М.Г.МЕНЖУЛИН, Г.П.ПАРАМОНОВ, С.В.ХОХЛОВ
Санкт-Петербургский горный ин-т, Россия

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА РАЗРУШЕННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ В ЗОНЕ ОТКОЛА

Формирование структуры откольной зоны может быть исследовано с помощью метода, предложенного Б.В.Замышляевым [5] для определения структуры кавитационного слоя при взрыве ВВ в воде вблизи свободной поверхности. Метод основан на использовании закономерностей распада произвольного разрыва при взаимодействии волны напряжений со свободной поверхностью. В результате взаимодействия в воздухе будет распространяться ударная волна, а по конденсированной среде от границы раздела в сторону взрывной камеры – волна разрежения. Максимальное растягивающее напряжение в волне разрежения определяется методом зеркального отображения источника взрыва с введением мнимого заряда (рис.1).

В каждой точке реальной среды действует суммарное напряжение падающей и отраженной волн. На некотором расстоянии h_1 от свободной поверхности или расстоянии $W - h_1$ от оси заряда максимальное напряжение в прямой волне $\sigma_{r_{max}}(W - h_1)$, а по истечении

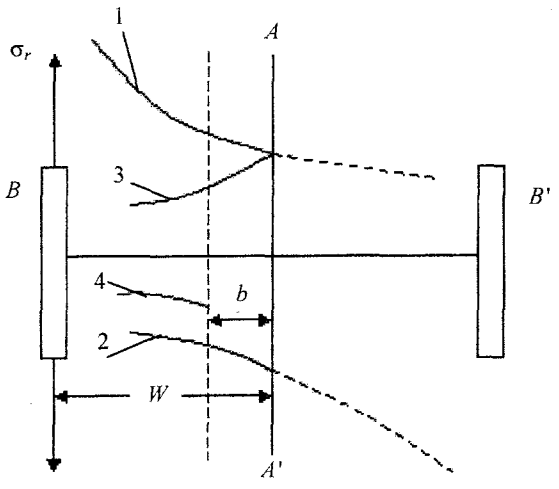


Рис.1. Схема образования откольных слоев
1 и 2 – максимальное радиальное и растягивающее нагружение в реальной (сплошная линия) и мнимой (штриховая линия) средах; 3 – радиальное напряжение в реальной среде на момент прихода в данную точку отраженной (от свободной поверхности) волны; 4 – растягивающее напряжение во второй волне разрежения; B и B' – действительный и мнимый заряды; AA' – свободная поверхность; W – линия наименьшего сопротивления

времени t_1 распространения волны от точки $W - h_1$ до свободной поверхности и обратно напряжение

$$\sigma_r(W - h_1) = \sigma_{r\max}(W - h_1)F(r, t_1).$$

Здесь функция $F(r, t)$ описывает форму волны напряжений; t_1 принято равным $2h_1/c_p$, где c_p – скорость продольной волны; r – расстояние от оси заряда. В настоящей работе зависимость $F(r, t)$ принималась в соответствии с работой [4].

Таким образом, суммарное напряжение

$$\sigma_{\Sigma 1} = -\sigma_{r\max}(W - h_1) + \sigma_{r\max}(W - h_1)F(r, t_1).$$

При равенстве $\sigma_{\Sigma 1}$ пределу прочности горной породы на отрыв $[\sigma_{отр}]$ образуется поверхность откола и слой среды толщиной h_1 отделяется от монолитного массива. Поверхность откола представляет собой новую свободную поверхность, на которой процесс отражения повторяется, и откуда в сторону заряда начнет распространяться новая волна разрежения.

Изменение растягивающего напряжения во второй волне разрежения в зависимости от расстояния описывается кривой 4, начинающейся от свободной поверхности параллельно кривой 2, но смещенной от нее на величину $[\sigma_{отр}]$ (рис.1).

Суммарное напряжение на некотором расстоянии $h_1 + h_2$ от исходной свободной поверхности

$$\sigma_{\Sigma 2} = -\sigma_{r\max}(W + h_1 + h_2) + \sigma_{отр} + \sigma_{r\max}(W - h_1 - h_2)F(W - h_1 - h_2, t_2),$$

где $t_2 = 2(h_1 + h_2)/c_p$.

При $\sigma_{\Sigma 2} = [\sigma_{отр}]$ произойдет отделение второго слоя толщиной h_2.

Такой процесс отделения слоев будет происходить до тех пор, пока выполняется условие $\sigma_{\Sigma i} \geq [\sigma_{отр}]$, где

$$\sigma_{\Sigma i} = -\sigma_{r\max}(W + h_1 + \ldots + h_i) + \sigma_{отр} + \sigma_{r\max}(W - h_1 - \ldots - h_i)F(W - h_1 - \ldots - h_i, t_i);$$

$$t_i = 2(h_1 + \ldots + h_i)/c_p.$$

С помощью предложенного метода могут быть рассчитаны количество и толщина откольных слоев в зоне откола.

Для трещиноватого массива для фазы радиального сжатия в волне $t_+^0(r)$ и амплитуды радиального сжатия $\sigma_{r\max}^0(r)$ примем соотношения [3]

$$t_+(r) = t_+^0(r) + r\lambda\Delta t;$$

$$\sigma_{r\max}(r) = \sigma_{r\max}^0(r)\delta^{-r\lambda},$$

где λ – средняя частота трещин, $\lambda = 1/\bar{x}$; $\bar{x}$ – среднее расстояние между трещинами); δ – коэффициент затухания амплитуды радиального сжатия (отношение амплитуд волны сжатия пе-

ред и за трещиной); Δt – прирост продолжительности фазы радиального сжатия в волне при прохождении через отдельную трещину.

Для трещин с плоскими поверхностями, заполненных глиной, водой или песком, δ и Δt можно оценить по акустическим жесткостям породы и заполнителя (см., например, [2]).

Примеры расчета параметров откола слоев по данной методике для различных диаметров взрывных скважин представлены в таблице. В качестве исходных данных приняты следующие: плотность породы 2700 кг/м^3, $[\sigma_{отр}] = 10$ МПа, плотность ВВ 900 кг/м^3, скорость продольной волны 5100 м/с, скорость детонации 4600 м/с, $\lambda = 0{,}67$, $\delta = 1{,}2$.

Расчет толщины откольных слоев

Номер слоя	Расстояние от заряда r, м	Растягивающее напряжение σ_r, МПа	Сжимающее напряжение σ_r, МПа	Толщина слоя h, м
Диаметр скважин 250 мм, $W = 7$ м				
1	4,78	21,03	11,65	1,28
2	4,5	16,53	6,51	0,22
3	4,16	12,14	2,12	0,34
Диаметр скважин 100 мм, $W = 2{,}8$ м				
1	2,19	46,6	36,4	0,61
2	2,08	37,9	27,7	0,11
3	1,96	29,3	18,8	0,12
4	1,83	21	10,6	0,13
5	1,65	12,4	2,36	0,18

В данной зоне распределение кусков по размерам соответствует естественной блочности массива, но ограничиваются сверху размером слоя.

Как видно из таблицы, применение скважин малых диаметров исключает образование крупных (негабаритных) кусков горной массы в данной зоне.

Естественная блочность массива горных пород определяется либо экспериментально, либо расчитывается согласно модели, предложенной в работе [7].

Примем, что трещиноватость статистически однородна и осколок характеризуется одним размером – наибольшим из трех размеров (по Л.Н.Барону [1]). Первое допущение не накладывает существенных ограничений и предполагает только выделение соответствующих участков в породе. Второе сделано для упрощения. Оно означает, что учет анизотропии породы и формы осколков выходят за рамки данной статьи.

Уже при небольшом повышении средней микротрещиноватости под действием напряжений возникают случайные скопления из двух и более микротрещин. Те из них, которые удовлетворяют концентрационному критерию, сливаются и образуют макротрещины различного размера. Последние также могут сливаться в соответствии с концентрационным критерием, приводя к более крупным трещинам, но могут и расти как магистральные. Однако представляется интуитивно ясным, что в условиях множественного трещинообразования вероятность образования трещины путем магистрального роста из много меньшей существенно меньше вероятности возникновения за счет меньших трещин. Это подтверждают наблюдения разрывов перемычек между микротрещинами в области концентрации напряжений вблизи вершины большой трещины в нагруженном теле [6]. Среди слияний, которые могут привести к трещине данного размера, наиболее вероятны слияния пар трещин. При слиянии двух трещин суммарный размер заметно изменяется сравнительно с размером большей трещины только в том случае, если размеры обеих трещин близки (отличаются менее чем в 6 раз).

Итак, примем следующее основное допущение: при множественном трещинообразовании трещины данного размера x образуются преимущественно путем слияния двух трещин, имеющих размер $x/(K_* + 1)$ и образовавшихся на критическом расстоянии друг от друга (здесь K_* – концентрационный критерий слияния трещин). Это утверждение должно быть справедли-

во и для каждой из двух меньших трещин и т.д. вплоть до трещин, образующихся непосредственно при слиянии микротрещин. В соответствии с концентрационным критерием и независимостью его от масштаба каждое последующее скопление в $(K_* + 1)$ раз больше предыдущего, т.е. размер x конечного скопления определяется числом последовательных слияний и размером минимального скопления из двух микротрещин. Последнее может иметь любой размер в области перехода от микро- к макротрещинам: от $2l$ до $(K_* + 1)l$. Соответственно и конечный размер x может быть любым. Его можно записать в виде

$$x = (K_* + 1)^i; \quad i \geq 0{,}3, \tag{1}$$

формально полагая здесь i любым, начиная с $i = 0{,}3$, при котором $x = 2l$.

Трещины, ограничивающие осколок, как правило, имеют различные размеры. Однако, как отмечалось выше, слияние существенно отличных по размерам трещин не приводит к заметному изменению размера большей из них. В соответствии с моделью слияния и с учетом (1) близкими по размеру естественно считать трещины,размеры которых отличаются менее чем в $(K_* + 1) = 6$ раз. Поэтому можно предположить, что смыкание трещин, более контрастных по размерам, практически не будет влиять на возможные соотношения размеров образующихся осколков. Это основательно подтверждается данными [1] для скальных пород, согласно которым отношение наибольшего размера осколка к наименьшему находится как раз в диапазоне от 1 до 6. Можно сказать, что с точностью до множителя $(K_* + 1)$ все размеры любого осколка (и точно также размеры смыкающихся трещин) равны между собой.

Итак, согласно (1) интервал изменения размеров «близких» трещин, оконтуривающих осколок, соответствует единичному интервалу изменения параметра i ($\Delta i = 1$). С учетом этого обстоятельства определим локальную концентрацию трещин $\hat{N}(x)$ как суммарную локальную концентрацию «близких» трещин по интервалу $\Delta i = 1$ вблизи значения

$$i(x) = \frac{\ln(x/l)}{\ln(K_* + 1)}. \tag{2}$$

Иначе говоря, $\hat{N}(x)$ определяется производной от полной концентрации трещин всех размеров не по x, а по $i(x)$, т.е. $\hat{N}(x)$ имеет размерность концентрации, например [м^3].

Примем интуитивно очевидное условие: близкие по размеру трещины со «средним» размером x смыкаются (или почти смыкаются) и образуют осколок того же размера, если их локальная концентрация $\hat{N}(x)$ такова, что размер области, приходящийся на одну трещину, не превышает размера самой трещины, т.е. если

$$\hat{N}(x)^{-1/3} / x \leq 1. \tag{3}$$

Это условие удобно переписать в виде

$$\hat{I}(x) \equiv \hat{N}(x)x \geq 1.$$

Здесь безразмерная величина $\hat{I}(x)$ имеет смысл локального числа трещин в объеме, близком к x^3, имеющих размеры, близкие к «среднему» размеру x.

Поскольку трещиноватость предполагается статистически однородной, можно ввести параметр $N(x)$ – среднюю концентрацию трещин размером x. Тогда

$$I(x) \equiv N(x)x^3 \tag{4}$$

есть среднее число трещин размером x в объеме x^3 (средняя по объему трещиноватость).

Кроме указанного, $I(x)$ имеет смысл доли объема, занятого трещинами размером x. Вероятность значения $\hat{I}(x)$ зависит от среднего $I(x)$ как от параметра. Обозначим ее через

$q[(\hat{I}(x), I(x)]$. Тогда вероятность того, что при средней концентрации $N(x)$ в объеме x^3 нет трещин размером x, так как, $\hat{I}(x) = 0$, равна $q[(0, I(x)]$. Соответственно вероятность того, что при средней концентрации $N(x)$ локально в объеме x^3 имеется хотя бы одна трещина размером x ($\hat{I}(x) \geq 1$), равна $1-q[(0, I(x)]$. Эта величина согласно (3) дает вероятность образования осколков размером x при трещиноватости $I(x)$:

$$f(x) = 1 - q[(0, I(x)]. \qquad (5)$$

Определим зависимость $q[(0, I(x)]$. В работе [8] с помощью статистического моделирования и наблюдений обоснована эффективная взаимная независимость положений трещин в массиве. К такому выводу приводят также следующие соображения. При $I \ll 1$ средняя концентрация трещин мала и они независимы. При $I \geq 1$ концентрация трещин велика и они взаимодействуют. Но при этом каждая трещина находится в некотором самосогласованном поле большого числа остальных трещин. Влияние одной трещины (из этих остальных) на данную трещину мало́ сравнительно с самосогласованным полем. И в этом смысле парные взаимодействия при высокой концентрации трещин незначительны и трещины эффективно независимы. Реально $I \ll 1$ соответствует интервалу $0 < I < 0{,}3$, а $I > 1$ – $I > 0{,}5$. Учитывая сказанное, примем, что при множественном трещинообразовании при всех $I > 0$ число трещин данного размера в случайно выбранном объеме является случайной величиной, распределенной по закону Пуассона. В частности, для определенной выше функции $q[(0, I(x)]$ имеем

$$q[(0, I(x)] = e^{-I(x)}. \qquad (6)$$

Из (5) и (6) следует

$$f(x) = 1 - e^{-I(x)}. \qquad (7)$$

Таким образом, гранулометрический состав в форме кумулятивного выхода снизу, выраженного в объемных долях осколков с размерами в интервале $0 < x' < x$, получается путем нормировки вероятности $f(x)$:

$$F(x) = f(x) / f_m, \quad 0 < x \leq x_m, \qquad (8)$$

где $f_m = f(x_m)$; x_m – максимальный размер осколка.

Согласно результатам обработки данных большого числа наблюдений, вероятность того, что длина интервала на линейном профиле между соседними точками пересечений с трещинами будет больше x, аппроксимируется экспонентой $e(-\lambda x)$ [2], где λ – среднее число трещин на единицу длины профиля. Рассматриваемое приближение ввиду отсутствия предпочтительной ориентации соответствует хаотической ориентации трещин. В этом случае можно считать, что распределение длин интервалов на профиле между точка-

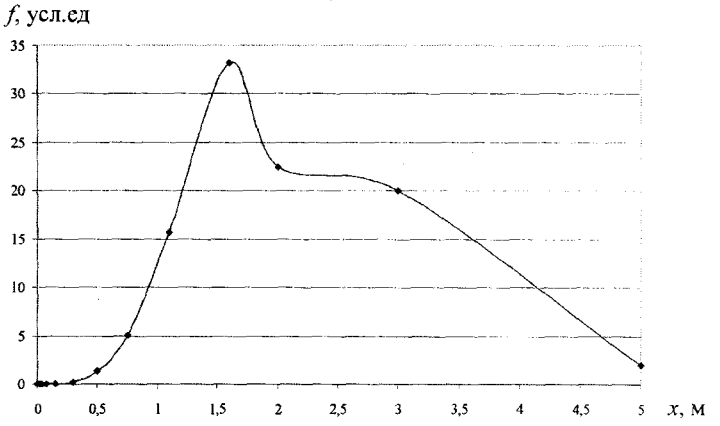


Рис.2. Приведенная к нормальному виду дифференциальная функция распределения естественной блочности ($\lambda = 0{,}67$)

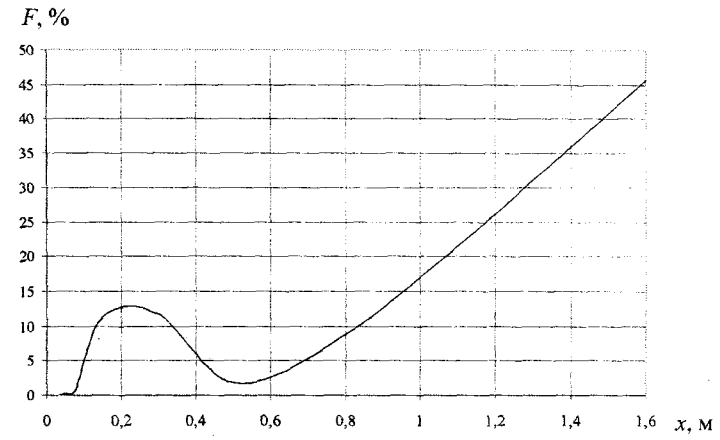


Рис.3. Дифференциальная функция распределения для зоны откола (диаметр скважин 250 мм)

ми пересечения с трещинами и распределение размеров трещин совпадают. Это позволяет использовать для средней концентрации трещин с размерами более x аппроксимацию $\lambda^3 e(-\lambda x)$, где λ^3 – средняя концентрация трещин всех возможных размеров. С другой стороны, среднюю концентрацию трещин с размерами более x можно выразить через $N(x)$. В итоге имеем соотношение

$$\int_x^{\hat{x}} N(x)di(x) = \lambda^3 e^{-\lambda x}.$$

Дифференцируя его с учетом (2), получим выражение для $N(x)$, которое после умножения на x^3, согласно (4), приводит к

$$I(x) = \ln(K_* + 1)(\lambda x)^4 e^{-\lambda x}. \qquad (9)$$

Соотношения (7)-(9) позволяют рассчитать гранулометрический состав отдельностей в массиве, дают модель его естественной трещиноватости и блочности (рис.2, 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Барон Л.И.* Горнотехнологическое породоведение. М.: Наука, 1977.

2. *Боровиков В.А.* Закономерности затухания волны напряжений при прохождении через трещину // Взрывное дело. 1983. Вып. 85/42.

3. *Боровиков В.А.* Техника и технология взрывных работ / В.А.Боровиков, И.Ф.Ванягин; Ленинградский горный ин-т. Л., 1985.

4. *Боровиков В.А.* Волны напряжений в обводненном трещиноватом массиве / В.А.Боровиков, И.Ф.Ванягин, М.Г.Менжулин, С.В.Цирель; Ленинградский горный ин-т. Л., 1989.

5. *Замышляев Б.В.* Динамические нагрузки при подводном взрыве / Б.В.Замышляев, Ю.С.Яковлев. Л.: Судпромгиз, 1967.

6. *Куксенко В.М.* Микромеханика разрушения полимерных материалов: Автореф. докт. дис. / ИВС АН СССР. Л., 1977.

7. *Чертков В.Я.* Научные основы прогноза и регулирования взорванной горной массы на карьерах: Автореф. докт. дис. / ИВС АН СССР. М., 1990.

8. *Hudson J.A.* Discontinuities and Rock Mass Geometry / J.A.Hudson, S.D.Priest // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanical Abstracts. 1979. Vol.16. № 6.