УДК 622.235.001.1

О ПРИНЦИПЕ РАВНОМЕРНОГО ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВЗРЫВОМ

В. М. Кузнецов, Е. Н. Шер

(*Новосибирск*)

В современной горнодобывающей промышленности при использовании взрыва проблема получения кусков заданных размеров актуальна. Известно [1], что в обычных условиях взрыва получаются куски самых разнообразных форм и размеров. Экономически невыгодно как получение кусков большого размера (негабарит), так и излишнее измельчение породы или руды. Различные способы взрывания [2—4], применяемые в настоящее время на карьерах и рудниках, не дают удовлетворительного решения данной проблемы. В данной работе излагается принципиальная схема взрывания, обеспечивающая теоретически абсолютную равномерность дробления среды.

При построении схемы принимаются следующие упрощающие предположения:

а) среда является идеальной и несжимаемой;

б) действие взрыва характеризуется только импульсным давлением

$$P=\int_0^\infty p(t)\,dt,$$

где $p(t)$ — давление.

Первое предположение об идеальности среды основывается на том, что в ближней и средней зонах взрыва касательные напряжения в среде оказываются много меньше среднего гидростатического давления и ими в первом приближении можно пренебречь. Малая сжимаемость горных пород обычно слабо влияет на кинематику движения основной массы породы, особенно при наличии свободных поверхностей, поэтому можно сделать предположение о несжимаемости.

Второе предположение основывается на том, что, с одной стороны, можно пренебречь смещениями границ среды за время приложения взрывной нагрузки, а с другой — за это время ударные волны успевают несколько раз пробежать по разрушаемому объему породы.

Эти предположения существенно упрощают математическое описание процесса взрыва в твердой среде и в то же время, в некоторых случаях [5, 6], позволяют сохранить в модели существенные черты реального явления. Мгновенное поле скоростей $\mathbf{v}$, в рассматриваемой модели среды определяется формулой

$$\mathbf{v}=\operatorname{grad}\left(-\frac{P}{\rho}\right),$$

где ρ — плотность среды, и вводится величина $\varphi=-(P/\rho)$ — потенциал поля скоростей.

Ниже рассматривается плоская задача. Этот случай на практике приближенно реализуется при взрывании одного или нескольких рядов скважин в плоскости, перпендикулярной их оси. В плоском случае [7] можно ввести в рассмотрение комплексный потенциал $w(z)$

$$w(z)=\varphi(x, y)+i\psi(x, y),\quad z=x+iy. \tag{1}$$

Пусть задана область G в плоскости z, ограниченная выпуклой кривой. Необходимо расположить на поверхности Г слой взрывчатого вещества (ВВ) таким образом, чтобы после подрыва среда в области G была разрушена равномерным образом. Это требование сводится к созданию на поверхности Г такого потенциала φ, чтобы поле скоростей, определяемое комплексным потенциалом $w(z)$, привело к деформациям, в некотором смысле равномерным во всей области G. Прежде всего необходимо уточнить, о каких деформациях идет речь. Из физических соображений ясно, что при разрушении материала решающую роль играют сдвиги. Поэтому в качестве третьего предположения принимается следующий критерий разрушения: разрушение среды происходит при достижении в некоторой точке максимальных деформаций сдвига некоторой критической величины.

В данной постановке имеет смысл говорить только о скоростях деформаций. В плоском случае тензор скоростей деформаций имеет вид [8]

$$T_\xi = \begin{vmatrix} \xi_{xx} & \eta_{xy} \\ \eta_{xy} & \xi_{yy} \end{vmatrix},$$

где

$$(2) \qquad \xi_{xx} = \frac{\partial v_x}{\partial x}; \quad \xi_{yy} = \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \eta_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}\right),$$

v_x, v_y — компоненты вектора скорости. Максимальная скорость сдвига

$$(3) \qquad \eta_{\max} = \frac{1}{2}\sqrt{(\xi_{xx} - \xi_{yy})^2 + 4\eta_{xy}^2}.$$

Поле скоростей, возникающее в идеальной несжимаемой среде под действием импульсного давления, безвихревое

$$\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} = 0.$$

Кроме того, имеет место уравнение неразрывности

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0.$$

Первая производная комплексного потенциала (1) определяет комплексно сопряженную скорость

$$\frac{dw}{dz} = v_x - iv_y,$$

а вторая — компоненты тензора скоростей деформации

$$(4) \qquad \frac{d^2w}{dz^2} = \frac{\partial v_x}{\partial x} - i\frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{\partial v_y}{\partial y} - i\frac{\partial v_y}{\partial x} = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} - i\frac{\partial^2\varphi}{\partial x\partial y}.$$

Из (2), (4) получаем

$$\xi_{xx} = -\xi_{yy} = \mathrm{Re}\,\frac{d^2w}{dz^2};$$

$$\eta_{xy} = \mathrm{Im}\,\frac{d^2w}{dz^2},$$

а из (3) получаем

$$\eta_{\max} = \left|\frac{d^2w}{dz^2}\right|.$$

Подставляя сюда (4), получаем

$$\eta_{\max} = \left[\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x \partial y}\right)^2\right]^{1/2}.$$

Очевидно, разрушение материала в области G произойдет равномерным образом, если всюду внутри области максимальные скорости сдвигов будут равны одной и той же константе, являющейся прочностной характеристикой материала.

В работе [9] рассматривается критерий дробимости D, имеющий в плоском случае вид

$$D = 2\left[\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x \partial y}\right)^2\right].$$

Можно убедиться, что

$$D = 2\eta^2_{\max}.$$

Таким образом, критерий дробимости, введенный в [9] формально из энергетических соображений, имеет теперь ясный физический смысл. В работе [10] на основе этих представлений рассмотрена задача о взрыве на выброс одиночного шнурового заряда и произведен расчет расположения зарядов при однорядном взрывании.

Возвращаясь к задаче о равномерном дроблении, приходим к следующему выводу: на поверхности области G нужно обеспечить такое распределение импульсного давления, чтобы всюду внутри области выполнялось равенство

$$\left|\frac{d^2w}{dz^2}\right| = \text{const}.$$

В частном случае можно положить

$$\frac{d^2w}{dz^2} = \text{const}.$$

Тогда

$$w = Az^2 + Bz + C, \tag{5}$$

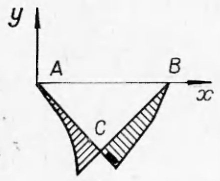
где A, B и C — комплексные постоянные.

Практическая реализация поля скоростей, описываемого потенциалом (5), иллюстрируется следующим примером. Пусть надо разрушить породу в объеме призмы с равнобедренным прямоугольным треугольником в основании (фиг. 1).

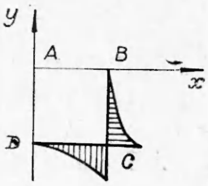
Действительный потенциал выбирается в виде

$$\varphi = axy, \quad (a = \text{const}).$$

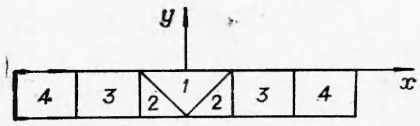
Начало координат и положение осей указаны на фиг. 1. Такой потенциал является частным случаем (5) и удовлетворяет условию равенства нулю



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

на свободной поверхности AB. Распределение потенциала на боковых поверхностях призмы на гранях AC и BC имеет вид

$$\varphi = -ax^2;$$
$$\varphi = -ax(|AB| - x).$$

Одна из возможных схем многорядного взрывания может быть такова. Рассмотренная треугольная призма представляет собой центральный вруб [4]. Затем по аналогичной схеме взрываются две соседние треугольные призмы, после чего последовательно взрываются прямоугольные призмы $\varphi=0$ на AB, AD; $\varphi=a\,|AB|\,x$ на DC; $\varphi=a\,|AB|\,y$ на BC (фиг. 2). Распределение потенциала на поверхности прямоугольной призмы показано на фиг. 3.

Переменное распределение потенциала, показанное на фиг. 1, 3, можно создать, например, закладывая в скважины, пробуренные вдоль соответствующих граней, разное количество ВВ, как это делалось при направленном взрыве [6]. Не исключено, что подобное распределение потенциала можно получить, регулируя время замедления при взрывании отдельных скважин и рядов скважин.

Поступила 28 X 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кошелев Э. А. и др.* Статистика осколков, образующихся при разрушении твердых тел взрывом.— ПМТФ, 1971, № 2.
2. *Лангефорс У., Кильстрем Б.* Современная техника взрывной отбойки горных пород. М., «Недра», 1968.
3. *Марченко Л. Н.* Увеличение эффективности взрыва при добывании полезных ископаемых. М., «Наука», 1965.
4. *Друкованый М. Ф.* Методы управления взрывом... М., «Недра», 1973.
5. *Лаврентьев М. А., Кузнецов В. М., Шер Е. Н.* О направленном метании грунта при помощи взрывчатого вещества.— ПМТФ, 1960, № 4.
6. *Кузнецов В. М.* Гидродинамические модели взрыва в грунте.— В кн.: Некоторые проблемы математики и механики. Л., «Наука», 1970.
7. *Лаврентьев М. А., Шабат Б. В.* Методы теории функций комплексного переменного. М., Физматгиз, 1958.
8. *Качанов Л. М.* Основы теории пластичности. М., Физматгиз, 1969.
9. *Власов О. Е., Смирнов С. А.* Основы расчета дробления горных пород взрывом. М., Изд-во АН СССР, 1962.
10. *Кузнецов В. М.* Гидродинамический расчет взрыва на выброс удлиненных зарядов ВВ.— ФТПРПИ, 1974, № 4.