текущий радиус, м.

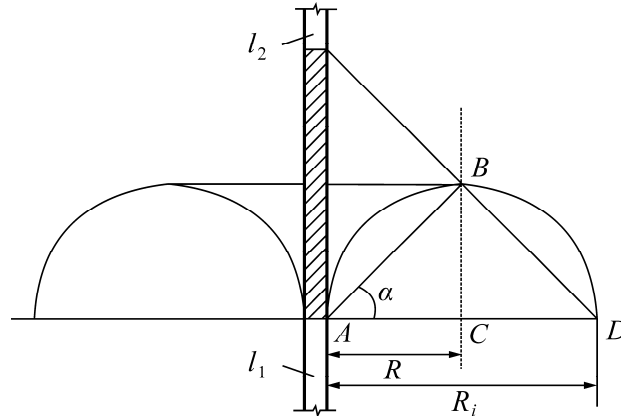


Рис. 3. Схема для определения размера инертного промежутка по допускаемым (необходимым) напряжениям, возникающим в массиве, при разрушении рассматриваемого объема

Это означает, что труба с бесконечно большим наружным радиусом находится в условиях чистого сдвига [8]. Согласно третьей теории прочности, получаем для максимального сдвигающего напряжения τ_i на расстоянии R_i и R :

$$\tau_i = \frac{2Pr^2}{R_i^2}, \quad [\tau] = \frac{2Pr^2}{R^2} \quad \text{или} \quad \tau_i = [\tau] \left(\frac{R}{R_i} \right)^2,$$

где $[\tau]$ — предельно допустимое напряжение среза разрушаемого массива; R_i — радиус цилиндра, соответствующий полутор которого проходит через точку B .

Искомый радиус цилиндра R_i находится следующим образом:

из ΔABC следует

$$AB = \frac{R}{\cos \alpha};$$

из ΔABD

$$R_i = \frac{AB}{\cos \alpha} = \frac{R}{\cos^2 \alpha}.$$

Окончательно имеем

$$\tau_i = [\tau] \cos^4 \alpha.$$

Тогда для суммарного напряжения в точке B (рис. 3) от действия двух ступеней заряда находим

$$\tau = 2\tau_i = 2[\tau] \cos^4 \alpha.$$

Поскольку суммарное напряжение в точке B должно быть больше либо равно предельно допускаемому напряжению на срез, имеем:

$$[\tau] = 2[\tau] \cos^4 \alpha,$$

откуда

$$\cos \alpha = \sqrt[4]{0.5} = 0.84 \quad \text{или} \quad \alpha = \arccos(0.84) = 33^\circ.$$

При этом определяется размер инертного промежутка (рис. 3):

$$l_{II} = 2R \operatorname{tg} 33^\circ = 2R \cdot 0.64 \approx 1.28R.$$

Из изложенного следует, что при одновременном действии в массиве двух смежных ступеней зарядов максимальный размер инертного промежутка (с учетом возможных отклонений) может быть $1.2R$. Однако в настоящее время отсутствуют технические средства инициирования зарядов, обеспечивающие одновременное их срабатывание (электронные взрыватели [9] имеют разброс по времени ± 1 мс, что в данных условиях недопустимо, так как за этот период волна напряжений в массиве уйдет на 4–10 м).

Учитывая этот фактор, для обеспечения гарантированного эффекта размер инертного промежутка можно принять $0.6R$ (или окончательно $l_n = (0.1 - 0.6)R$). При этом количество ступеней заряда определится из выражения

$$l_c = l_n + l_1 + nl_2 + (n-1)l_n,$$

где l_c — длина заряжаемой скважины (шпура), м; $l_n = 0.5R$ — длина недозаряда, м; $n = (l_c - l_n - l_1 + l_n)/(l_2 + l_n)$ — количество ступеней заряда.

Следовательно, возможны два варианта формирования ступенчатого заряда:

$$n_{\max} = \frac{l_c - l_n - l_{1,2} + 0.1}{l_2}, \quad n_{\min} = \frac{l_c - l_n - l_1 + 0.6R}{l_2 + 0.6R}.$$

Окончательно выбирается целое число ступеней заряда в промежутке между n_{\min} и n_{\max} и уточняются параметры формируемого заряда в ступенях.

ВЫВОДЫ

Предлагаются методические положения по формированию рассредоточенного заряда для любых горно-геологических и горно-технологических условий производства взрывных работ, обеспечивающие качественное дробление массива. При этом исключается разлет отбитой горной массы и перебур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский А. П., Зуев А. Е. Методика определения параметров взрывания шпуровых и скважинных зарядов, позволяющих исключить перебур и минимизировать выход негабарита // Совр. проблемы науки и образования. — 2013. — № 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9081>.
2. Кабетенов Т., Юсупов Х. А., Рустемов С. Т. Определение рациональных параметров скважинной отбойки с учетом времени действия взрывного импульса // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 75–81.
3. Кочанов А. Н., Одинцев В. Н. Волновое предразрушение монолитных горных пород при взрыве // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 38–48.
4. Федотенко С. М., Гришин С. В., Кокин С. В. и др. Оптимизация взрывных работ путем рассредоточения заряда в скважинах на разрезах // ГИАБ. — 2008. — № 3. — С. 260–266.
5. Андриевский А. П. Новые теории и технологии взрывных работ на горнорудных предприятиях. LAP LAMBERT Academic Publishing is Trademark of: AV Akademikerverlag GmbH Co. KG Germany, 2013. — 270 с. YSNB: 978-3-659-36033-6.
6. Миндели Э. О. Разрушение горных пород. — М.: Недра, 1974. — 600 с.
7. Кутузов Б. Н., Андриевский А. П. Новая теория и новые технологии разрушения горных пород удлиненными зарядами взрывчатых веществ. — Новосибирск: Наука, 2002. — 96 с.
8. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. — М.: Высш. шк., 1982. — 264 с.
9. Вандакуров А. Н. Высокотехнологичные разработки в области средств инициирования // Горн. пром-сть. — 2013. — № 5(111). — С. 20–23.

Поступила в редакцию 21/VI 2016