А.Г.ФЕДОРОВ
Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ СЕТКИ ОТБОЙНЫХ СКВАЖИН ПРИ ВЗРЫВНОЙ ОТБОЙКЕ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДРОБЛЕНИЯ С УЧЕТОМ СУПЕРПОЗИЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДВУМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В настоящее время на железорудных карьерах применяется прямоугольная (квадратная) сетка скважин, что в техническом плане представляется наиболее целесообразным ввиду простоты создания, обслуживания и учета взрывных скважин и схем короткозамедленного взрывания (КЗВ). Обуривание блоков прямоугольной сеткой скважин обеспечивает также возможность большего выбора групп и схем КЗВ. Однако комплексное исследование действия взрыва в горных породах показало, что при прямоугольной сетке скважин КПД взрывной энергии далеко не оптимален, что подтверждается достаточно большим выходом негабарита (5-10 %) и колоссальной неравномерностью проработки взрывного блока, требующих дополнительных затрат сил, средств и времени.

Применение комплексного метода исследований для изучения действия одиночного заряда ВВ в горной породе позволило получить ряд новых результатов, подтвержденных экспериментально. В практике ведения взрывных работ широко развито применение серии зарядов ВВ с различными замедлениями. Выяснение роли динамических полей напряжений при разрушении горных пород взрывом и изучение характера развития трещин и их роли в перераспределении полей напряжений в случае взрывов одиночных зарядов дают возможность применить эти результаты для исследования разрушения среды серией зарядов.

Рассмотрим взаимодействие пары зарядов, находящихся на разных рядах скважин (рис.1). Важно выяснить, под каким углом α происходит наибольшее насыщение единицы взрываемого объема кинетической энергией. Так как при взрыве скважинного заряда фронт распространения упругих напряжений принимает сферическую форму, то, по-видимому, этой единицей будет секторный объем (рис.2). При любом положении источников энергии по отношению к линии, параллельной линии борта уступа, рано или поздно происходит взаимодействие волн упругих напряжений. Чтобы определить, в каком случае взаимодействие растягивающих ($\sigma_р$) и сжимающих ($\sigma_{сж}$) напряжений наиболее оптимально, данный секторный объем представим в виде кубического, разложив напряжения на составляющие части по осям координат (рис.3).

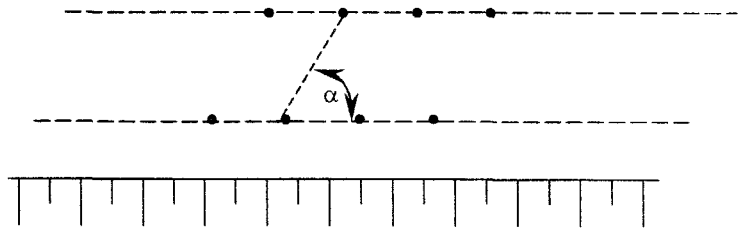


Рис.1

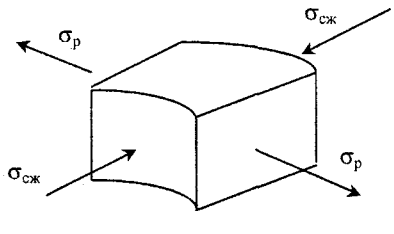


Рис.2

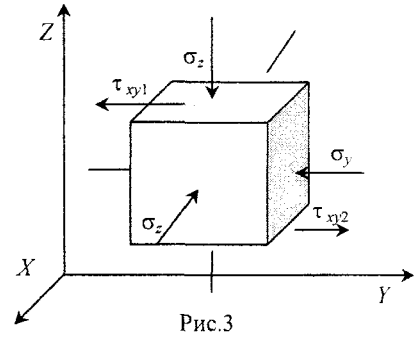


Рис.3

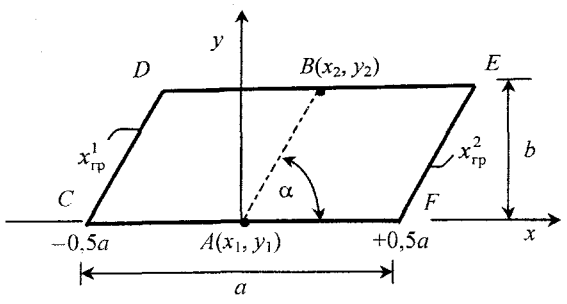


Рис.4

При анализе взаимодействия зарядов исследуемую часть массива будем считать однородной по составу и физико-техническим параметрам. Условимся также, что площадь, на которой наблюдается взаимное влияние зарядов ВВ за определенный диапазон времени, представляет собой параллелограмм *CDEF* (рис.4) с некоторым углом α ($0° < \alpha \le 90°$). Начало осей координат целесообразнее всего расположить в точке нахождения первой скважины. Тогда скважинные заряды ВВ будут иметь координаты точек *A* и *B*: соответственно $x_1 = 0$, $y_1 = 0$ и $x_2 = b\,\mathrm{ctg}\,\alpha$, $y_2 = b$.

В общем виде выражение для энергии, накопленной в среде при взрыве за счет действия пары источников энергии,* имеет вид

$$Q^*(x; y) = \int_0^B \left(\int_{x^1}^{x^2} Q(x, y)dx \right) dy, \qquad (1)$$

при граничных

$$x^1_{\text{гр}} = y\mathrm{ctg}\,\alpha - 0{,}5a; \quad x^2_{\text{гр}} = y\mathrm{ctg}\,\alpha + 0{,}5a \quad \text{и} \quad y^1_{\text{гр}} = 0; \quad y^2_{\text{гр}} = b.$$

Так как исследуемый нами объем *CDEF* (вертикальная составляющая на всем пространстве одинакова) состоит из множества элементарных объемов с накопленной энергией $Q(x, y)$, то непрерывную функцию $Q(x, y)$ следует проинтегрировать по всему исследуемому пространству *CDEF*. Для отыскания функции $Q(x, y)$ лучшим вариантом представляется упрощенная схема среды как некой дискретной модели с известным количеством элементарных объемов, координаты каждого из которых известны, т.е. разбив исследуемую среду *CDEF* на большое, но конечное количество «отсеков» такой же формы и подсчитав энергию каждого, можно получить общую энергию объема *CDEF* (рис.5). На рис.5 N_1 и N_2 – число «отсеков» соответственно по горизонтали и вертикали, N_1N_2 – общее число «отсеков»; $T(x_{ij}, y_{ij})$ – центральная точка *ij*-го отсека.

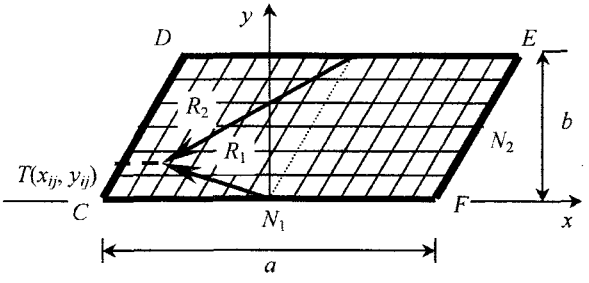


Рис.5

Так как

$$y_{ij} = \frac{b}{N_2}(j - 0{,}5); \quad x_{ij} = y_{ij}\mathrm{ctg}\,\alpha + \frac{a}{N_1}(i - 0{,}5) - 0{,}5a; \quad a = b,$$

то формула (1) примет вид

$$Q^* = \sum_{ij}^{N_1N_2} Q(x_{ij}, y_{ij}), \qquad (2)$$

где $Q(x_{ij}, y_{ij})$ – энергия *ij*-го отсека.

В общем случае**

$$Q(x_{ij}, y_{ij}) = \frac{1}{2E}(\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2 - 2\nu\delta_x\delta_y) + \frac{2}{E}(1 - \nu)\tau_{xy}^2,$$

---

* *Миндели Э.О.* Комплексное исследование действия взрыва в горных породах / Э.О.Миндели, Н.Ф.Кусов. М.: Недра, 1978.

** *Миндели Э.О.* Там же.

где δ_x, δ_y, δ_z, τ_{xy} – главные и касательные напряжения (см. рис.3); ν – коэффициент Пуассона для данной горной породы; E – относительный модуль Юнга.

Каждое из главных и касательных напряжений раскладывается на составляющие вектора напряжений, исходя из противоположных направлений линии действия каждого вектора: $\delta_x = \delta_{x1} + \delta_{x2}$; $\delta_y = \delta_{y1} + \delta_{y2}$; $\delta_z = \delta_{z1} + \delta_{z2}$; $\tau_{xy} = \tau_{xy1} + \tau_{xy2}$. В дальнейшем координаты ij-го отсека x_{ij} и y_{ij} будем обозначать x и y, а координаты скважины B – x_2, y_2. Тогда

$$\delta_{x1} = (\delta_{R1}x^2 + \delta_{\theta 1}y^2) / (x^2 + y^2);$$

$$\delta_{x2} = [\delta_{R2}(x - x_2)^2 + \delta_{\theta 2}(y - y_2)^2] / [(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2];$$

$$\delta_{y1} = (\delta_{R1}y^2 + \delta_{\theta 1}x^2) / (x^2 + y^2);$$

$$\delta_{y2} = [\delta_{R2}(y - y_2)^2 + \delta_{\theta 2}(x - x_2)^2] / [(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2];$$

$$\tau_{xy1} = (\delta_{R1} - \delta_{\theta 1})\, xy / (x^2 + y^2);$$

$$\tau_{xy2} = (\delta_{R2} - \delta_{\theta 2})\,(x - x_2)\,(y - y_2) / [(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2].$$

В обычных условиях ведения взрывных работ взрывание зарядов осуществляется при наличии двух и более свободных поверхностей (исключение составляет случай взрывания врубовых зарядов.). Наличие второй свободной поверхности приводит к необходимости учитывать отраженные волны, действие которых существенно влияет на характер разрушения горной породы. Взрывание зарядов приводит к распространению волновых процессов в массиве. При этом волна сопровождается потоком энергии. Накопление некоторого количества энергии в заданной точке пространства является необходимым условием для возникновения разрушения в этой точке массива. При наличии отраженных волн в выделенном элементарном объеме появляется дополнительный приток энергии, величина которого зависит от времени замедления взрывания последующих зарядов. Вслед за излучением фронта волны напряжений диаметр цилиндрического заряда продолжает увеличиваться под действием давления продуктов детонации. На первой стадии расширения увеличение радиуса цилиндрической камеры происходит вследствие сжимаемости горной породы и определяется давлением продуктов детонации и свойствами горной породы. Затем происходит разрушение среды на контакте ВВ – среда и возникают радиальные трещины. Развитие зоны трещин приводит к дополнительному увеличению напряжений в той части массива, которая еще не охвачена разрушением*.

Введем понятие эквивалентной величины диаметра взрывной скважины, равной величине зоны вокруг скважины, охваченной в данный момент разрушением радиальными трещинами. При этом величины тангенциальных и радиальных напряжений в массиве вокруг первого цилиндрического заряда соответственно

$$\delta_{R1} = P_0\varepsilon_1(t)(R_0/R_1)^2;$$

$$\delta_{\theta 1} = -K_\theta\,\delta_{R1}; \qquad (3)$$

$$\delta_{z1} = \nu(1 - K_\theta)\delta_{R1},$$

где P_0 – относительное начальное давление на границе упругой зоны, $P_0 = 1$; R_0 – начальный радиус скважины, м; R_1 – расстояние от оси первого заряда до элементарного объема, м, $R_1 = \sqrt{x^2 + y^2}$; K_θ – коэффициент, равный отношению радиального и тангенциального напряжений; $\varepsilon_1(t)$ – коэффициент, зависящий от момента времени прихода волны напряжений от первого заряда, когда начинается накопление энергии,

* *Ерофеев И.Е.* Повышение эффективности буровзрывных работ на рудниках. М.: Недра 1988.

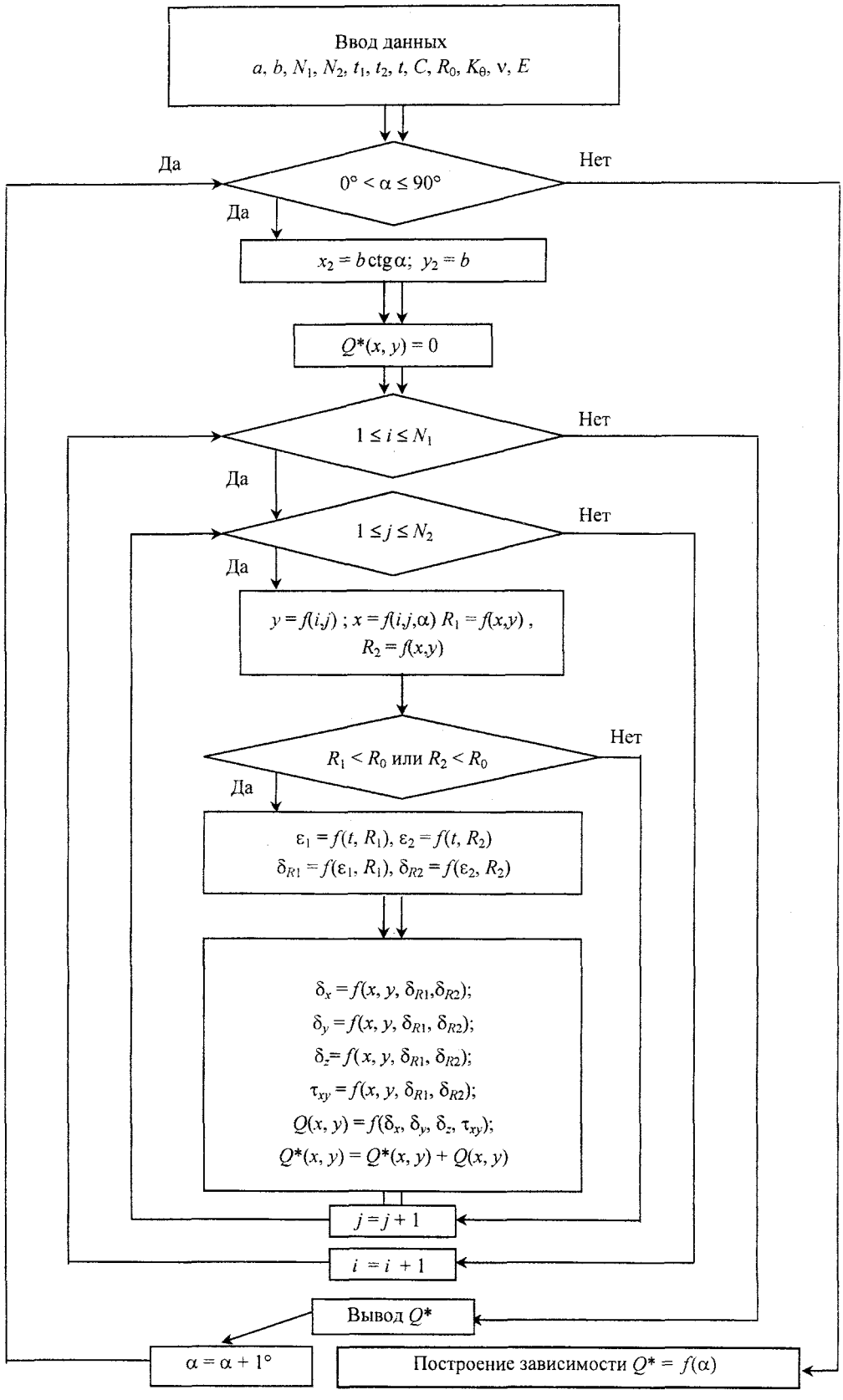

Ввод данных
a, b, N1, N2, t1, t2, t, C, R0, Kθ, ν, E
Да
0° < α ≤ 90°
Нет
Да
x2 = b ctg α; y2 = b
Q*(x, y) = 0
1 ≤ i ≤ N1
Нет
Да
1 ≤ j ≤ N2
Нет
Да
y = f(i,j) ; x = f(i,j,α) R1 = f(x,y) ,
R2 = f(x,y)
R1 < R0 или R2 < R0
Нет
Да
ε1 = f(t, R1), ε2 = f(t, R2)
δR1 = f(ε1, R1), δR2 = f(ε2, R2)
δx = f(x, y, δR1,δR2);
δy = f(x, y, δR1, δR2);
δz= f(x, y, δR1, δR2);
τxy = f(x, y, δR1, δR2);
Q(x, y) = f(δx, δy, δz, τxy);
Q*(x, y) = Q*(x, y) + Q(x, y)
j = j + 1
i = i + 1
Вывод Q*
α = α + 1°
Построение зависимости Q* = f(α)

Рис.6

$$\varepsilon_1(t) = \begin{cases} 0 \text{ при } t < R_1 / C; \\ 1 \text{ при } R_1 / C \le t \le R_1 / C + t_1; \\ 0 \text{ при } R_1 / C + t_1 < t; \end{cases}$$

C – скорость распространения упругих колебаний в горной породе, м/с; t_1 – время, за которое распространяется фронт упругой волны в элементарном объеме, с.

Тангенциальные и радиальные напряжения в массиве вокруг второго заряда можно вычислить по формулам, аналогичным формулам (2), где R_2 – расстояние от оси второго заряда до элементарного объема, м, $R_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2}$; t_2 – время замедления взрыва второго заряда, т.е. время, за которое волна детонации должна дойти до второго заряда, с;

$$\varepsilon_1(t) = \begin{cases} 0 \text{ при } t < R_2 / C + t_2; \\ 1 \text{ при } R_2 / C + t_2 \le t \le R_2 / C + t_2 + t_1; \\ 0 \text{ при } R_2 / C + t_2 + t_1 < t. \end{cases}$$

Алгоритм построения зависимости $Q(\alpha)$ позволяет определить эффективность взрывания (за которую принята относительная величина энергии Q, идущей на дробление) при различных углах α и выбрать его оптимальное значение (рис.6). Общий характер самой зависимости $Q^*(\alpha)$ таков, что наиболее эффективное использование взрывной энергии возможно при применении сетки скважин с углом, близким к 60° (рис.7).

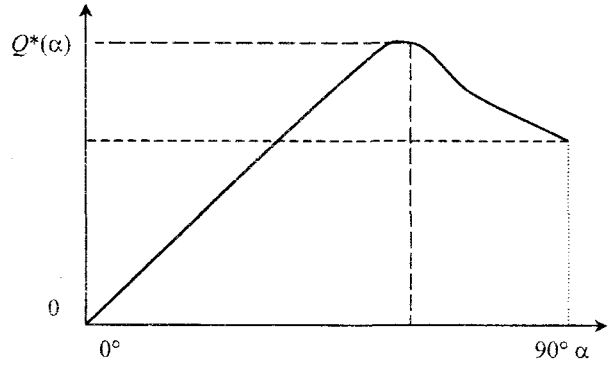


Рис.7

Применение данного алгоритма позволяет произвести упрощенный, несложный анализ взрывного дробления массива горных пород в производственных условиях. При использовании данного алгоритма в виде составленных программ на ПЭВМ можно получить не только конкретную зависимость $Q^*(\alpha)$ при заданных параметрах, но и выявить некие общие закономерности при различных значениях вводимых параметров. Так, с целью поиска наиболее эффективного варианта использования динамических напряжений в двумерном пространстве при производстве буровзрывных работ можно варьировать такими параметрами, как угол сетки скважин, расстояние между скважинами в ряду и расстояние между рядами, тип ВВ, форма скважинного заряда, тип короткозамедлителя, изменяя время распространения фронта упругих напряжений, длительность импульса воздействия, масштаб взрывной нагрузки. В конечном итоге, можно подобрать вариант, при котором разрушающий эффект будет оптимален, а затраты минимальны.