

ФИЗИКО-
ТЕХНИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
РАЗРАБОТКИ
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ

2

1973

перную породу частотой силовых импульсов, соответствующей ее периодической прочностной структуре, можно получить наиболее высокие скорости разрушения и наименьшую энергоемкость процесса.

Институт горного дела
им. А. А. Скочинского,
Москва

Поступила в редакцию
28/X 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Барон. В кн.: Новая технология и системы подземной разработки рудных месторождений. М., «Наука», 1965.
2. И. А. Остроушко. Бурение твердых горных пород. М., «Недра», 1966.
3. А. Ф. Суханов, Б. Н. Кутузов. Разрушение горных пород. М., «Недра», 1967.
4. А. В. Докукин, А. А. Шубин, Ю. Д. Красников. Вопросы теории горных газовых импульсных систем. М., изд. ИГД им. А. А. Скочинского, 1969.
5. М. И. Койфман. В кн.: Проблемы механизации горных пород. М., Изд-во АН СССР, 1963.
6. Б. Я. Пинес. Лекции по структурному анализу. Харьков, изд. Харьковского гос. ун-та, 1957.
7. А. В. Шубников, В. Ф. Парвов. Зарождение и рост кристаллов. М., «Наука», 1969.
8. О. М. Аншелес, В. Б. Татарский, О. Б. Штернберг. Скоростное выращивание однородных кристаллов из растворов. Лениздат, 1945.
9. А. Ф. Полак. Твердение мономинеральных вязнущих веществ. М., «Стройиздат», 1966.
10. Ф. Макклиток, А. Аргон. Деформация и разрушение материалов. М., «Мир», 1970.
11. О. И. Силаева. Исследование с помощью ультразвука скоростей распространения упругих волн и упругих параметров в образцах горных пород при одностороннем давлении. М., Изд-во АН СССР, 1962.
12. О. И. Силаева, О. Г. Шамина. «Изв. АН СССР. Серия геофиз.», 1960, № 9.

УДК 622.235+518.61

В. А. БЫЧЕНКОВ, В. В. ГАДЖИЕВА, В. Ф. КУРОПАТЕНКО

ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ШИРИНЫ ЩЕЛИ НА КОЛИЧЕСТВО ГОРНОЙ ПОРОДЫ, РАЗДРОБЛЕННОЙ ПРИ ВЗРЫВЕ

Изучение зон дробления и трещиноватости [1], образующихся при камуфлетных сильных взрывах в скальных породах, позволяет делать вывод о целесообразности применения сильных взрывов для дробления руды на горных предприятиях. Это может значительно изменить технологию подземной разработки рудных месторождений и повысить эффективность горных работ.

Для защиты штолен и других сооружений от разрушения, а также для увеличения объема раздробленной руды в горном массиве проходятся горизонтальная и вертикальная щели. Ширина щели h и ее положение $R_{щ}$ относительно центра взрыва существенно влияют на полученные при взрыве результаты. Стремление добиться для заряда заданной мощности наибольшего экранирующего эффекта щели и максимального количества раздробленной руды (при условии, что осколки не превосходят некоторого наперед заданного размера) приводит к необходимости проведения расчетов на ЭВМ и определения с их помощью оптимальных значений h и $R_{щ}$. В рамках одномерной модели взрыва в горной породе указанные эффекты можно оценить лишь в случае, когда щель представляет собой шаровой слой при взрыве одиночного заряда и цилиндрический слой при взрыве протяженного заряда. Бесспорно, такая постановка задачи отличается от встречающихся в практике случаев, когда для указанных целей создаются плоские щели. Тем не менее результаты расчетов, по нашему мнению, представ-

ляют интерес и могут быть использованы для количественных оценок.

Математически задача формулировалась следующим образом. В начальный момент времени энергия q кт равномерно распределена в полости сферы с радиусом R_0^0 , заполненной газом с уравнением состояния

$$P = (\gamma - 1)\rho E.$$

Уравнение состояния горной породы бралось в виде

$$P = (\gamma - 1)\rho E + \frac{\rho_0 C_0^2}{n} \left[\frac{n-\gamma}{n-1} \delta^n + \frac{n(\gamma-1)}{n-1} \delta - \gamma \right].$$

Начальное давление в горном массиве предполагалось равным нулю, а начальная плотность постоянной. Порода предполагалась хрупкой, значит при сжатии или растяжении она разрушалась, когда наибольшее касательное напряжение τ_{\max} достигало критического значения

$$\tau_{\text{кр}} = 0,5Y,$$

где

$$Y = \begin{cases} Y_0 + P & \text{при } P < 10 \text{ кбар} - Y_0, \\ 10 \text{ кбар} & \text{при } P \geq 10 \text{ кбар} - Y_0. \end{cases}$$

Кроме того, для возможно более полного описания характера разрушения породы при растяжении задавалось также критическое напряжение $\sigma_{\text{кр}}$. При достижении этого значения одним из напряжений σ_i в породе возникали трещины, ортогональные направлению этого напряжения. Объем вновь образовавшихся или существовавших ранее трещин Θ может изменяться с течением времени. Изменение Θ подчиняется специальным дифференциальным уравнениям.

В расчетах использовались следующие численные значения параметров: а) в полости: $\rho_0 = 1,4$ г/см³, $\gamma = 5/3$, $E_0 = 1500$ кДж/г, $R_0^0 = 1$ м; б) в горной породе: $\rho_0 = 2,73$ г/см³, $C_0 = 2,55$ км/с, $n = 5,3$, $\gamma = 1,51$, $Y_0 = 0,12$ кбар, $\sigma_{\text{кр}} = 0,15$ кбар, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. В некоторых расчетах параметры Y_0 и $\sigma_{\text{кр}}$ варьировались. С помощью расчетов определялись значения $R_{\text{ш}}$ и h , при которых объем раздробленной руды был бы максимальным. Вычисления проводились по программе «СПРУТ», предназначенной для расчета нестационарных движений сжимаемых сред с реальными свойствами (упругость, пластичность, хрупкость, сжимаемость, разрушаемость и т. п.). Модель среды и разностная методика изложены в работах [2, 3].

Остановимся кратко на эффектах, которые имеют место при расширении полости, распространении ударной волны и при ее взаимодействии со щелью.

При $t > 0$ от поверхности полости R_0 распространяется ударная волна, во фронте которой вещество сжимается. При этом касательные напряжения возрастают и достигают критического значения $\tau_{\max} = \tau_{\text{кр}}$, что приводит к хрупкому разрушению породы (дроблению или раздавливанию). С удалением от центра взрыва амплитуда ударной волны уменьшается. К моменту выхода на радиус R_1 волна ослабевает настолько, что дальнейшего раздавливания на ее фронте не происходит.

За фронтом ударной волны вещество движется с положительной скоростью, вследствие чего возрастают напряжения, касательные к сферическим поверхностям. Если эти напряжения достигают критического значения $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{\text{кр}}$, то в области $R > R_1$ возникают радиальные трещины. Они начинаются на поверхности с радиусом R_1 и распространяются в породе в сторону увеличения R . Зона трещиноватости достигает радиуса $R_{\text{тр}}$. Здесь движение вещества от центра становится настолько слабым, что напряжения всегда остаются меньше предела прочности на разрыв $\sigma_{\text{кр}}$.

Рассмотрим вначале случай, когда в среде отсутствует щель. Размеры зон дробления и трещиноватости (рис. 1) зависят от предела упругости Y_0 и значения прочности на разрыв $\sigma_{кр}$. Эти зависимости устанавливались численно. Для выяснения характера изменения размеров зон дробления и трещиноватости от $\sigma_{кр}$ было проведено три расчета (1, 2, 3), а для выяснения зависимости размеров зоны дробления от Y_0 — два расчета (4, 5). Результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2.

По табл. 1 и 2 можно оценить значения логарифмических производных, с помощью которых определяется чувствительность модели к



Рис. 1. Схематическое изображение различных зон в среде после взрыва в случае, когда щель отсутствует. Полость ($R \geq R_п$):
A — зона раздавливания ($R_п < R < R_1$);
B — зона радиальных трещин ($R_1 < R < R_тр$).

изменениям численных значений некоторых параметров. Эти производные оказываются такими:

$$\frac{\partial \ln R_{тр}}{\partial \ln \sigma_{кр}} \approx 0,25, \quad \frac{\partial \ln R_1}{\partial \ln Y_0} \approx 0,62.$$

Значения производных указывают, с одной стороны, на устойчивость модели к погрешностям в определении $\sigma_{кр}$ и Y_0 , поскольку относительные погрешности в $R_{тр}$ и R_1 меньше, чем относительные погрешности в $\sigma_{кр}$ и Y_0 , а с другой стороны, позволяют определить погрешности расчетных значений $R_{тр}$ и R_1 , если известны погрешности, с которыми определяются в экспериментах $\sigma_{кр}$ и Y_0 .

Таблица 1

Зависимость размеров зон дробления A, трещиноватости B и R откола от прочности на разрыв $\sigma_{кр}$ в случае, когда щель отсутствует

Номер расчета	$\sigma_{кр}$, кбар	R_1 , м	$R_{тр}$, м	$M_A \cdot 10^3$	$M_B \cdot 10^3$	$R_1/q^{1/3}$	$R_{тр}/q^{1/3}$	Дневная поверхность, м	R откола, м
1	0,08	43,3	87,9	940	6,84	33,8	68,7	130	103
2	0,15	43,3	76,0	940	4,10	33,8	59,4	130	110
3	0,30	43,3	64,6	940	3,82	33,8	50,5	130	119

При выходе ударной волны на свободную поверхность (внутреннюю поверхность щели) происходит распад разрыва, вследствие чего обратно в среду распространяется волна разрежения. Эта волна разгрузки взаимодействует с волной разгрузки, распространяющейся от границы полости, что приводит к появлению в зоне интерференции разрушений откольного типа как в виде участков дробления, так и в виде отдельных откольных трещин (сферически симметричных). Поскольку при этом в прилегающих к свободной поверхности слоях увеличивается скорость движения вещества от центра, то при малых $R_{щ}$ могут возникнуть также и новые области с радиальными трещинами. Здесь необходимо различать два отдельных случая.

Таблица 2

Зависимость размеров зоны дробления от предела упругости Y_0 в случае, когда щель отсутствует ($\sigma_{кр} = 0,15$ кбар)

Номер расчета	Y_0 , кбар	R_1 , м	$M_A \cdot 10^3$	$R_1/q^{1/3}$
4	2,2	43,3	940	33,8
5	2,4	32,0	378	25,0

1. Случай, когда $R_{щ} < R_{тр}$ (имеется ввиду значение $R_{тр}$, полученное в задаче без щели). В этом случае область откольного разрушения ($R_2 \leq R \leq R_{щ}$) возникает на фоне радиальных трещин и имеет структуру, схематически изображенную на рис. 2:

2. Случай, когда $R_{тр} \ll R_{щ}$. Наблюдаемая здесь структура области откольного разрушения ($R_2 \leq R \leq R_{щ}$) схематически изображена на рис. 3.

В случае, когда $R_2 < R_{тр} < R_{щ}$, анализ зон разрушения осложняется. Рассмотрим характер изменения зон F, C, D, E при уменьшении $R_{щ}$, начиная со значений $R_{щ} \gg R_{тр}$. Прежде всего, при этом начинают уменьшаться размеры области F и при некотором $R_{щ}$ она исчезает. При уменьшении $R_{щ}$ увеличивается влияние сферичности при движении вещества в области E . Это может привести к появлению в области E радиальных трещин еще до того, как щель захлопнется. При дальнейшем уменьшении $R_{щ}$ зона B исчезает, когда R_1 станет равным R_2 . Иными словами, вместо зоны радиальных трещин остается зона C , в которой радиальные трещины перемежаются с областями полностью разрушенной породы. Расчеты показывают, что размеры кусков породы в зоне C уменьшаются вместе с уменьшением $R_{щ}$.

В момент закрытия щели возникают две ударных волны: головная, движущаяся от центра взрыва, и отраженная, распространяющаяся в сторону полости. В зависимости от первоначальной ширины щели порода на участке ($R_4 \leq R \leq R_{щ}$) может раздробиться во фронте отраженной ударной волны. При узкой щели такого дробления может и не быть. В расчетах ширина щели менялась в пределах от 0,9 до 2,5 м, однако существенных изменений в количестве раздробленной горной породы не наблюдалось.

Необходимо отметить, что при уменьшении ширины щели ее экранирующая роль ослабевает и зона радиальных трещин за щелью увеличивается. При ширине щели $\Delta R_{щ} \geq 1,6$ м зон трещиноватости за щелью не наблюдалось.

Расчеты позволяют установить количественные зависимости размеров зон дробления от положения щели $R_{щ}$. Такие зависимости, полученные численно, приведены в табл. 3. Из нее можно определить положение щели, при котором размеры глыб будут меньше допустимых размеров, определяемых техническими требованиями.

Развитие зон разрушения с течением времени в задачах со щелью и без нее существенно различается. Границы этих зон в переменных r, t приведены на рис. 4 и 5 (обозначение зон такое же, как и на рис. 2). В момент захлопывания щели средняя радиальная скорость вещества (U), находящегося в области трещиноватости E_2 , равна 38,6 м/с. Коэффициент трещиноватости в этой области (K_T), определяемый как отношение объема вещества вместе с объемом трещин к объему вещества, равен 1,08. В зоне дробления D_2 (рис. 4) средняя скорость в этот момент равна 35,4 м/с и коэффициент пористости (K_P), определяемый как отношение объема вещества вместе с объемом пор к объему вещества, равен 1,49. После закрытия щели отраженная ударная волна со скоростью, близкой к скорости звука

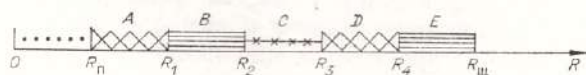


Рис. 2. Полость ($R < R_{щ}$):

A — зона раздавливания ($R_n < R < R_1$); B и E — зоны радиальных трещин ($R_1 < R < R_2$) и ($R_4 < R < R_{щ}$), D — зона откольного дробления ($R_2 < R < R_3$) и C — зона отдельных откольных сферических трещин на фоне радиальных трещин ($R_3 < R < R_4$) в случае, когда $R_{щ} < R_{тр}$.

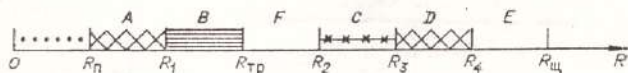


Рис. 3. F и E — зоны сплошной прочной породы ($R_{тр} < R < R_2$) и ($R_4 < R < R_{щ}$):

D — зона откольного дробления ($R_3 < R < R_4$) и C — зона отдельных откольных сферических трещин ($R_2 < R < R_3$) в случае $R_{щ} > R_{тр}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Атомные взрывы в мирных целях», сб. статей. М., Атомиздат, 1970.
2. В. Быченков, В. Гаджиева, В. Куропатенко. «Расчет взрывов в разрушаемых средах», докл. на I Всесоюз. семинаре по теории моделей механики сплош. среды. Новосибирск, 1971.
3. В. Быченков, В. Гаджиева. В сб. «Тр. II Всесоюз. конф. по численным методам решения задач теории упругости и пластичности». Новосибирск, 1971.

УДК 622.831

И. М. МИРЗАЕВ, В. С. НИКИФОРОВСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛОСКИХ ВОЛН И РАЗРУШЕНИЯ В УПРУГИХ И НЕИДЕАЛЬНО-УПРУГИХ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Изучение распространения волн напряжений, исследование результата их действия в твердых телах важно для решения многих задач. Ограничиваясь рассмотрением только плоских волн, можем указать такие важные области приложения подобных задач, как поведение составных конструкций, например различных стержневых систем, машин ударного действия и т. п., состояние слоистой среды вдали от источника волн и т. д. Важным в этих задачах является учет реального поведения материала — вязкость, ползучесть, разрушение.

Распространение волн напряжений в стержневых системах рассматривалось многими авторами. В качестве примера можно указать результаты, полученные для упругих систем численными [1], аналитическими [2—5] и графо-аналитическими методами [6]. В работах [7—11] производится учет реального поведения материала.

В настоящей работе рассматривается поведение одномерной составной конструкции под действием силовых факторов, приложенных на торцах [1, 7]. Каждый из стержней имеет геометрические размеры (длина, площадь поперечного сечения) и обладает вполне определенными свойствами. Будем полагать, что материал стержней подчиняется закону Гука, обладает вязкими свойствами или его поведение может быть описано моделью Больцмана [12].

1. Математически задачу можно сформулировать следующим образом. Уравнения движения в одномерном случае имеют вид:

$$\frac{\partial \sigma_i(x, t)}{\partial x} = \rho_i \frac{\partial^2 u_i(x, t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, k; 0 \leq x \leq l; t \geq 0,$$

где σ_i , u_i и ρ_i представляют собой напряжение и смещение в точке x в момент t и плотность i -го стержня. Общая длина составного стержня равна $l = \sum_{i=1}^k l_i$. В элементах i , обладающих свойствами ползучести, справедлива связь

$$\varepsilon_i(x, t) = \frac{1}{E_i} \left[\sigma_i(x, t) + \int_0^t L_i(t - \tau) \sigma_i(x, \tau) d\tau \right] \quad (2)$$

между деформацией ε_i и напряжением σ_i ; E_i — мгновенный модуль