УДК 622.271

В.А.ПАДУКОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ЭНТРОПИЙНЫЙ ЗАКОН РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Сформулирован энтропийный закон разрушения горных пород, согласно которому удельная энергоемкость разрушения горных пород пропорциональна произведению структурной энтропии на прочность породы растяжению.

The entropy law of rock failure has been enunciated, according to which the specific energy volume of rock failure is proportional to the product of structural entropy by the tensile strength of rock.

Работами В.Л.Кирпичева, П.Риттингера, Ф.Бонда [2, 5] установлено, что затраты энергии при разрушении пород могут быть пропорциональны разрушаемому объему (гипотеза Кирпичева), вновь образованной поверхности продуктов разрушения (гипотеза Риттингера) и среднему геометрическому из объема и вновь образованной поверхности объекта разрушения (гипотеза Бонда, 1952).

Пределы справедливости и условия применения рассматриваемых гипотез до сих пор остаются дискуссионными. Гипотезы Кирпичева и Риттингера объединяются гипотезой Ребиндера, согласно которой общие затраты энергии при разрушении горных пород должны включать в себя как затраты на деформацию, так и затраты, связанные с образованием новых поверхностей:

$$A = \frac{\sigma_r^2}{2E} V + \sigma_{\text{п}} F,$$

где A – суммарная энергоемкость разрушения; σ_r – прочностная характеристика породы; E – модуль упругости; V – объем разрушения; $\sigma_{\text{п}}$ – плотность поверхностной энергии; F – вновь образованная поверхность.

При $\sigma_{\text{п}} F << \frac{\sigma_r^2}{2E} V$ вторым членом уравнения (1) можно пренебречь, тогда оно начинает отражать точку зрения В.Л.Кирпичева.

В технологии взрывных работ величину заряда взрывчатого вещества (ВВ) определяют по формуле Фролова, аналогичной формуле Ребиндера [8]:

$$Q = a_1 W^3 + a_2 W^2,$$

где Q – масса заряда ВВ; a_1 и a_2 – опытные коэффициенты; W – линия наименьшего сопротивления.

Предполагая, что общая поверхность кусков породы пропорциональна площади поверхности воронки взрыва ($F_{\text{н}} = F_{\text{в}}$), А.Ф.Суханов дифференцирует затраты энергии на отрыв взрывной воронки от массива, дробление породы и на преодоление сил инерции разрушаемого объема [7]:

$$Q = g_1 F + g_2 V$$

или

$$g = g_1 \frac{F}{V} + g_2,$$

где g_1 – расчетный расход ВВ на 1 м^2 площади отрыва, кг; g_2 – расчетный расход ВВ на 1 м^3 разрушаемого массива, кг; F – площадь отрыва по боковой поверхности воронки взрыва; V – объем воронки взрыва.

Формула Суханова аналогична формуле Ребиндера.

Из формул Ребиндера, Фролова, Суханова следует, что с увеличением объема разрушения удельная энергоемкость уменьшается, т.е. она является величиной вариативной. Таким образом, удельная поверхность является не только количественной характеристикой среднегармонического размера разрушенного объема породы, но и ка-

чественной с точки зрения энергетики процесса. Этот вывод отражает закон диспропорциональности природы: законы природы являются неинвариантными, асимметричными относительно масштабных преобразований.

Сопоставляя расширенное определение понятия симметрии, данное П.Кюри [3], с понятием структурной энтропии, являющейся количественной мерой изменений информации в процессах, можно прийти к выводу о близости этих понятий. Поэтому была предпринята попытка поиска новых типов инвариантов (симметрии) удельных затрат энергии при упругом и пластическом деформировании и разрушении горных пород на основе теории информации [4, 6].

Функция структурной энтропии – $\Sigma P_i \log P_i$ является обобщенной математической моделью гипотез целого ряда наук (акустики, механики грунтов и горных пород, металловедения), отражающих зависимость восприятия биологических и механических систем от интенсивности источника: интенсивность меняется в геометрической прогрессии, а восприятие – в арифметической.

Существующие соотношения для определения затрат энергии при упругом и пластическом деформировании, а также разрушении горных пород являются частными случаями формулы структурной энтропии.

На основании формулы структурной энтропии инвариантная зависимость удельной энергоемкости разрушения горных пород может быть выражена в виде

$$a = 0{,}5\sigma_{\text{р}} \ln \frac{F_V}{F_{V_0}},$$

где $\sigma_{\text{р}}$ – прочность породы на растяжение; F_{V_0} и F_V – удельные поверхности блоков, кусков до и после разрушения соответственно.

Технологической характеристикой деградации горного массива является степень дробления $i = F_V / F_{V_0}$, а информационной ее характеристикой – структурная энтропия $H = \log_2 i$. Взаимосвязь удельной энергоемкости разрушения горных пород и структурной энтропии может быть представлена в виде

$$a = 0{,}5\sigma_{\text{р}} \ln i = 0{,}35\sigma_{\text{р}} H.$$

В соответствии с циклом Карно КПД использования колебательной энергии при трещинообразовании $\eta \le 0{,}3$. В этой связи теоретическая удельная энергоемкость разрушения горных пород

$$a_{\text{т}} = \sigma_{\text{р}} H.$$

Можно сформулировать энтропийный закон разрушения горных пород следующим образом: удельная энергоемкость разрушения горных пород пропорциональна произведению структурной энтропии на прочность породы растяжению. Учитывая, что разрушение горных пород является процессом дискретным, выражение для структурной энтропии приобретает вид

$$H = \log_2 2^n = n,$$

где n – число стадий дробления.

Это означает, что величина структурной энтропии совпадает численно с числом стадий дробления. При $H = n$ энтропийный закон разрушения примет вид

$$a_{\text{т}} = \sigma_{\text{р}} n.$$

При $n \le 1{,}0$ процесс деградации массива можно назвать разрушением, при $n = 2, 3, 4, \ldots$ – процессом дробления. При разрушении горных пород ($H \le 1{,}0$) удельная энергоемкость разрушения численно совпадает с прочностью породы на растяжение:

$$a_{\text{т}} = \sigma_{\text{р}}.$$

Этот вывод впервые был предсказан А.В.Топчиевым: минимальной энергоемкостью при отрыве является предел прочности материала на растяжение.

Учитывая коэффициент перевода (1 кг/см^2 = 0,0272 кВт·ч/м^3), можно на основе классификации горных пород по прочности на растяжение [1] составить физическую классификацию горных пород по удельной энергоемкости разрушения, которая в на-

стоящее время отсутствует в горной науке (см. таблицу).

Классификация горных пород по энергоемкости разрушения

$\sigma_р$, кг/см^2	$a_т$, кВт·ч/м^3	Породы
25	0,69	Слабые
25-35	0,69÷0,95	– " –
35-48	0,95÷1,3	Ниже средней крепости
48-65	1,3÷1,7	– " –
65-86	1,7÷2,3	– " –
86-112	2,3÷3,0	Средней крепости
112-145	3,0÷4,0	– " –
145-185	4,0÷5,0	Крепкие
185-275	5,0÷7,5	Очень крепкие
275	7,5	Крепчайшие

Предлагаемая классификация является развитием идей А.Е.Ферсмана, Н.М.Федоровского по энергетической классификации полезных ископаемых.

Значимость классификации определяется задачами энергосбережения, экологии при разработке полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Барон Л.И.* Сопротивляемость горных пород отрыву / Л.И.Барон, Л.Г.Керекелица. Киев: Наукова Думка, 1974.

2. *Кирпичев В.Л.* Сопротивление материалов. М.: ОНТИ, 1928.

3. *Кюри П.* Избранные труды. М.: Наука, 1966.

4. *Падуков В.А.* Горная геомеханика / СПГГИ. СПб, 1997.

5. *Ребиндер П.А.* Понизители крепости пород в бурении / П.А.Ребиндер, Л.А.Шрейнер, К.Ф.Жигач. М.: Изд-во АН СССР, 1944.

6. *Седов Е.Е.* Эволюция и информация. М.: Наука, 1976.

7. *Суханов А.Ф.* Действие взрыва в среде // Горное дело. Энциклопедический словарь. М.: Углетехиздат, 1958. Т.4.

8. *Фролов М.М.* Исследования о минных горнах // Приложение к инженерному журналу. СПб, 1868. № 3.