УДК 622.235

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЗМЕРОВ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ В СКАЛЬНЫХ ПОРОДАХ

***А. М. Масюкевич, канд. физ.-мат. наук (ННИИПБОТ), В. Д. Воробьев, докт. техн. наук, О. Я. Твердая, асп. (НТУУ «КПИ»), В. С. Прокопенко, докт. техн. наук (ЧАО «Техновзрыв»)***

*На основі енергетичного підходу обґрунтовано аналітичну залежність для визначення усередненого радіуса воронки подрібнення при підриванні подовженого заряду. Показано, що її використання при проектуванні мережі свердловин зумовлює проробку підошви уступу без зниження якості гірничої маси.*

*Ключові слова: вибух, воронка подрібнення, гірська порода, заряд, радіус, уступ, енергія.*

*На основе энергетического подхода обоснована аналитическая зависимость для определения усредненного радиуса воронки дробления при взрыве удлиненного заряда. Показано, что ее использование при проектировании сетки скважин обусловливает проработку подошвы уступа без снижения качества горной массы.*

*Ключевые слова: взрыв, воронка дробления, горная порода, заряд, радиус, уступ, энергия.*

*Analytical dependence for the determination of the average radius of the explosion crater during the explosion of elongated charge regarding to the energy approach is substantiated. Using of this dependence in the design of hole spacing makes it possible to elaborate the bench-floor without reducing the rock quality.*

*Keywords: explosion, crushing cone, rock, charge, radius, bench, energy.*

**Введение.** Многолетней практикой доказано, что эффективность и безопасность производства взрывных работ (ВР) на карьерах определяется на стадии проектирования их параметров. При этом качество подготовки горной массы зависит от многих факторов, среди которых основными являются геометрические параметры расположения зарядов на уступе карьера. Эти параметры варьируют в широких пределах и зависят не только от параметров взрыва, но и от состояния взрываемого массива горных пород.

Общеизвестно, что взрыв заряда происходит в массиве, нарушенном воздействием предыдущих взрывов. С увеличением количества взрывов степень нарушенности повышается. Поэтому при проектировании сетки скважинных зарядов необходимо учитывать зону разрушения пород, которая включает зону дробления (воронка выброса горных пород) и зону трещинообразования (ослабления). Размеры этих зон оцениваются соответствующими радиусами $r_д$ и $r_{тр}$ по поверхности уступа. При прочих равных условиях, но с увеличением многократных взрывных нагрузок радиусы этих зон изменяются и могут быть различными даже в одних и тех же породах. Поэтому при проектировании расстояний между зарядами необходимо использовать научно обоснованные (с позиций энергетического подхода) радиусы этих зон.

**Цель работы** – обоснование радиусов воронки дробления и зоны трещинообразования по длине скважинного заряда на основе энергетического подхода при отработке уступов скальных пород на карьерах.

**Изложение основного материала исследований.** Воздействие взрыва зарядов взрывчатых веществ (ВВ) на массив горных пород за пределами зоны дробления приводит к изменению физико-механических свойств, а следовательно, к появлению зоны трещинообразования. В этой зоне прочность массива пород по сравнению с первоначальной снижается до критического значения [1]. Это обусловлено многократным импульсным воздействием взрывных нагрузок серии зарядов. Согласно [1] размеры зоны трещинообразования зависят от физико-механических свойств пород, типа и массы ВВ, диаметра заряда и могут колебаться в пределах от 7 до 18 м (рис. 1). С увеличением крепости пород величина $r_{тр}$ уменьшается в 3–4 раза. На рис. 1 приведены обобщенные данные экспериментов для трудновзрываемых пород (граносиениты среднезернистые и граниты) прочностью 150–160 МПа и средневзрываемых (нарушенные трещинами сланцы) прочностью 85–95 МПа.

Следует полагать, что радиус зоны разрушения при взрыве в горном массиве определяется радиусом зоны дробления $r_д$ и радиусом зоны трещинообразования $r_{тр}$ с идентичной конфигурацией образующих этих зон по длине заряда. Величину $r_{тр}$ в дальнейшем представим как приращение до $r_д$, равное $\Delta r_{тр}$ (рис. 2).

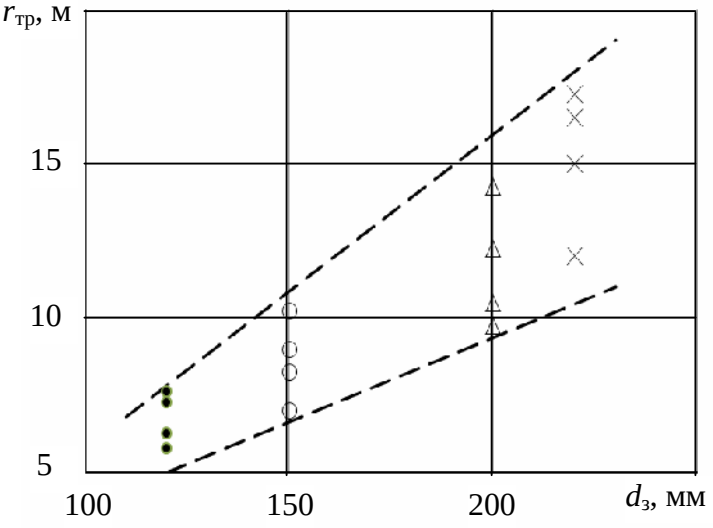


Рис. 1. Зависимость изменения радиуса зоны трещинообразования $r_{тр}$ от диаметра заряда $d_з$ [1]: • – $d_з$ = 125 мм; ○ – $d_з$ = 150 мм; Δ – $d_з$ = 200 мм; × – $d_з$ = 214 мм

При использовании энергетического подхода к определению радиуса зоны разрушения расход потенциальной энергии $E_{ПЭ}$ в процессе изменения внутренней энергии $E_{ВЭ}$, затраченной на образование поверхностной энергии разрушаемых кусков породы, и поверхностной энергии вновь образованных трещин $E_{ПТ}$ примет вид:

$$E_{ПЭ} = E_{ВЭ} + E_{ПТ}. \quad (1)$$

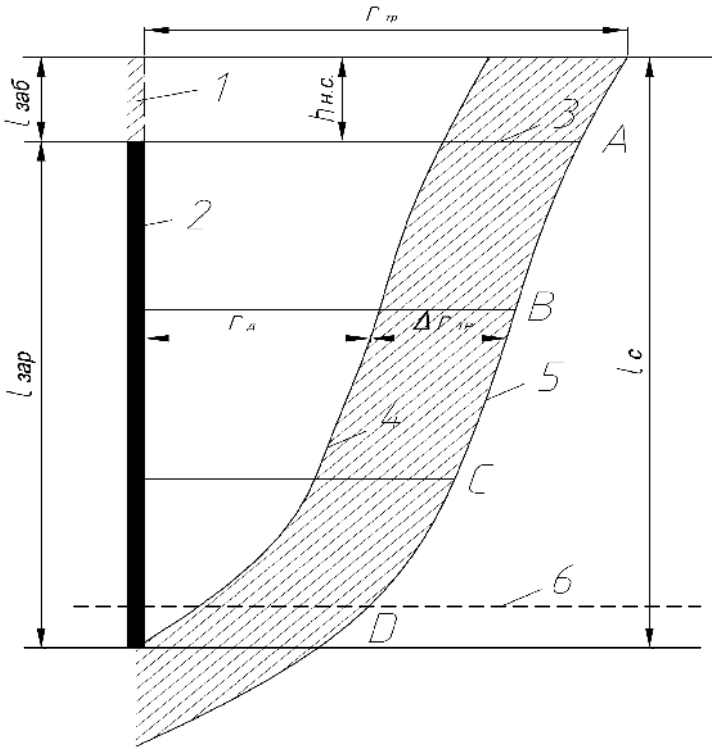


Рис. 2. Схема к пояснению идентичности контуров воронки дробления [2] и зоны трещинообразования [1] при взрыве зарядов ВВ: *1* – забойка; *2* – заряд ВВ; *3* – граница раздела забойки и заряда; *4*, *5* – контуры воронки дробления и зоны трещинообразования по длине заряда ВВ; *6* – проектная отметка по подошве уступа

Потенциальная энергия продуктов взрыва (ПВ) или полная энергия заряда $E_{\text{ПЭ}}$ определяется формулой [3]:

$$E_{\text{ПЭ}} = M_0 \cdot Q = M_0 \cdot D^2 / 16, \tag{2}$$

где $M_0$ – масса заряда, кг; $Q$ – теплотворная способность ВВ, Дж/кг; $D$ – скорость детонации ВВ, м/с.

Как принято, перед фронтом ударной волны и за ним состояние среды изменяется изоэнтропически ($dS = 0$, где $S$ – энтропия ПВ). Внутренняя энергия ПВ в цилиндрической системе координат определяется формулой

$$E_{BE,i} = P\pi r_c^2 l_i / (k-1), \tag{3}$$

где $P$ – среднее давление ПВ в скважине по высоте $l_i$, Па, ($P = P_1\Delta^a$, где $P_1$ – химическое давление, Па; $\Delta$ – плотность заряжания, кг/м$^3$; $a$ – постоянная, равная приблизительно 2,5); $r_c$ – радиус скважины, м; $l_i$ – текущая «высота» заряда, которая сдетонировала, м (отсчет от дна скважины); $k$ – показатель степени изоэнтропы (чаще всего $k = 1{,}25$).

Понятие поверхностной энергии в физике твердого тела определено как энергетическое состояние атомного слоя вещества, выходящего на свободную поверхность тела. Некоторая часть атомных связей у атомов на поверхности тела является свободной, и эта часть энергии представляет собой свободную энергию поверхности, а ее поверхностная плотность – поверхностная энергия.

Это понятие использовал А. Гриффитс, положив $\sigma_n$ (удельная поверхностная энергия, приходящаяся на единицу длины, Дж/м$^2$) как меру

энергетических затрат при разрушении тел. Предложенная им модель основана на концепции энергетического баланса в теле, имеющим трещину длиной $l_{тр}$ в поле растягивающих напряжений $\sigma_{кр}$. При наличии в теле трещины длиной $l_{тр}$ его потенциальная энергия уменьшается на величину $\Delta E_{ПЭ}$ по сравнению с таким же телом без трещины:

$$\Delta E_{ПЭ} = -(\sigma_{кр}^2 / 4E)\pi l_{тр}^2, \tag{4}$$

где $\sigma_{кр}$ – критическое растягивающее напряжение, Па; $E$ – модуль Юнга, Па.

С другой стороны, тело с трещиной обладает дополнительной энергией поверхностного натяжения $E_{пов}$ на двух свободных поверхностях трещины:

$$E_{пов} = 2 \cdot \sigma_{п} \cdot l_{тр}. \tag{5}$$

Образование кусков породы при взрыве скважинного заряда означает образование поверхностей, то есть дробление можно представить как раскрытие естественных трещин и вновь образованных. Кроме того, как отмечено выше, от действия этого взрыва в породе образуются новые плотно сомкнутые трещины.

Общее изменение энергии породы с вновь образованными $m$ трещинами равно:

$$E_{общ} = m(-(\sigma_{кр}^2 / 4E)\pi l_{тр}^2 + 2\sigma_n l_{тр}). \tag{6}$$

Подставляя формулы (2), (3) и (6) в уравнение (1) получим:

$$M_0 Q = P\pi r_c^2 l_i /(k-1) + m(-(\sigma_{кр}^2 / 4E)\pi l_{тр}^2 + 2\sigma_n l_{тр}). \tag{7}$$

Число трещин $m$ определяется действием ударной волны на породу. Это давление $P_{рез}$ в каждой точке породы (слоя $i$) по длине детонировавшего заряда, полученное в работе [2], определяется формулой:

$$P_{рез,i} = P_{t,i} \sin(arctg(l_i / r_{тр,i})) + P_{r,i} \cos(arctg(l_i / r_{тр,i})), \tag{8}$$

где $r_{тр,i}$ – радиус разрушения, соответствующий длине заряда $l_i$, м; $P_{t,i}$ – тангенциальная составляющая силы, параллельная боковой поверхности скважины, равная величине $P_{Д,i}$, отнесенной к единице длины окружности ее дна, Па/м; $P_{r,i}$ – радиальная составляющая силы, нормальная к боковой поверхности скважины, равная величине $P_{Б,i}$, отнесенной к единице длины заряда $l_i$, Па/м; определяются формулами:

$$P_{t,i} = P_{Д,i} / 2\pi r_c; \qquad P_{r,i} = P_{Б,i} / l_i. \tag{9}$$

Величины давлений $P_{Б,i}$ и $P_{Д,i}$ как давления ПВ на боковую и на донную части поверхности скважины, определены в работе [2]:

$$P_{Б,i} = P\rho_{п,i}c_{п,i}/(\rho_{п,i}c_{п,i} - \rho_{ВР}D); \qquad P_{Д,i} = 2P_i\rho_{п,i}c_{n,i}/(\rho_{п,i}c_{п,i} + \rho_{ВВ}D), \quad (10)$$

где $\rho_{п,i}$ – плотность $i$-го слоя породы, кг/м$^3$; $c_{п,i}$ – скорость звука в $i$-ом слое породы, м/с; $\rho_{ВВ}$ – плотность ВВ, кг/м$^3$.

Давление $P_{рез}$, действуя на породу, приведет к ее дроблению и появлению новых трещин, то есть новых поверхностей, что определяется условием Гриффитса – образования и раскрытия трещин по формуле

$$P_{рез,i} = m(2E_i\sigma_{n,i}/\pi(1-\mu_i^2)l_{mp}^{'})^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

где $\mu_i$ – коэффициент Пуассона; $l^{'}_{mp}$ – полудлина трещины, м.

Решая систему уравнений относительно числа трещин $m$, получим уравнение для определения радиуса зоны разрушения $r_{mp,i}$:

$$M_{0,i}Q = P\pi r_c^2 l_i/(k-1) + P_{рез,i}(-(\sigma_{кр,i}^2/4E_i)\pi l_{mp}^2 + 2\sigma_{n,i}l_{mp}^2)/(2E_i\sigma_{n,i}/\pi(1-\mu_i^2)l_{mp}^{'})^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

в котором $r_{тр,i}$ входит в $P_{рез}$ и преобразовывается формулой вида:

$$\begin{aligned} &P_{t,i}\sin(arctg(l_i/r_{mp,i})) + P_{r,i}\cos(arctg(l_i/r_{mp,i})) = \\ &= (M_{0,i}Q - P\pi r_c^2 l_i/(k-1))\cdot(2E_i\sigma_{n,i}/\pi(1-\mu_i^2)l_{mp}^{'})^{\frac{1}{2}}/(-(\sigma_{кр,i}^2/4E_i)\pi l_{mp}^2 + 2\sigma_{n,i}l_{mp}^2). \end{aligned} \quad (13)$$

Для решения уравнения (13) относительно радиуса зоны трещинообразования $r_{тр,i}$ введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} y_i &= arctg(l_i/r_{mp,i}); \\ A_i &= (M_{0,i}Q - P\pi r_c^2 l_i/(k-1))\cdot(2E_i\sigma_{n,i}/\pi(1-\mu_i^2)l_{mp}^{'})^{\frac{1}{2}}/(-(\sigma_{кр,i}^2/4E_i)\pi l_{mp}^2 + 2\sigma_{n,i}l_{mp}^2). \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда уравнение (13) примет вид:

$$P_{t,i}\sin(y_i) + P_{r,i}\cos(y_i) = A_i. \quad (15)$$

Используя известные тригонометрические формулы, получим формулу для определения радиуса зоны трещинообразования:

$$r_{mp,i} = \frac{l_i(A_i^2 - P_{t,i}^2)}{P_{t,i}P_{r,i} \pm A_i\sqrt{P_{t,i}^2 + P_{r,i}^2 - A_i^2}}. \quad (16)$$

Исходя из [4] и (16), получим формулу для определения радиуса воронки дробления в любой точке по высоте заряда:

$$r_{д,i} = \frac{l_i (A_i^2 - P_{t,i}^2)}{4{,}6 \cdot (P_{t,i} P_{r,i} \pm A_i \sqrt{P_{t,i}^2 + P_{r,i}^2 - A_i^2})}. \qquad (17)$$

С целью более эффективной проработки подошвы уступа предлагается при проектировании сетки скважинных зарядов использовать усредненный по длине заряда радиус воронки дробления [5]. Согласно теореме Лагранжа величину усредненного радиуса воронки дробления $\overline{r_д}$ можно записать в следующем виде:

$$\overline{r_д} = \frac{\int_0^{l_з} (al^3 + bl^2 + cl + d)dl}{l_з}.$$

## Выводы

Обоснована формула для аналитического определения радиуса зоны дробления и зоны трещинообразования по высоте заряда на основе энергетического подхода, которые учитывают характеристики массива, технологические параметры предприятия и характеристики ВВ.

Предложено при определении расстояний между зарядами учитывать величину усредненного по длине заряда радиуса воронки дробления с целью использования в типовых проектах на взрывные работы.

1. *Норов Ю. Д.* Исследование зон ослабления горного массива при взрыве скважинных зарядов ВВ / Норов Ю. Д. // Научные основы управления состоянием горного массива. – 1985. – Вып. 235. – С. 96–104.

2. *Воробьев В. Д.* О радиусе воронки дробления в скальных породах при взрыве удлиненного заряда взрывчатого вещества / В.Д. Воробьев, А.М. Масюкевич, И. В. Косьмин // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – Зб. наук. праць. – 2002. – Вип. 7. – С. 44–54.

3. *Станюкович К. П.* Неустановившиеся движения сплошной среды / К. П. Станюкович. – М.: Наука, 1971. – 856 с.

4. *Ракишев Б. Р.* Прогнозирование технологических параметров взорванных пород на карьерах / Б. Р. Ракишев. – Алма-Ата: Наука, 1983. – 239 с.

5. *Твердая О. Я.* Обоснование эффективного радиуса воронки дробления при взрывах в анизотропных скальных породах / О. Я. Твердая, В. Д. Воробьев, А. И. Крючков // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – 2011. – Вип. 21. – С. 56–63.

*Надійшла до редакції 23.11.2012 р.*
*Рекомендовано до друку докт. техн. наук В. Д. Петренком*