

УДК 622.235

**М.Г. Менжулин, А.Ю. Казьмина, П.И. Афанасьев,
А.А. Бульбашев**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ЭНЕРГИЕЙ
ДИССИПАЦИИ ПАРАМЕТРАМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА
В ТЕХНОЛОГИИ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ
ГОРНОЙ ПОРОДЫ**

Предложен способ определения средних размеров кусков разрушенной взрывом горной массы в зоне трещинообразования, основанного на термодинамическом рассмотрении разрушения горных пород. А также приводится обоснование возможности термодинамического рассмотрения трещин в соответствии с законом Гесса и распределением Гиббса.

Ключевые слова: гранулометрический состав, распределение Розина-Раммлера, энергия диссипации, образование трещин.

Для описания гранулометрического состава разрушенной горной массы наиболее часто применяются распределение Розина-Раммлера [7]:

$$m_+(x_i) = m_0 \cdot e^{-\left(\frac{x_i}{l_{00}}\right)^n}, \quad (1)$$

где $m_+(x_i)$ – выход разрушенной горной массы сверху, m_0 – общая разрушенная горная масса, x_i – размер куска разрушенной горной массы, n – показатель формы куска, l_{00} – показатель масштаба.

Разрушение при камуфлетном взрыве можно условно разделить на две зоны:

- ближняя, в которой происходят наиболее сложные процессы диссипации энергии;
- средняя, в которой разрушение горной породы происходит без существенной диссипации.

Радиус ближней зоны $R_{оз}$ составляет (8÷12) $R_{оз}$, радиус средней зоны

достигает до (40÷50) $R_{оз}$, где $R_{оз}$ – радиус заряда.

Очевидно, что в общем объеме разрушенной горной массы роль ближней зоны относительно невелика. Эта зона существенна для расчета энергии диссипации. Поэтому, если пользоваться уже известными данными об энергии диссипации, то для средней зоны может быть принят некоторый эффективный радиус заряда:

$$R_{оз}^{эф} = R_{оз} \sqrt{\frac{\rho_{ВВ} Q_{ВВ}}{\rho_3 Q_3}} \sqrt{\frac{E_0 - E_{дис}}{E_0}},$$

где $\rho_{ВВ}$, $Q_{ВВ}$ – плотность и удельная теплота взрыва применяемого заряда ВВ; ρ_3 , Q_3 – параметры некоторого эталонного заряда; E_0 – энергия взрыва ($E_0 = q \cdot Q_1$); $E_{дис}$ – энергия диссипации.

Радиус разрушенной горной массы камуфлетного взрыва определяется радиусом трещинообразования $R_{тр}$. При известном значении динамиче-

ской прочности на растяжение $\sigma_{отр}^{*дн}$, $R_{мп}$ определяется из условия:

$$\sigma(R_{тр}) \geq \sigma_{отр}^{*дн}. \quad (2)$$

В зоне трещинообразования величина $E_{дис}$ несколько увеличивается, при $\bar{r} > \bar{R}_{ос}$, \bar{r} — относительное расстояние.

Нетрудно найти связь между энергией диссипации и средним радиусом разрушенной породы на расстоянии \bar{r} . С этой целью рассмотрим физические процессы образования и дальнейшего преобразования энергии диссипации.

Существуют различные способы оценки потери энергии при взрыве. В [3] принимается, что энергия диссипации $E_{дис}$ представляет собой разность между запасенной на максимуме волны напряжения E_{ϕ} и энергией разгрузки E_p :

$$E_{дис} = E_{\phi} - E_p. \quad (3)$$

Энергия нагрузки легко определяется с помощью уравнения Гюгонио:

$$E_{\phi} - E_0 = \frac{1}{2}(\sigma_{\phi} + \sigma_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_{\phi}} \right), \quad (4)$$

где σ_{ϕ} , σ_0 — гидростатическое напряжение на максимуме волны напряжения и в невозмущенной среде соответственно; ρ_{ϕ} , ρ_0 — плотность среды на максимуме волны напряжения и в невозмущенном состоянии.

Для расчета E_{ϕ} необходимо знать ударную адиабату среды $\sigma(\rho_{\phi})$.

Ударная адиабата может быть представлена в виде:

$$\sigma_{\phi} = \rho_0 \cdot U_{\phi} \cdot C_v,$$

где U_{ϕ} , C_v — скорость частицы на фронте ударной волны и скорость объемной волны [5].

Для расчета кривой разгрузки может быть использовано уравнение Тэта:

$$\sigma = \frac{\rho_0 C_v^2}{n(s)} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{n(s)} - 1 \right],$$

где $n(s)$ — показатель, зависящий от энтропии s , ρ_0 — плотность среды в невозмущенном состоянии.

На фронте ударной волны энтропия среды повышается с увеличением напряжения.

В работах [4,7] показано, что на каждом из расстояний от заряда справедливо свое распределение Розина-Рамллера с коэффициентами l_{00}

и n , зависящими от расстояния \bar{r} .

Для \bar{L} из результатов экспериментов в [7] получено соотношение:

$$\bar{L} = 7 \cdot 10^{-4} \left(\frac{r}{R_{ос}} \right)^{2,45} R_{ос}. \quad (3)$$

где $R_{ос}$ — радиус заряда, \bar{L} — средний на расстоянии \bar{r} размер куска. На меньших расстояниях размер куска изменяется сильнее.

При ядерных взрывах в грунтах средний размер куска меняется [1,4]:

$$\bar{L} = 0,007 \left(\frac{q}{q_0} \right)^{\frac{1}{6}} \bar{R}^{2,3},$$

где q — теплота взрыв, $q_0 = 4,2 \cdot 10^{12}$ Дж, \bar{R} — приведенное расстояние.

Зависимости \bar{L} для любой среды и взрыва ВВ произвольного состава в настоящее время не существует. Очевидно, что образование кусков происходит в результате развития и слияния трещин. Образование кусков может рассматриваться как процесс

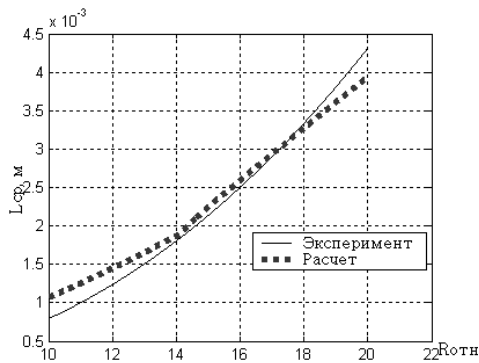


Рис. 1. Зависимость среднего размера куска на каждом относительном расстоянии в канифоли

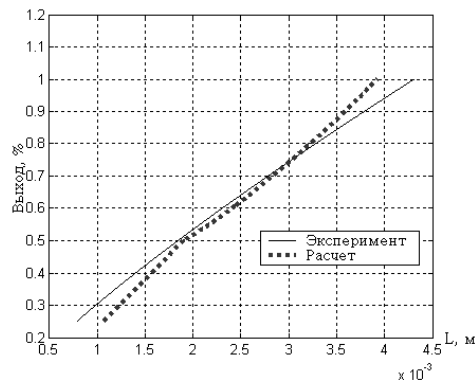


Рис. 2. Кумулятивные кривые для канифоли

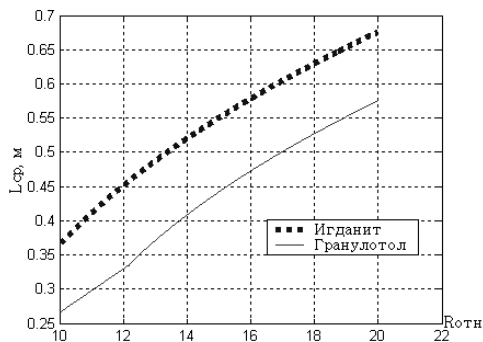


Рис. 3. Зависимость среднего размера куска на каждом относительном расстоянии в граните для разных типов ВВ

образования, развития и слияния трещин в приближении статической физики. Возможность применения та-

кого приближения к рассмотрению трещин можно показать следующим образом. Образование трещин является заключительным этапом развития подвижных дефектов – точечных (дефектов по Френкелю и Шоттки), линейных (дислокаций и линейных скоплений точечных дефектов). Поверхностная энергия образующихся трещин является суммой энергий дефектов с учетом их частичной аннигиляции. Плотность поверхностных молекул равна ретикулярной плотности, т.е., на поверхностях трещин все молекулы имеют разорванные связи. На основании закона Гесса [2] можно рассматривать только начальное и конечное состояния среды и исключать из рассмотрения все промежуточные. На этом основании одним из авторов настоящей работы была разработана термокинетическая модель фазовых переходов на поверхностях трещин в процессе деформирования и разрушения горных пород [6]. В зоне трещинообразования энергия куска определяется соотношением:

$$E_k = \frac{l_k^2 \cdot \gamma_s \cdot k_\phi \cdot N_{гр}}{4},$$

где l_k – габаритный размер куска, γ_s – поверхностная энтропия, $k_\phi = \frac{S_k}{l^2}$ – коэффициент, учитывающий отклонение поверхности куска от идеально-гладкой, $N_{гр}$ – количество граней куска.

В качестве функции распределения энергий кусков может использоваться распределение Гиббса:

$$\omega(e_i) = \exp\left(-\frac{e_k}{e_0}\right),$$

где e_0 – энергия, затрачиваемая на образование куска среднего размера, $\omega(e_i)$ вероятность иметь энергию e_i .

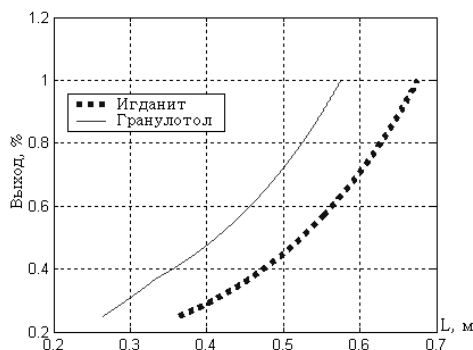


Рис. 4. Кумулятивные кривые для различных типов ВВ в граните

Отсюда энергия, затрачиваемая на образование кусков, определяется как:

$$E = \int_0^e e_k \exp\left(-\frac{e_k}{e_0}\right) de. \quad (4)$$

Приравняв данную энергию (4) к величине диссипации энергии, получаемой на каждом относительном ра-

диусе заряда, можно найти средний размер куска разрушенной горной массы.

Полученные теоретические результаты сравнивались с экспериментальными данными работы [7].

На рис. 1 и 2 изображены экспериментальные и расчетные результаты.

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что данный способ может быть использован для определения гранулометрического состава разрушенной горной массы. Данный подход был использован для расчета среднего размера куска с учетом физико-механических свойств гранитной горной породы (рис. 3, 4).

Из расчетов можно сделать вывод, что применяемые ВВ, имеющие меньшую величину энергии диссипации, обеспечивают меньший выход мелких фракций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В. *Подземные взрывы* / В.В. Адушкин, А.А. Спивак // М.: Наука. 2007. 579с.
2. Дубнов Л.В. *Промышленные взрывчатые вещества*. / Л.В. Дубнов, Н.С. Бахаревич, А.И. Романов // М: Недра, 1988. — 358 с.
3. Баум Ф.А. *Физика взрыва* М.: Наука. 1959. 800с.
4. Замышляев Б.В. *Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред* / Б.В. Замышляев, Л.С. Евтерев // М.: Наука, 1990. 215с.
5. Менжулин М.Г. *Формирование продольных и объемных волн в окрестности полости при взрыве ВВ в горных породах*. / М.Г. Менжулин, В.Е. Бровин // Записки Горного Института, 2009. — Т. 180. — С. 165—168.
6. Менжулин М.Г. *Фазовые переходы на поверхностях трещин при разрушении горных пород* // ДАН РФ., 1993, Т. 328. №3. С.305-307
7. Родионов В.Н. *Основы геомеханики*. / В.Н. Родионов, И.А. Сизов, В.М. Цветков // М., Недра, 1986, 301с. **ГАЗ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Менжулин М.Г. — доктор технических наук, профессор, тел. 8-981-743-1501,
 Казмина А.Ю. — аспирант, e-mail: kazmina.anna@gmail.com,
 Афанасьев П.И. — аспирант, e-mail: afan@mail.ru,
 Бульбашев А.А. — аспирант, e-mail: ermoso@bk.ru.
 Санкт-Петербургский государственный горный университет.

