УДК 622.235

А.В.ЖАРОВКИН
Институт проблем комплексного освоения недр, РАН, Москва, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСЧЕТА ОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ПО РАЗЛЕТУ КУСКОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ МАССОВЫХ ВЗРЫВАХ НА КАРЬЕРАХ

Предложен новый подход к расчету опасных расстояний при разлете горной породы при взрывах на карьерах в зависимости от линии наименьшего сопротивления.

The new approach to calculation of dangerous distances is offered at scattering rock at explosions on quarry depending on size of burden.

Анализ несчастных случаев горного производства, имевших место при взрывных работах в последние годы, показывает, что травмирование людей отдельными кусками взорванной горной массы за пределами расчетных (проектных) опасных зон продолжает случаться достаточно часто.

В «Единых правилах безопасности» (ЕПБ), действовавших до 1992 г., определяющим параметром, регламентирующим размеры опасных зон по разлету кусков породы, являлась величина линии наименьшего сопротивления заряда (ЛНС). При этом с увеличением ЛНС предполагалось существенное увеличение максимальной дальности разлета. Для взрывов рыхления (дробления) с показателями действия взрыва $n<1$ в условиях уступной отбойки такое увеличение справедливо, если линию наименьшего сопротивления рассматривать как символический интегральный параметр, отражающий мощность используемых зарядов (их диаметр, мощность и массу взрывчатого вещества) и сопротивляемость массива разрушению. На самом деле при взрывании одинаковых зарядов в одном и том же породном массиве дальность разлета кусков с увеличением ЛНС либо уменьшается, либо остается неизменной. Кроме того, в «старых» правилах безопасности не учитывалось и взаимодействие смежных зарядов.

В последней редакции «Единых правил безопасности при взрывных работах» отражено стремление учесть широкий реальный диапазон изменения параметров вертикальных скважинных зарядов рыхления, когда факт образования воронок выброса на откосе уступа отсутствует и наиболее интенсивный разлет кусков породы имеет место из зон, прилегающих к устью скважин. В этом случае, как показывает анализ экспериментальных данных, влияние ЛНС на максимальную дальность разлета существенно. Формула Единых правил безопасности для расчета дальности разлета кусков породы при взрывании колонковых скважинных зарядов в последней редакции имеет вид

$$r = 1250\eta_1\sqrt{\frac{f}{1+\eta_2}\frac{d}{a}}, \qquad (1)$$

где η_1 – коэффициент заполнения скважины ВВ; η_2 – коэффициент заполнения скважины забойкой; f – коэффициент крепости пород по шкале Протодьяконова; d – диаметр взрываемой скважины, м; a – расстояние между скважинами в ряду или между рядами, м.

Нетрудно заметить, что все параметры формулы (1) являются величинами относительно безразмерными (кроме числового коэффициента). Таким образом, и для шпуровых зарядов малого диаметра, и для скважинных зарядов диаметром 250 мм при равенстве d/a, η_1, η_2 и f прогнозная оценка дальности разлета одинакова, что противоречит экспериментальным данным.

Таким образом, к числу основных факторов, определяющих дальность разлета отдельных кусков горной массы при взрыве скважинных зарядов, следует отнести:

- параметры единичного заряда, характеризующие его мощность, конструкцию и ориентацию (наклон);
- взаимное расположение одновременно взрываемых зарядов, характеризующее их взаимодействие;
- физико-механические (главным образом структурные, прочностные и плотностные) свойства массива, обуславливающие энергетическое поглощение разлетающимися фрагментами и их аэродинамические качества;
- топография земной поверхности, обуславливающая как направление, в котором разлетающиеся фрагменты испытывают наибольшие импульсы силы, так и сокращение либо увеличение продолжительности их полета из-за возможного перепада высот между поражаемой поверхностью и взорванным участком.

Полное рассмотрение задачи о движении выброшенной взрывом породы представляет большие трудности. Это объясняется следующими обстоятельствами:

- При взрыве зарядов в грунтах и горных породах происходит их дробление на элементы различного размера – от мельчайших пылинок до весьма крупных кусков, размер которых при некоторых условиях достигает нескольких метров. Кроме того, при дроблении породы взрывом форма куска получается самая разнообразная. Так как ускорение тормозящей силы воздуха зависит от формы и массы летящего куска, то ввиду чрезвычайно широкого диапазона дробления породы и неопределенности формы отдельных кусков учет сопротивления воздуха для всей выброшенной массы породы представляет весьма сложную задачу.
- Начальная скорость движения выброшенных кусков породы не может быть определена достаточно точно. Хотя в настоящее время и разработаны формулы для вычисления начальной скорости выброса, однако они относятся к переднему фронту выброса. Скорости отдельных кусков породы за передним фронтом колеблются в достаточно широком диапазоне. Это относится также и к направлению выброса. Для сосредоточенных зарядов с показателем действия взрыва более 1,5 еще не исследован достаточно полно закон выброса элементов взрываемого объема, расположенных в стороне от ЛНС. Ошибка в начальной скорости приводит к достаточно большим погрешностям в расчетной дальности разлета породы. Например, если начальная скорость выброса известна с точностью ±10 % действительного ее значения, то это для очень крупных кусков приведет к разбросу расчетного значения дальности ±20 %.
- При движении куски выброшенной породы сталкиваются между собой в воздухе, в результате чего резко изменяется скорость и направление. Кроме того, при движении кусков породы плотной массы имеет место взаимное влияние на характер движения (так называемая интерференция). Большие возмущения вносят прорывающиеся продукты взрыва, которые истекают со скоростями, значительно превышающими скорость полета отдельных кусков. Продукты взрыва, увлекая отдельные куски породы, сообщают им чрезмерно большие скорости движения. Все это приводит к тому, что впереди основной массы выброшенной породы образуется рой быстролетящих кусков. Это явление хорошо наблюдается на крупномасштабных фотографиях взрывов на выброс, особенно в скальных породах.
- Следует учесть, что при движении кусков породы на малых расстояниях друг от друга воздух, находящийся между ними, также вовлекается в движение, что существенно изменяет первоначальные условия взаимодействия летящих кусков со средой и друг с другом. В частности, на снимках выброса можно видеть, что обычно сплошной поток грунта распадается на ряд конусообразных струй, из которых некоторые вырываются далеко вперед из основной массы летящей породы. Теоретическое рассмотрение этого явления было предпринято проф. Г.И.Покровским.

Из сказанного следует, что основная задача внешней баллистики (нахождение

закона движения брошенного тела в воздухе) не может быть решена без схематизации, упрощающей явление выброса.

Для упрощения решения основной задачи внешней баллистики примем следующие допущения:

1. Вектор силы сопротивления воздуха направлен в противоположную вектору скорости сторону. Это допущение основано на том факте, что кусок породы в процессе выброса получает вращение, которое не прекращается вплоть до падения на поверхность земли. Вращение куска на траектории приводит к тому, что вектор силы сопротивления будет совершать небольшие колебания симметрично около вектора скорости. Вращение куска породы таким образом нивелирует возможную парусность, которая, как известно, вызывает отклонение вектора силы сопротивления воздуха от направления потока.

2. Движущиеся в воздухе куски породы не взаимодействуют между собой от начала разрушения купола выброса до падения на свободную поверхность. Это допущение верно лишь на этапе выброса, когда куски породы вследствие радиальности разлетаются на достаточно большие расстояния, на которых интерференция уже не сказывается. На относительно малых расстояниях от центра взрыва, когда выброшенная взрывом масса породы движется достаточно компактно, принятое допущение не выполняется. Однако здесь необходимо учесть, что этот этап движения составляет небольшую долю от длины всей траектории. Вычисления показывают, что для взрывов на выброс сосредоточенных зарядов длина участка траектории, на котором еще существенны интерференция и соударения кусков, составляет менее 10 % всей траектории. Поэтому влиянием этих факторов на конечный результат решения задачи о законе движения можно пренебречь.

3. Принимаем атмосферу неподвижной. Влияние ветра на полет куска породы при необходимости можно учесть в виде поправок.

4. Не учитываем эффект Магнуса (возникновение поперечной силы, действующей на кусок породы, которая вращается при движении в воздухе), поскольку он в сравнении с действием силы сопротивления воздуха оказывает заметное влияние лишь на крупные куски при малых скоростях движения.

Уравнение движения куска породы в векторной форме имеет вид

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -b_c v\vec{v} + \vec{g}, \qquad (2)$$

где v – скорость движения; g – ускорение силы тяжести; t – время.

Уравнение будем решать в прямоугольной системе координат. Ось y направим вертикально вверх, ось x – по горизонту. Начало координат помещаем в центр тяжести рассматриваемого объема породы.

Проектируя векторы уравнения (2) на оси x и y, обозначая составляющие скорости по этим осям v_x и v_y соответственно и присоединяя две кинематические зависимости, получаем систему уравнений

$$\left.\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= -b_c v_x v; \\ \frac{dv_y}{dt} &= -b_c v_y v - g; \\ \frac{dx}{dt} &= v_x; \\ \frac{dy}{dt} &= v_y, \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

где $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

Начальные условия интегрирования этой системы при $t = 0$: $v_x = v_0 \cos\theta_0$; $v_{ó} = v_0 \sin\theta_0$; $x = 0$; $ó = 0$, где θ_0 – угол бросания, составляемый вектором скорости $\vec{v}_0$ с горизонтом.

Все уравнения системы зависимы, поэтому ее решение может быть выполнено только численными методами. Однако для приближенных расчетов можно составить упрощенную систему дифференциальных уравнений, которую можно проинтегрировать в конечном виде.

Будем считать, что так же, как и в пустоте, тело при движении в воздухе совершает два независимых движения: по направлениям вектора начальной скорости и силы тяжести. В том и другом случае на него действует сила сопротивления воздуха, величина которой соответствует составляющей скорости по этим направлениям.

Упрощенная система в косоугольной системе координат zOy (рис.1) состоит из следующих двух независимых дифференциальных уравнений:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2z}{dt^2} &= -b_c v_z^2; \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= g - b_c v_y^2, \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

где z – координатная ось, направленная по вектору начальной скорости v_0; y – координатная ось, направленная по вектору силы тяжести; v_z и v_y – скорости независимых движений по осям координат.

Начальные условия интегрирования этой системы: $t = 0$, $z = 0$, $y = 0$, $v_z = v_0$, $v_y = 0$.

Решение уравнений (4) имеет вид

$$\left.\begin{aligned} z &= \frac{1}{b_c}\ln\left[1 + b_c v_0 t\right]; \\ y &= \frac{1}{b_c}\ln\frac{e^{2t\sqrt{b_c g}} + 1}{2e^{t\sqrt{b_c g}}}. \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Полученное уравнение можно легко решить с помощью компьютерной программы, разработанной ИПКОН РАН. Данная программа для расчета дальности вылета отдельных кусков горных пород также учитывает топографию земной поверхности места проведения взрывных работ.

Начальными данными для расчета являются: начальная скорость вылета куска; масса куска; плотность породы; угол вылета; коэффициент сопротивления воздуха; превышение земной поверхности по заданному направлению полета куска.

Все эти значения за исключением начальной скорости и коэффициента сопротивления воздуха можно задать условно.

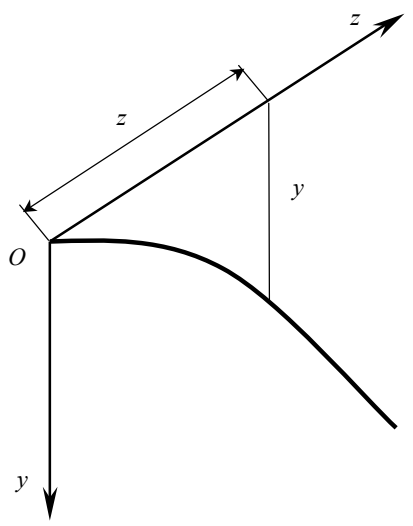


Рис.1. Косоугольная система координат

Коэффициент сопротивления воздуха*

$$b_c = \frac{1{,}3}{x_к \rho}, \qquad (6)$$

где $x_к$ – размер куска, м; ρ – плотность куска, кг/м^3.

Расчет начальной скорости основан на примере закона внутренней баллистики:

$$u = \left[\frac{2Sx}{m}\left(p_0 - p_1\right)\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (7)$$

где u – скорость куска; S – площадь поперечного сечения; x – часть длины скважины, по которой движется кусок; m – масса куска; p_0 – давление газа в скважине; p_1 – противодавление.

Формула (7) не учитывает сжимаемости газа, его вязкости и теплопроводности и является верхней оценкой.

Учет сжимаемости газа приводит к следующим оценкам. При дозвуковых скоростях статическое давление в движущемся за куском газе (толкающем кусок) запишем в виде

$$p_{ñò} = p_0\left(1 + \frac{k-1}{2}M^2\right)^{-k/k-1},$$

* *Черниговский А.А.* Применение направленного взрыва в горном деле и строительстве. М.: Недра, 1976. 318 с.

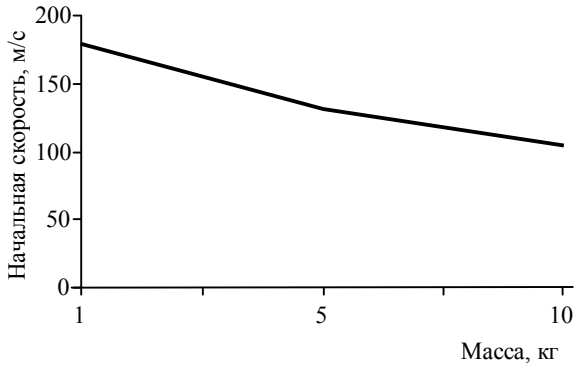


Рис.2. Зависимость начальной скорости движения куска от его массы

где k – отношение теплоемкостей, $k = 1{,}2 \div 1{,}6$; M – число Маха толкающего газа в скважине.

Используем известное соотношение энергии:

$$\frac{2}{k-1}a^2 + u^2 = \frac{2}{k-1}a_0^2,$$

где a_0 – скорость звука в неподвижном газе.

Статическое давление, которое действует на кусок,

$$p_{\text{ñò}} = \delta_0 \left(1 + \frac{k-1}{2} \frac{u^2}{a_0^2 - \frac{k-1}{2}u^2} \right)^{-k/k-1}$$

или

$$p_{\text{ñò}} = p_0 \left(1 - \frac{k-1}{2}\frac{u^2}{a_0^2} \right)^{k/k-1}.$$

Противодавление, действующее на кусок, можно записать как давление торможения воздуха, набегающего на неподвижный кусок со скоростью куска

$$\delta_{\text{ïð}} = \delta_{\text{àòì}} \left(1 + \frac{k^*-1}{2} M^2 \right)^{k^*/k^*-1}.$$

Таким образом, уравнение движения куска имеет вид

$$m\frac{du}{dt} = S(p_{\text{ñò}} - \delta_{\text{ïð}})$$

или

$$\frac{m}{p_0 S}\frac{du}{dt} =$$

$$= \left(1 - \frac{k-1}{2}\frac{u^2}{a_0^2} \right)^{k/k-1} - \frac{p_{\text{àòì}}}{\delta_0} \left(1 + \frac{k^*-1}{2} M^2 \right)^{k^*/k^*-1},$$

где k, k^* – показатели адиабаты толкающего и внешнего газа соответственно.

Наиболее простое решение получим в случае, когда можно пренебречь значением противодавления, т.е. $\delta_{\text{àòì}} / \delta_0 << 1$. Тогда уравнение движения примет вид

$$\frac{m}{p_0 S} u \frac{du}{dx} = \left(1 - \frac{k-1}{2}\frac{u^2}{a_0^2} \right)^{k/k-1}.$$

Разложим правую часть и учтем первый член разложения, что соответствует условиям несжимаемой жидкости:

$$\frac{m}{p_0 S} u \frac{du}{dx} = 1 - \frac{k}{2}\frac{u^2}{a_0^2}.$$

Данное уравнение есть уравнение с разделяющимися переменными:

$$\frac{d(\alpha^2 u^2)}{1 - \alpha^2 u^2} = 2 g_0 \alpha^2 dx,$$

где $Sp_0 / m = g_0$ – начальное ускорение; $\alpha^2 = k / 2a_0^2$.

Решение этого уравнения запишем в виде

$$u = \frac{1}{\alpha}\left[1 - \exp\left(-2 g_0 \alpha^2 x \right) \right]^{\frac{1}{2}}.$$

На рис.2 варьируемым параметром является масса куска, при этом кусок находится в устье скважины и расстояние от эпицентра взрыва до куска составляет 5 м.