

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРУШЕНИИ

*А. И. Крючков, канд. техн. наук (НТУУ "КПИ")*

*Розглянуто жорсткий режим навантаження при випробуванні зразка гірської породи. Виконано аналітичний опис енерго-деформаційної характеристики, яка поєднує дограничний, граничний та заграничний режим деформації і руйнування порід.*

При обычных испытаниях образца горных пород в так называемом мягком режиме нагружения достижение максимального напряжения  $\sigma_c$  приводит к резкому падению несущей способности образца без увеличения деформации, то есть запредельная ветвь на графике деформации будет практически вертикальной. При разрушении образца накопленная энергия упругих деформаций испытательного устройства и самого образца почти мгновенно переходит в кинетическую энергию элементов нагружающего устройства и кинетическую энергию разлетающихся осколков образца, что совершенно искажает картину запредельного деформирования породы. Таким образом, традиционный мягкий режим нагружения горных пород позволяет зафиксировать максимальную несущую способность конкретного образца, но не позволяет установить предел прочности самого материала.

При жестком режиме нагружения (рис. 1) максимальная несущая способность образца  $\sigma_c$  соответствует пределу мгновенной прочности горной породы на одноосное сжатие  $\sigma_c^*$  [1, 2].

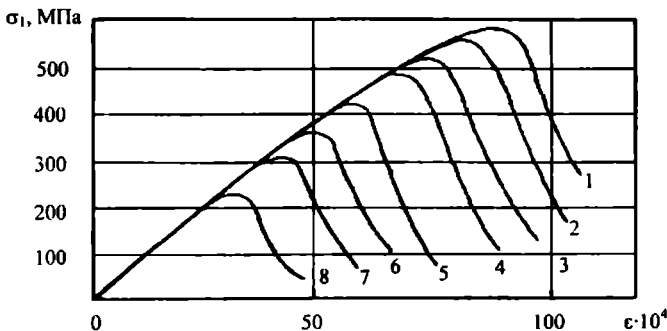


Рис. 1. Экспериментальная полная диаграмма деформирования горных пород при различной величине бокового давления, МПа: 1 -  $\sigma_3 = 2,45$ ; 2 -  $\sigma_3 = 2,1$ ; 3 -  $\sigma_3 = 1,75$ ; 4 -  $\sigma_3 = 1,4$ ; 5 -  $\sigma_3 = 1,05$ ; 6 -  $\sigma_3 = 0,7$ ; 7 -  $\sigma_3 = 0,35$ ; 8 -  $\sigma_3 = 0,035$

Дальнейшее увеличение деформации  $\epsilon$  приводит к плавному уменьшению несущей способности образца до минимального значения  $\sigma_{\min}$ , называемого остаточной прочностью горной породы (прочностью руинного состояния) (рис. 2). Построение таких полных диаграмм нагружения возможно только в жестком режиме нагружения, когда жесткость прессы превышает жесткость образца. Наиболее простой способ испытаний в таком режиме [1, 2] заключается в построении кривых деформации по результатам циклических нагружений на установке с ограничителями деформаций в виде жестких упоров. Огибающая отдельных диаграмм нагружения и разгрузки дает полную диаграмму деформации и разрушения горной породы как на допредельном, так и на предельном и запредельном участках нагружения (см. рис. 2).

$\sigma_1$ , МПа

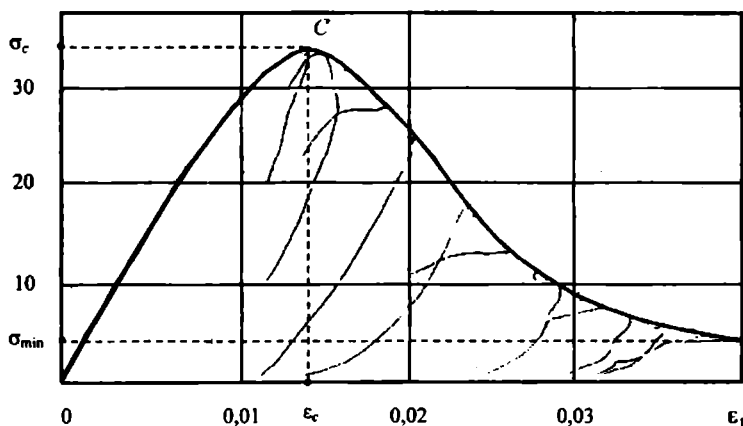


Рис. 2. Полная диаграмма деформирования образца алевролита [4]

Результаты экспериментальных и аналитических исследований полных диаграмм нагружения горных пород позволяют предположить, что зависимость максимального главного напряжения  $\sigma_1$  от главной деформации  $\epsilon_1$  может быть представлена в виде выражения

$$\sigma_1 = \sigma_0 \exp\left(\frac{u_c - \sigma_0 \epsilon_1}{u_0}\right) \exp\left[-\exp\left(\frac{u_c - \sigma_0 \epsilon_1}{u_0}\right)\right] + \sigma_{\min} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_0 \epsilon_1}{u_0}\right)\right], \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – постоянное напряжение, входящее в энергию активации  $u_0$  для данного типа породы;  $u_c = \sigma_0 \epsilon_c$  – энергия разрушения, соответствующая максимальному напряжению  $\sigma_1 = \sigma_c$  при деформации  $\epsilon_1 = \epsilon_c$  (см. рис. 2);  $u_0 = \sigma_0 \epsilon_0$  – максимальное значение потенциального энергетического барьера

при разрушении горной породы (энергия активации);  $\sigma_{\min}$  – минимальная сопротивляемость породы разрушению в запредельном состоянии.

Результаты исследования связи минимальной сопротивляемости породы разрушению в случае объемного напряженного состояния [2, 5, 6] наименьшим главным напряжениям  $\sigma_3$  позволяют записать соотношение

$$\sigma_{\min} = (1 + 2\lambda)\sigma_3, \quad (2)$$

где  $\lambda$  можно выразить через угол внутреннего трения горной породы  $\varphi$ :

$$\lambda = \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (3)$$

При испытании образца горной породы на одноосное сжатие ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ) минимальное сопротивление разрушению  $\sigma_{\min}$  приближается к нулю (рис. 3). Этот режим испытаний позволяет установить основные параметры зависимости  $\sigma_1 = f(\epsilon_1)$ , такие как  $\epsilon_c, \epsilon_0, \sigma_0, u_0, u_c$ . Для этого определим объемную плотность энергии, затраченной на разрушение образца горной породы, путем интегрирования выражения (1):

$$u(\epsilon_1) = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1(\epsilon_1) d\epsilon. \quad (4)$$

После подстановки зависимости (1) и взятия интеграла получим

$$u(\epsilon_1) = u_0 \exp \left[ - \exp \left( \frac{u_c - \sigma_0 \epsilon_1}{u_0} \right) \right] + \sigma_{\min} \epsilon_1 - \left[ \sigma_{\min} \epsilon_0 \left( 1 - \exp \left( - \frac{\sigma_0 \epsilon_1}{u_0} \right) \right) \right]. \quad (5)$$

При одноосном сжатии образца выражение (5) упрощается:

$$u(\epsilon_1) = u_0 \exp \left[ - \exp \left( \frac{u_c - \sigma_0 \epsilon_1}{u_0} \right) \right]. \quad (6)$$

Результаты интегрирования представлены на рис. 3. Максимальная энергия активации для алевролита составляет  $u_0 = 0,7$  МДж/м<sup>3</sup>. Сравнение экспериментальных и расчетных значений энергетической зависимости  $u(\epsilon_1)$  (6) показывает их совпадение почти во всем диапазоне изменения деформации ( $\epsilon_1 = 0 \dots 0,04$ ).

После двойного логарифмирования выражения (6) получим

$$u_0 \ln \left[ - \ln \frac{u(\epsilon_1)}{u_0} \right] = u_c - \sigma_0 \epsilon_1, \quad (7)$$

то есть в двойных логарифмических координатах энергетическая зависимость  $u(\epsilon_1)$  может быть представлена в виде прямой линии, что позволяет определить параметры  $u_c$  и  $\sigma_0$  (рис. 3).

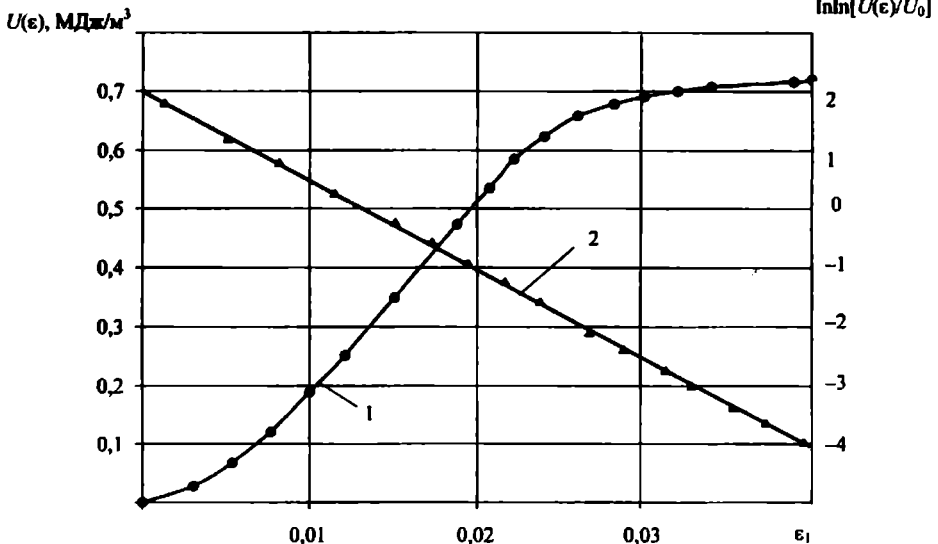


Рис. 3. Энергетическая диаграмма (1) деформирования образца алсворолита и ее двойной логарифм (2).

Проведенные исследования показывают, что плотность энергии, затрачиваемой на деформацию и разрушение образца горной породы, определяется величиной линейной деформации  $\epsilon_1$  по установленной зависимости (6). Экспериментальные и теоретические исследования позволяют сделать ряд выводов.

1. Испытание образцов горных пород при жестком нагружении (девиаторное нагружение) позволяет получить полную деформационную характеристику породы.

2. Огибающая циклов деформации (5) объединяет допредельные, предельные и запредельные режимы деформации и разрушения пород.

3. Энергетическая огибающая циклов деформации аналитически может быть описана выражением (5), подтвержденным экспериментально.

4. Энергетическая огибающая циклов деформации (5) позволяет установить, что разрушение может происходить при разных значениях плотности энергии  $u(\epsilon)$ .

2. *Баклашов И. В., Картозия Б. А.* Механические процессы в породных массивах: Учебник для ВУЗов. – М.: Недра, 1986. – 272 с.

3. *Гудман Р.* Механика скальных пород / Пер. с англ. Ю. Б. Мгалобелова и Р. Р. Тиздела; Под ред. С. Б. Ухова. – М.: Стройиздат, 1987. – 232 с.

4. *Баклашов И. В.* Деформирование и разрушение породных массивов. – М.: Недра, 1988. – 271 с.

5. *Глушко В. Т., Виноградов В. В.* Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. М.: Наука, 1981.

6. *Петухов И. М., Линьков А. М.* Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983.

УДК 622.235.5

## РЕЗУЛЬТАТИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДІЇ ВИБУХУ НА ВИКИД СФЕРИЧНИХ ЗАРЯДІВ У ШАРУВАТИХ ГРУНТАХ

*І. А. Лучко, докт. техн. наук, А. І. Лучко, студ. (НТУУ "КПІ")*

*Получены корреляционные зависимости размеров воронок выброса от определяющих параметров взрыва сферических зарядов взрывчатых веществ в двухслойных грунтах на основе обработки результатов экспериментов с использованием теории подобия и размерности.*

З використанням теорії подібності та розмірності отримано [1], що розміри воронки викиду і параметри вибухів сферичних зарядів вибухових речовин (ВР) у двошарових грунтах задовольняють співвідношенням

$$\frac{R}{W}, \frac{H}{W}, \frac{S}{W^2}, \frac{V}{W^3} = f_1(\Pi_{1c}) \cdot f_2(\Pi_{2c}) \cdot f_3(\Pi_{3c}), \quad (1)$$

де  $R$  – радіус;  $H$  – видима глибина;  $S$  – площа поперечного перерізу;  $V$  – об'єм воронки викиду;  $W$  – глибина закладання заряду;  $f_i$  – безрозмірні функції своїх безрозмірних аргументів, визначаються з експериментальних досліджень;  $i \rightarrow R, H, S, V$ ;

$$\Pi_{1c} = \epsilon W^{-\frac{11}{3}} \alpha_1^{\frac{1}{3}} (\rho_0 g)^{\frac{2}{3}} \rho_0^{-\frac{1}{3}}; \quad (2)$$

$$\Pi_{2c} = \epsilon W^{-\frac{11}{3}} \alpha_1^{\frac{1}{3}} (\rho_1 g)^{\frac{2}{3}} \tau^{-\frac{1}{3}}; \quad (3)$$

$$\Pi_{3c} = \frac{h}{W}; \quad (4)$$