

УДК 622.235

А.В. Дугарцыренов, С.И. Ким, А.Н. Петров, В.С. Марков

**РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВЕ
ТОРЦЕВОЙ ЧАСТИ СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА***

Дано обоснование расчетной схемы разрушения горной породы при взрыве торцевой части скважинного заряда взрывчатого вещества. Выявлен механизм разрушения и получены соотношения для расчета параметров зоны регулируемого дробления. Приведен пример разрушения кимберлитов вблизи границы закладки. Ключевые слова: горная порода, взрыв, скважина, разрушение.

Разрушение горных пород при взрыве торцевой части скважинного заряда определяет такие элементы взрывной отбойки как величина перебура при бурении скважин на карьерах или их недобура при добыче полезных ископаемых подземным способом.

В частности, скважинная отбойка руды при камерной системе разработки ромбовидными камерами связана с опасностью разрушения вышележащего закладочного массива в результате сейсмического и динамического воздействия взрыва. В то же время, из-за высокой ценности руды недопустимо оставление предохранительной рудной корки на границе «руда-закладка», что вызывает значительные потери руды. Все это требует достаточно точного определения зон разрушения при взрыве скважинных зарядов промышленных взрывчатых веществ (ПВВ). Разрушение руды вблизи границы с закладкой определяется напряженно-деформированным состоянием (НДС) кимберлитов,

вызванным взрывом донной части скважинных зарядов. Считается, что величина зоны разрушения от взрыва донной (торцевой) части скважинного заряда эквивалентна величине подобной зоны при взрыве сферического заряда, радиус которой равен радиусу скважины (рис. 1).

Таким образом, поставленная задача состоит в определении радиуса зоны регулируемого дробления (ЗРД) сферического заряда, равного величине недобура скважин, в зависимости от физико-механических свойств горной породы и свойств применяемого ПВВ. В настоящее время вопрос определения размеров зоны дробления при взрыве ПВВ рассматривается с разных позиций и существующие модели этого явления достаточно разнообразны.

Согласно современным представлениям область разрушения при камуфлетном взрыве сосредоточенного и удлиненного зарядов взрывчатого вещества (ВВ) в твердой среде (горной породе) может быть условно

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках комплексного проекта № 2010-21801-001 по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения.

разделена на зоны дробления, радиальных трещин и упругих деформаций [1—3].

Особое внимание при рассмотрении процесса разрушения должно быть уделено условию равновесия в системе «продукты детонации-порода». Равновесие в данной системе при камуфлетном взрыве возможно только при условии равенства конечного давления продуктов детонации (ПД) в полости p_k и радиального напряжения $\sigma_r = \sigma_{пр}$ на стенке полости, равного предельному значению $\sigma_{пр}$ для данной породы [4]:

$$\sigma_{пр} = -p_k. \quad (1)$$

Условие (1) подразумевает, что расширение полости в процессе разрушения и снижение давления ПД

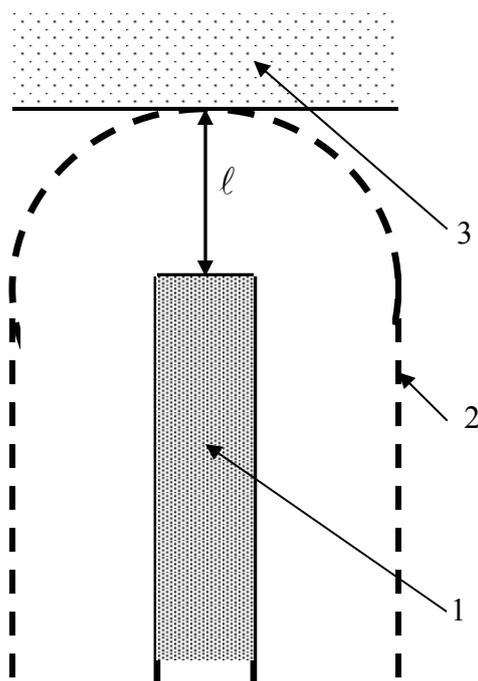


Рис. 1. 1 — заряд ПВВ; 2 — граница зоны разрушения; 3 — закладка; l — величина недобура

происходят до тех пор, пока силы сопротивления на стенке уже разрушенной полости со стороны породы не уравновесят давление ПД. Для выполнения условия (1) величина давления ПД должна уменьшиться на несколько порядков, поэтому здесь следует учитывать изменение коэффициента изоэнтропии взрывных газов в процессе их расширения. Подобная задача сама по себе достаточно сложная, поэтому здесь прибегают к различным приближениям, например используют звузвенную адиабату Джонса-Миллера.

Рассмотрим характер развития перемещений и напряжений при нагруженной сферической полости с учетом расширения продуктов детонации в ней [4]. Графики развития напряжений со временем для границы полости в случае взрыва заряда граммонита 79/21 ($p_0 = 6,8 \cdot 10^9$ Па, $k = 2,8$) в граните ($\nu = 0,22$; $E = 6,6 \cdot 10^{10}$ Па) представлены на рисунке 2. Здесь приняты безразмерные величины:

$$\bar{r} = \frac{r}{r_0}, \bar{t} = \frac{C_1}{r_0} t, \bar{\tau} = \frac{C_1}{r_0} \tau = \bar{t} -$$

$$-\bar{r} + 1, \tau = t - \frac{r - r_0}{C_1}$$

где r_0 и r — начальный и текущий радиус полости; C_1 — скорость продольных волн в породе; t — текущее время. Пунктирные прямые 1* и 2* на рис. 7 соответствуют статическому решению. Радиальное напряжение вначале уменьшается, а затем после $\bar{t} = 4$ стабилизируется к статическому значению (рис. 2). Отметим, что безразмерная единица времени ($\bar{t} = 1$) в расчетах соответствует размерному значению 94,64 мкс, т.е.

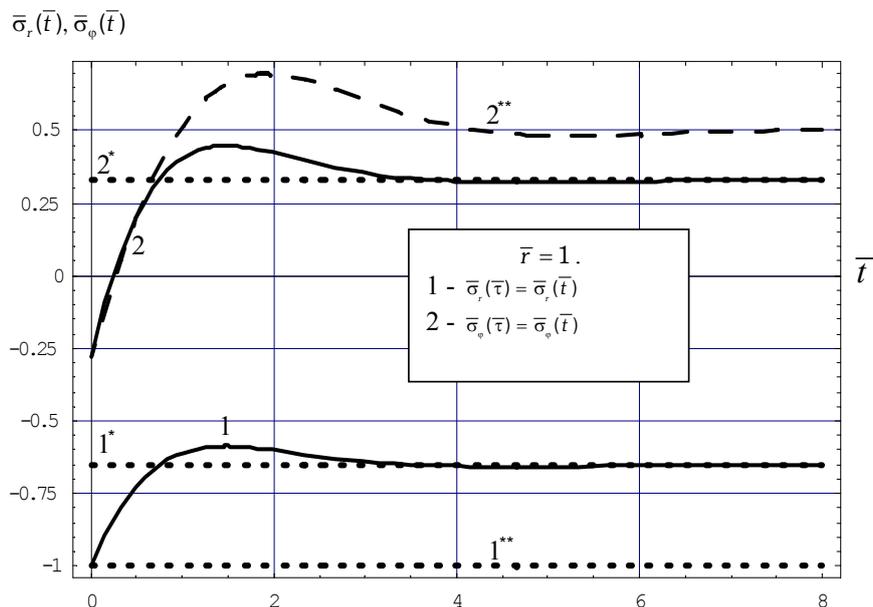


Рис. 2. Характер распределения напряжений при взрыве

$\bar{t} = 1 \Leftrightarrow t = r_0 / C_1 = 0,5 / 5283 =$
 $= 94,64 \cdot 10^{-6} = 94,64 \text{ мкс.}$ Следовательно, статический режим реализуется примерно через 470 мкс после начала нагружения полости.

Тангенциальное (полярное) напряжение в начальный период действия нагрузки имеет сжимающий характер, что далеко не очевидно. Далее оно уменьшается до нуля, меняет знак и после достижения некоторого максимума вновь снижается до своего статического значения. Такая картина развития напряжений имеет место, как указывалось ранее, в отсутствие разрушения породы. Поэтому вследствие разрушения стенок полости статический режим достигается значительно позже.

Согласно рис. 2, тангенциальное напряжение примерно до $\bar{t} = 0,28$ (:25 мкс) является так же, как и радиальное напряжение, сжимающим.

Следовательно, в самом начале нагружения полости ее стенки находятся в условиях всестороннего сжатия. Далее, разрыв в величинах данных напряжений увеличивается, соответственно возрастают максимальные касательные напряжения. Поэтому разрушение начинается сразу после нагружения полости, в условиях неравномерного сжатия, что приводит к образованию зоны дробления. Аналогичный характер имеет место при взрыве цилиндрического заряда.

Разрушение при взрыве сферического и цилиндрического зарядов в пористой породе происходит вначале за счет сжатия и уплотнения породы, затем развиваются радиальные трещины и дробления образованных клиновидных секторов [4]. Увеличение объема зарядной полости при этом достигается путем перемещения границы полости, освобождения объема пор и трещинообразования. При

этом имеет место существенное падение давления ПД в зарядной полости.

Эффективная граница ЗРД является поверхностью, огибающей концы радиальных трещин. Через эту поверхность осуществляется передача давления газов во взрывной полости к массиву горной породы.

Граница области разрушения радиуса r' движется со скоростью распространения трещин, сохраняя форму полости. В равновесном состоянии движение этой границы прекращается, и объем газов V в разрушенной области находится из выражения

$$V = V_0 + \Delta V' + \Delta V'' + \Delta V''' + \Delta V''', \quad (2)$$

где V_0 — первоначальный объем зарядной полости радиуса r_0 , $\Delta V'$, $\Delta V''$, $\Delta V'''$ и $\Delta V''''$ — прирост объема газов соответственно за счет сжатия разрушенной среды, закрытия пор, упругого и блочного смещения границы области разрушения до равновесного радиуса r . Радиус r является радиусом регулируемого дробления, так как зависит от параметров заряда ВВ и свойств породы.

Рассмотрим расширение сферической полости. Внутри ЗРД разрушенная среда находится в условиях всестороннего сжатия за счет равновесного давления p взрывных газов. Поэтому

$$\Delta V' = -\Delta V,$$

где ΔV — уменьшение объема разрушенной среды под действием всестороннего сжатия.

Известно, что

$$\frac{\Delta V}{V'} = -\frac{p}{K} \text{ и } V' = \frac{4}{3} \pi (r'^3 - r_0^3), \quad (4)$$

где V' — объем разрушенной среды до сжатия; K — коэффициент всестороннего сжатия.

Объединяя (3) и (4) находим

$$\Delta V' = \frac{4}{3} \pi \frac{p}{K} (r'^3 - r_0^3).$$

Далее при закрытии пор имеем

$$\Pi = \frac{\Delta V''}{V'},$$

где Π — пористость породы, $\Delta V'' = V_{\text{пор}}$ — объем пор в разрушенной среде.

Тогда

$$\Delta V' + \Delta V'' = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{p}{K} + \Pi \right) (r'^3 - r_0^3). \quad (5)$$

Очевидно, для смещения эффективной поверхности имеем

$$r - r' = u = u_{\text{упр}} + u_{\text{бл}} = \frac{r'p(1+\nu)}{2E} +$$

$$+ r' \bar{u}_{\text{бл}} \Leftrightarrow r = r' \left[1 + \frac{p(1+\nu)}{2E} + \bar{u}_{\text{бл}} \right],$$

где ν и E — соответственно коэффициент Пуассона и модуль упругости породы, $\bar{u}_{\text{бл}}$ — приведенная величина смещения, связанная с сдвижением блоков и закрытием трещин. Отсюда

$$\Delta V''' + \Delta V'''' = \frac{4}{3} \pi (r^3 - r'^3) = \frac{4}{3} \pi r'^3 L, \quad (6)$$

$$\text{где } L = 3 \left[\frac{p(1+\nu)}{2E} + \bar{u}_{\text{бл}} \right] +$$

$$+ 3 \left[\frac{p(1+\nu)}{2E} + \bar{u}_{\text{бл}} \right]^2 + \left[\frac{p(1+\nu)}{2E} + \bar{u}_{\text{бл}} \right]^3.$$

Подставляя найденные объемы в (3), получим

$$V = \frac{4}{3} \pi \times$$

$$\times \left\{ r_0^3 + \left(\frac{p}{K} + \Pi \right) (r'^3 - r_0^3) + r'^3 L \right\}. \quad (7)$$

В силу кратковременности процесса, имеет место адиабатическое расширение газа от начального давления p_0 до равновесного значения p . Оценку снижения давления газов в процессе расширения полости проведем на основе кусочно-непрерывной функции (адиабаты Джонса-Миллера) [5, 6]:

$$p(\rho) = \begin{cases} p_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma_1}, & \rho \geq \rho_*, \\ p_0 \left(\frac{\rho_*}{\rho_0} \right)^{\gamma_1} \left(\frac{\rho}{\rho_*} \right)^{\gamma_2}, & \rho \leq \rho_*, \end{cases} \quad (8)$$

где ρ_* — плотность газа при сопряжении адиабат; γ_1 и γ_2 — показатели изоэнтропы соответственно до и после сопряжения адиабат.

Поскольку для горных пород $p_0 \Delta \sigma_{пр}$, то в состоянии равновесия имеет место существенное снижение давления и соответственно плотности взрывных газов. Это позволяет использовать второе уравнение из (8), которое может быть преобразовано к виду

$$p = p_0 \left(\frac{\rho_*}{\rho_0} \right)^{\gamma_1} \left(\frac{\rho}{\rho_*} \right)^{\gamma_2} = p_0 \zeta \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\gamma_2}, \quad (9)$$

где $\zeta = \left(\frac{\rho_*}{\rho_0} \right)^{\gamma_1 - \gamma_2}$ — параметр адиабаты.

С учетом (7), получим

$$p = p_0 \zeta \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\gamma_2} = p_0 \frac{\zeta}{\left\{ 1 + \left(\frac{p}{K} + \Pi \right) \left[\left(\frac{r'}{r_0} \right)^3 - 1 \right] + L \left(\frac{r'}{r_0} \right)^3 \right\}^{\gamma_2}}.$$

Отсюда имеем

$$r' = r_0 \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{\zeta p_0}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma_2}} - 1 + \frac{p}{K}}{\frac{p}{K} + L + \Pi}}; \quad (10)$$

$$r = r_0 \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{\zeta p_0}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma_2}} - 1 + \frac{p}{K}}{\frac{p}{K} + L + \Pi}} \times \left[1 + \frac{p(1+\nu)}{2E} + \bar{u}_{\delta \sigma} \right]. \quad (11)$$

В состоянии равновесия отсутствуют инерционные силы и давление газов по границе 2 уравнивается только противодействием упругой среды (статическое состояние). Если принять критерий максимального растягивающего напряжения $\sigma_{рас}$, равновесие и прекращение движения границы ЗРД наступает при условии равенства тангенциального растягивающего напряжения на этой границе и предела прочности среды на растяжение $\sigma_{рас}$, т.е. имеем следующее условие равновесия:

$$p = 2\sigma_{рас}, \quad (12)$$

где $\sigma_{сж}$ — радиальное напряжение на границе области разрушения в равновесном состоянии среды.

Из соотношений (10), (11) и условия (12) имеем

$$r' = r_0 \cdot D_{sf}, \quad (13)$$

$$r = r_0 \cdot D_{sf} \cdot (1 + u_{sf}), \quad (14)$$

$$\text{где } D_{sf} = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{\zeta p_0}{2\sigma_{рас}} \right)^{\frac{1}{\gamma_2}} - 1 + \frac{2\sigma_{рас}}{K}}{\frac{2\sigma_{рас}}{K} + \Pi + L}}};$$

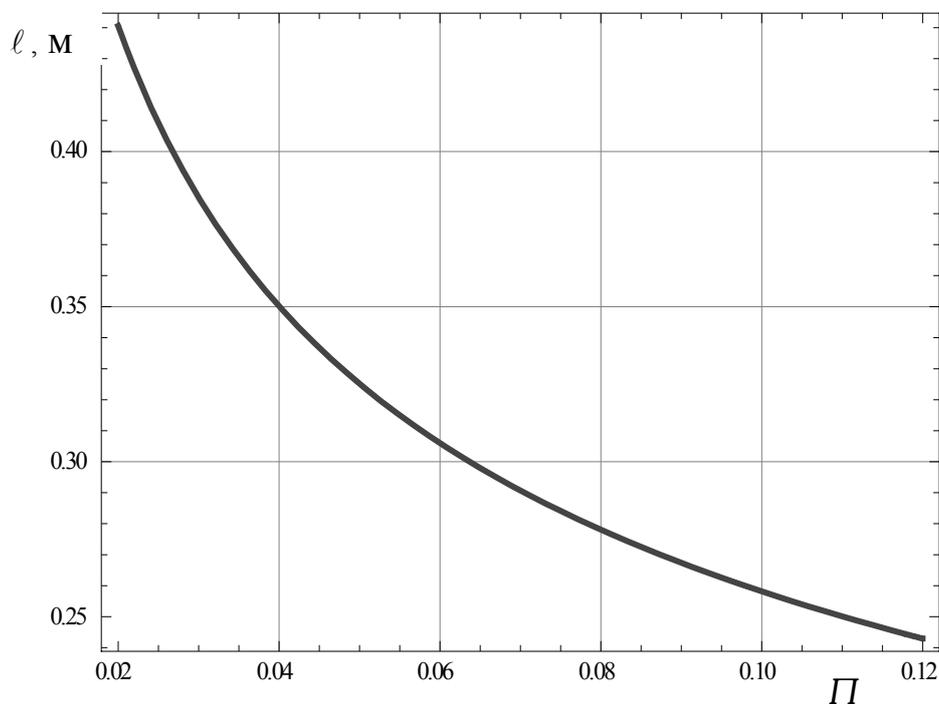


Рис. 3. График зависимости величины недобура от пористости

$$u_{sf} = \frac{\sigma_{pac}(1 + \nu)}{E} + \bar{u}_{\sigma n}.$$

Радиус зоны регулируемого дробления в торцевой части скважинного заряда эквивалентен величине недобура до границы руды с закладкой (рис. 1). Диаметр скважины составляет 75 мм. Соответственно эквивалентный сферический (сосредоточенный) заряд также имеет диаметр 75 мм. Поскольку закладка не имеет блочную структуру и является однородной, то блочное смещение равно нулю, т.е. $\bar{u}_{\sigma n} = 0$. Так как $\sigma_{pac} \Delta E$, то величина $L \approx 0$. Пористость кимберлитов колеблется от 5 до 10 % (или 0,05-0,1). Примем ее как переменную величину и получим величину недобура в виде функции от пористости (включая объем соб-

ственно пор, а также микротрещин и др.).

В качестве ПВВ принят предохранительный аммонит АП5ЖВ, скорость детонации которого находится в пределах 3,6-4,6 км/с [7]. Средняя плотность ПВВ составляет $\Delta = 1100 \text{ кг/м}^3$; показатель адиабаты по окончании процесса детонации равен $\gamma_0 = 2,8$; показатель двухзвенной адиабаты $\gamma_2 = 1,6$; параметр адиабаты $\zeta = 0,1037$. Среднюю прочность кимберлитов на растяжение принимаем равным 3 МПа. Предварительно находим давление ПД в точке Жуге

$$P_0 = \frac{\Delta \cdot D^2}{\gamma + 1} = 4,632 \cdot 10^9 \text{ Па.}$$

В силу принятых оценок расчет проводим по адаптированной формуле (14).

$$\ell = r = r_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{\zeta p_0}{2\sigma_{рас}}\right)^{\frac{1}{72}} - 1 + \frac{2\sigma_{рас}}{K}}{\frac{2\sigma_{рас}}{K} + \Pi}}$$

Отсюда величина недобура ℓ , как функция от пористости Π будет равна

$$\ell = 0,120 \cdot \left(\frac{1}{15,27 \cdot 10^{-5} + \Pi}\right)^{\frac{1}{3}}$$

График данной функции представлен на рис. 3.

Непосредственно из полученного графика видно, что величина недобура варьирует в пределах от 0,5 м при $\Pi = 0,02$ (2 %) до 0,27 м при $\Pi = 0,1$ (10 %). В частности величина недобура при средней пористости, равной 6 %, составляет 0,31 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чедвик П., Кокс А., Гопкинсон Г. Механика глубинных подземных взрывов. — М.: Мир, 1966.
2. Механический эффект подземного взрыва / В.Н.Родионов, В.В.Адуш-кин, В.Н.Костюченко и др. М.: Недра, 1971.
3. Григорян С.С. Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород // ПММ. — 1967. — Т.31. — Вып. 4.
4. Дугарцыренов А.В. Физическая природа и механизм разрушения горной породы при камуфлетном взрыве // Взрывное дело. — 2011. — № 106/63. — С. 112-126.
5. Шер Е.Н., Александрова Н.И. Исследование влияния конструкции скважинного заряда на размер зоны разрушения и время ее развития в горных породах при взрыве // ФТПРПИ. — 2007. — №4. — С. 76 – 85.
6. Коротков П.Ф. Соотношение объемов полостей при камуфлетных взрывах сосредоточенных и линейных зарядов // ФТПРПИ. — 1999. — №3. — С. 58-63.
7. Мангуш С.К., Фисун А.П. Справочник по буровзрывным работам на подземных горных разработках. 2003. — 344 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Дугарцыренов А.В., Ким С.И. — Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru
 Петров А.Н., Марков В.С. — Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, infoysu@mail.ru

