

11. Дядечкин Н.И., Бабец Е.К., Штанько Л.А., Касьяненко Н.А. Подземная выемка руды с закладкой выработанного пространства неконсистентным материалом. «Металлургическая и горнорудная промышленность»; Днепропетровск, 2010. - 5. - С.90-92

12. Концепція розробки державної програми комплексного вирішення проблем Кривбасу / Разраб. рудн. месторожд. - Вып. 94. - Кривий Ріг: КТУ, 2011. - С.24-30.

13/ Бабец Е.К., Горлов Н.И., Жуков С.А. Ситуационное управление технологическими процессами добычи и переработки руд. Наука и образование, Днепропетровск, 2001. - 289с.

Рукопис подано до редакції 12.04.12

УДК 622.235

Я.В. ВАСИЛЬЧУК¹, аспирант, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Разработана математическая модель, которая позволяет определить скорость движения горных пород в условиях применения короткозамедленного взрывания, а также влияние на неё угла расположения скважинных зарядов.

Проблема и ее связь с научными и практическими знаниями. Действие взрыва в твёрдых телах, которое лежит в основе многочисленных задач взрывного дела, представляет собой достаточно сложную задачу, которая включает в себя различные физические процессы, такие как: распространение ударных волн, разрушение горных пород, неустановленное движение среды. Также очень важным является вопрос зависимости характера протекания взрывных процессов от параметров буровзрывных работ, свойств горных пород и характеристик взрывных веществ. В данное время эти процессы исследованы недостаточно, поэтому до последнего времени взрывное дело являло собой в основном эмпирическую науку, которая опирается на опыт применения взрывов в горнодобывающей промышленности, а также разного рода земляных работах.

Современное развитие взрывного дела опирается на использование достижений и методов математики, физики, механики сплошных сред и других фундаментальных наук. Вместе с этим, для взрывного дела, как раздела техники, требуются инженерные расчёты максимальной простоты, которые допускают, в это же время, возможность достаточно широких эмпирических вариаций.

Анализ исследований и публикаций. Особенностью протекания взрывных процессов в горных породах на первом этапе является факт, что возникающие при этом давления настолько большие, что дают возможность при моделировании пренебречь характеристиками крепости и пластическими свойствами среды, а также силой трения в сравнении с инерционными силами. Если при этом пренебречь еще и сжимаемостью среды, то появляется возможность применять при математическом моделировании гидродинамические представления и пользоваться моделью идеальной несжимаемой жидкости. В рамках этой модели М.А. Лаврентьев [1,2] решил задачу о формировании и действии камуфлетного заряда. При этом рассматривалось устоявшееся течение жидкости. О.Е. Власов [3] воспользовался моделью идеальной несжимаемой жидкости для расчета воронки при подземном взрыве на выброс. Тут была использована импульсная постановка задачи и введена дополнительная характеристика крепости горной породы - критическая скорость. Идеи Лаврентьева в последующем были развиты в работах о форме воронки выброса [4-7,8], о принципах абсолютно направленного взрыва [9-12,13], о разрушающем действии взрыва [14] и принципах неравномерного дробления горных пород [15].

Цель работы. Воспользоваться моделью идеальной несжимаемой жидкости для разработки математической модели, которая позволит исследовать скорость движения горных пород в массиве при взрыве удлиненных зарядов.

При разработке математической модели учесть возможность исследования скорости движения породы в зависимости от угла расположения удлиненных зарядов.

Учесть в математической модели короткозамедленный характер взрывания и инерционный характер среды.

Материалы и результаты исследований. При описании динамики жидкой среды, которая заполняет некоторый объем, считается, что ее движение задано, если в любой момент времени t можно определить поле скоростей частиц среды $\vec{v}(\vec{x}, t)$ в выбранной точке \vec{x} . Кроме поля скоростей должны определяться другие величины, которые характеризуют состояние среды: дав-

¹ © Васильчук Я.В., 2012

ление $p(\vec{x}, t)$, плотность $\rho(\vec{x}, t)$ и т. п., в зависимости от конкретной задачи. Для математического описания модели идеальной несжимаемой жидкости пользуются уравнениями Эйлера

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \vec{F}. \quad (2)$$

Уравнение (1) представляет математическую запись условия несжимаемости жидкости. Уравнение (2) является уравнением движения. В левой его части стоит ускорение жидкости, а в правой части - действующие силы: гидродинамические и внешние. Чтобы найти решение эллиптических уравнений, которые выводятся из уравнений (1) и (2), воспользуемся методом функций Грина.

Задача Коши для уравнения Пуассона имеет вид

$$\Delta u = f(M), \quad (3)$$

$$\alpha_1 u + \alpha_2 \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_S = \chi(M), \quad (4)$$

где Δ - оператор Лапласа.

Если $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0$, то имеет место граничное условие I рода, при $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 1$ - граничное условие II рода, а при $\alpha_1 \neq 0$, $\alpha_2 \neq 0$ - граничное условие III рода.

Для решения задачи Коши (3), (4) методом функций Грина необходимо найти решение вспомогательной задачи

$$\Delta G = -\delta(M, P), \quad (5)$$

$$\alpha_1 G + \alpha_2 \frac{\partial G}{\partial n} \Big|_S = 0, \quad (6)$$

где $\delta(M, P)$ - дельта-функция.

Параметры α_1 и α_2 в условии (6) выбираются так, чтобы соответствовать граничным условиям (4) основной задачи.

Это решение является функцией Грина задачи (3), (4). Если функция Грина найдена, то решение исходной задачи (3), (4) записывается так

$$u(P) = \iint_S \chi(M) G(M, P) d\sigma_M - \iiint_V f(M) G(M, P) d\tau_M, \quad (7)$$

где V - область, в которой решается задача; S - поверхность, которая ограничивает область V .

Сосредоточенный заряд. Пусть заряд интенсивностью Q находится на некоторой глубине от поверхности земли. Если систему координат выбрать так, что плоскость $z=0$ совпадает с поверхностью земли, и ось Oz направлена вверх, то рассматриваемый заряд расположится в точке $M_0(x_0, y_0, z_0)$.

Тогда задача Коши для потенциала скоростей запишется так

$$\Delta \varphi = Q \cdot \delta(M, M_0), \quad (8)$$

$$\varphi \Big|_{z=0} = 0, \quad (9)$$

где $M(x, y, z)$ - произвольная точка рассматриваемой области, Q - интенсивность заряда, м³/с.

Для решения поставленной задачи необходимо построить функцию Грина для первой краевой задачи

$$\Delta G = -\delta(M, P), \quad (10)$$

$$G \Big|_{z=0} = 0. \quad (11)$$

Учитывая, что плоскостью, которая ограничивает область, является $z=0$, то

$$x'_0 = x_0, \quad y'_0 = y_0, \quad z'_0 = -z_0. \quad (12)$$

Функция Грина задачи (5), (6) запишется в виде

$$G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{MP}} - \frac{1}{r_{MP'}} \right), \quad (13)$$

где $r_{MP} = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + (z - z_p)^2}$, $r_{MM'_0} = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + (z + z_p)^2}$.

Линейный заряд. Пусть заряд располагается в скважине непрерывным образом на глубине -

z_0 и имеет длину l , причем скважина составляет угол α с горизонтальной поверхностью (рис. 1).

Если принять, что линейная интенсивность заряда постоянная, то функция, которая определяет положение заряда в пространстве (3), запишется так

$$f(x, y, z) = \frac{q}{4\pi} \delta(y - y_0) \delta(x - X) \delta(z - tg\alpha \cdot (X - x_0)), \quad (x_0 + z_0 ctg\alpha - l \cos \alpha \leq X \leq x_0 + z_0 ctg\alpha), \quad (14)$$

где q - линейная интенсивность заряда, m^2/c .

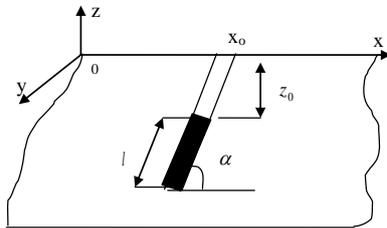


Рис. 1. Расположение линейного заряда в скважине (α - угол наклона шпура, l - длина заряда, x_0 - расстояние устья скважины от начала координат; z_0 - расстояние заряда от поверхности)

Формула для определения потенциала линейного заряда будет иметь вид

$$\varphi(x, y, z) = \frac{q \cos \alpha}{4\pi} \ln \left(\frac{(u_2 + \sqrt{u_2^2 + a})(v_1 + \sqrt{v_1^2 + b})}{(u_1 + \sqrt{u_1^2 + a})(v_2 + \sqrt{v_2^2 + b})} \right), \quad (15)$$

где $M_k(x_k, y_k, z_k)$ - координаты точек расположения заряда; τ_k - время запаздывания взрывания k -го заряда ($k = 1, \dots, n$); n - число точечных зарядов.

$$u_2 = \cos \alpha ((x_0 - x) \cos \alpha + z_0 \frac{1}{\sin \alpha} - z \sin \alpha), \quad u_1 = u_2 - l \cdot \cos \alpha,$$

$$v_2 = \cos \alpha ((x_0 - x) \cos \alpha + z_0 \frac{1}{\sin \alpha} + z \sin \alpha), \quad v_1 = v_2 - l \cdot \cos \alpha.$$

$$\sqrt{u_2^2 + a} = \cos \alpha \sqrt{(x - x_0 - z_0 ctg\alpha)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2},$$

$$\sqrt{u_1^2 + a} = \cos \alpha \sqrt{(x - x_0 - z_0 ctg\alpha)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 + l^2 + 2l \cdot ((x - x_0) \cos \alpha + z \sin \alpha - \frac{z_0}{\sin \alpha})},$$

$$\sqrt{v_2^2 + b} = \cos \alpha \sqrt{(x - x_0 - z_0 ctg\alpha)^2 + (y - y_0)^2 + (z + z_0)^2},$$

$$\sqrt{v_1^2 + b} = \cos \alpha \sqrt{(x - x_0 - z_0 ctg\alpha)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 + l^2 + 2l \cdot ((x - x_0) \cos \alpha - z \sin \alpha - \frac{z_0}{\sin \alpha})}.$$

Координаты скорости находятся, как частные производные потенциала (15).

Интенсивность заряда. Предложенная формула в работе [2] для определения интенсивности заряда рассматривает сферический заряд, расположенный на некоторой глубине от поверхности. Таким образом, мы получим интенсивность одиночного сферического заряда.

Автором было проведено усовершенствование формулы таким образом, чтобы ею можно было пользоваться для определения средней интенсивности линейного заряда при короткозамедленном взрывании на промежутке $[0, \Delta t]$. Формула имеет вид

$$\bar{Q} = \frac{\left(\frac{1}{3\Delta t} \sqrt{\frac{2\pi}{3}} \left(\left(r_o^{2.5} + 2.5 \sqrt{\frac{3\varepsilon \Delta \varepsilon W_o L_{зар}}{2\pi\rho}} \Delta t \right)^{\frac{6}{5}} - r_o^3 \right) \right)}{L_{зар}}. \quad (16)$$

где \bar{Q} - средняя интенсивность линейного заряда на промежутке $[0, \Delta t]$, m^2/c ; Δt - интервал замедления, с; r_o - радиус заряда, м, W_o - потенциальная энергия ВВ, Дж, $\Delta \varepsilon$ - доля энергии, которая идет на перемещение породы (0,1) [2]; ε - полнота превращения потенциальной энергии в кинетическую (для ЭВВ - 0,9-0,97); ρ - плотность породы, kg/m^3 ; $L_{зар}$ - длина заряда, м, d - диаметр заряда.

Для учета этого явления помимо интенсивности взрыва целесообразно при расчете потенциала ввести функцию, учитывающую инерционный характер движения среды. В простейшем случае такую функцию можно задать в виде

$$\psi(t) = e^{-\lambda t}, \quad (17)$$

где λ - параметр, характеризующий спадание потенциала, $1/c$; t - интервал времени, с.

Если происходит короткозамедленное взрывание, то потенциал для $\Delta t < 1$ запишется в виде

$$\varphi(x, y, z) = \frac{e^{-\lambda(t-\Delta t)}}{4\pi} \sum_{k=1}^n \bar{Q}_k \cdot e^{\lambda\tau_k} \cos \cdot \alpha \ln \left(\frac{(u_2 + \sqrt{u_2^2 + a})(v_1 + \sqrt{v_1^2 + b})}{(u_1 + \sqrt{u_1^2 + a})(v_2 + \sqrt{v_2^2 + b})} \right). \quad (18)$$

где $M_k(x_k, y_k, z_k)$ - координаты точек расположения заряда; τ_k - время запаздывания взрывания k -ого заряда ($k=1, \dots, n$); n - число линейных зарядов.

Координаты вектора скорости, как и для формулы (15) определяются, как частные производные потенциала (18).

Полученные частные производные будут являться координатами вектора скорости, т.е.

$$\vec{v}(x, y, z) = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right), \quad (19)$$

Величина самой скорости находится согласно формуле

$$|\vec{v}(x, y, z)| = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2}. \quad (20)$$

Формула (18) позволяет определить потенциал зарядов при короткозамедленном взрывании линейных зарядов в зависимости от угла их расположения, а частные производные от (18) позволяют определить проекции скорости движения породы (19) в рассматриваемых случаях. Для нахождения направления скорости движения среды необходимо воспользоваться формулами

$$\cos \alpha = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial x}}{\sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2}}, \quad \cos \beta = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial y}}{\sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2}}, \quad \cos \gamma = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2}}, \quad (21)$$

где $\alpha = (\vec{v} \wedge Ox)$, $\beta = (\vec{v} \wedge Oy)$, $\gamma = (\vec{v} \wedge Oz)$.

Выводы. Разработана математическая модель, которая позволяет исследовать скорость и направление движения горных пород при взрыве.

Математическая модель дает возможность исследовать изменение потенциала линейного заряда и скорость движения горных пород в зависимости от угла расположения удлиненных зарядов.

При разработке математической модели для исследования процесса взрывания нескольких скважинных зарядов был учтен короткозамедленный характер взрывания и инерционный характер среды, который обуславливается затуханием потенциала заряда во времени.

Данную математическую модель есть возможность применить в прикладном программном обеспечении для прогнозирования скорости движения горных пород в зависимости от параметров буровзрывных работ, свойств горных пород и характеристик взрывчатых веществ.

Список литературы

1. Лаврентьев М.А. Методы ТФКП / М. А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – Москва: Наука, 1973. – С. 735.
2. Лаврентьев М.А. Проблемы гидродинамики и их математические модели / М. А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – Москва: Наука, 1973.
3. Власов О.Е. Основы динамики взрыва / О.Е. Власов. – Москва: Изд.-во Военно-инженерной академии, 1957. – С. 377.
4. Ильинский Н.Б. Одна задача теории взрыва. Труды семинара по краевым задачам / Н.Б. Ильинский, Р.Б. Салимов. – Казань: изд-во КГУ, 1974. – С. 115-120.
5. Ильинский Н.Б. Об элетромоделировании краевых задач теории взрыва / Н.Б. Ильинский, Э. Э. Хайруллин. – РЖ Механика, 1975. – С. 38-43.
6. Ильинский Н.Б. Некоторые задачи о взрыве заглубленных зарядов. (Тр. Семинара по краевым задачам, вып. 12) / Н.Б. Ильинский, А.Г. Лабуткин, Р.Б. Салимов. – Казань: Изд-во КГУ, 1975. – С. 21-31.
7. Ильинский Н.Б. К решению одной краевой задачи теории взрыва / Н.Б. Ильинский // Изв. вузов. Математика № 6, 1975. – С. 111-116.
8. Кузнецов В.М. О форме воронки выброса при взрыве на поверхности грунта / В.М. Кузнецов. – ПМТФ, 1960. – С. 152-257.
9. Кузнецов В.М. Исследование линейно-распределенных зарядов выброса применительно к практике открытых работ / В.М. Кузнецов // Взрывное дело, 1963. -вып. 71/28. – С. 139-143.
10. Кузнецов В.М. Экспериментальное исследование направленного взрыва в грунте / В.М. Кузнецов, Е.Н. Шер // ПМТФ, 1963. -вып. 3. – С. 53-58.
11. Кузнецов В.М. Масштабный эффект и влияние прочности при направленном взрыве/ В.М. Кузнецов, Е.Н.

Шер // ПМТФ, 1963. -вып. 3. - С. 161-165.

12. Кузнецов В.М. О направлениях взрыва в мягком грунте / В.М. Кузнецов // Взрывное дело, 1963. -вып. 53/10. – С. 139-143.

13. Лаврентьев М.А. О направленном выбросе грунта при помощи ВВ / М.А. Лаврентьев, В.М. Кузнецов, Е.Н. Шер. – ПМТФ, 1960. - № 4. - С. 5-6.

14. Власов О. Е. Основы расчета дробления горных пород действием взрыва / О.Е. Власов. С.А. Смирнов. – Москва: Изд-во АН СССР, 1962. - С. 104.

15. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва/ Государственное издание физико-математической литературы. – Москва, 1959.

16. Кузнецов В.М. О принципе равномерного дробления горных пород взрывом / В.М. Кузнецов, Е.Н. Шер. - ПМТФ, 1975. - №3. - С. 48-51.

Рукопись поступила в редакцию 29.03.12

УДК 622.341.1

В.А. КОЛОСОВ, д-р техн. наук, проф., Ассоциация «Укррудпром», Кривой Рог

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Затронута проблема подземного способа разработки, как необходимость одновременного обеспечения высокой технической эффективности извлечения руды (полноты извлечения запаса руды из недр с минимальной потерей ее качества) и высокой экономической эффективности отработки запаса месторождения, а также рассматривается необходимость правильной организации работ по реализации функций в области обеспечения рациональной эксплуатации запасов железорудных месторождений.

Украина обладает одним из наиболее мощных горно-металлургических комплексов в мире. Функционирование этого комплекса и перспективы его развития неразрывно связаны с дальнейшим использованием и расширением масштабов применения подземного способа разработки железорудных месторождений. Это объясняется наличием в недрах Украины крупных запасов железных руд, которые относятся к категории «промышленных», и отработка которых может быть осуществлена только подземным способом по причине сложных условий их залегания.

Однако, подземный способ разработки ставит и ряд серьезных проблем. Одной из наиболее важных и сложных среди этих проблем является необходимость одновременного обеспечения высокой технической эффективности извлечения руды (полноты извлечения запаса руды из недр с минимальной потерей ее качества) и высокой экономической эффективности отработки запаса месторождения. Схема технологической цепи производства товарной руды на подземном горнодобывающем предприятии представлена на рис. 1.

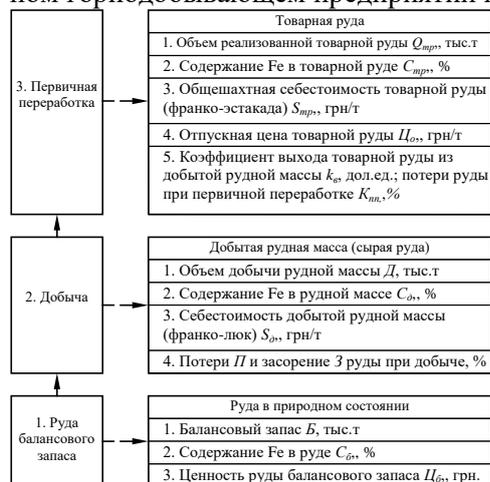


Рис. 1. Схема технологической цепи производства товарной руды на подземном горнодобывающем предприятии

Здесь $Q_{тр}$ - объем реализованной товарной руды, т тн.; $C_{тр}$ - содержание Fe в товарной руде, %; $S_{тр}$ - общешахтная себестоимость товарной руды (франко-эстакада), грн/т; $C_о$ - отпускная цена товарной руды, грн/т; $k_в$ - коэффициент выхода товарной руды из добытой рудной массы, доли. ед.; $K_{пт}$ - потери руды при первичной переработке, %; D - объем добычи рудной массы, тыс.т; $C_д$ - содержание Fe в рудной массе, %; $S_д$ - себестоимость добытой рудной массы (франко-люк), грн/т; P - потери руды при добыче, %; Z - засорение руды при добыче, %; B - балансовый запас тыс.т; $C_б$ - содержание Fe в руде балансовых запасов, %; $C_б$ - ценность руды балансового запаса, грн.

В настоящее время отработка железорудных месторождений подземным способом в Украине осуществляется с потерями и засорением руды на уровне 14-20 и 12-18 %, соответственно. В результате этого теряется до 20-30

% минерального сырья, сосредоточенного в недрах.

Достижение максимальной эффективности разработки может быть обеспечено за счет установления оптимального соотношения между значениями показателей извлечения руды и величиной допустимых финансовых затрат на ее добычу.