



УДК 622.73

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ

Л. Ж. Горобец,

доктор технических наук, профессор,
Государственное высшее учебное заведение
«Национальный горный университет».

Изучено применение метода предельного неравнокомпонентного деформирования для расчета энергетических параметров разрушения и диспергирования геоматериалов. Установлено влияние концентрации напряжений при одноосном и объемном нагружении пород и минералов на энергоемкость разрушения. Даны рекомендации рациональных видов нагружения квазихрупких и квазипластичных природных сред.

Ключевые слова: нагружение сжатием, концентрация напряжений, диспергируемость геосред.

ЕНЕРГОЄМНІСТЬ РУЙНУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ ПРИ РІЗНИХ ВИДАХ НАВАНТАЖЕННЯ

Л. Ж. Горобец,

доктор технічних наук, професор,
Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет»

Вивчено використання методу поза межної нерівнокомпонентної деформації для розрахунку енергетичних параметрів руйнування і диспергування геоматеріалів. Встановлений вплив концентрації напружень при одноосному і об'ємному навантаженні порід і мінералів на енергоємність руйнування. Надані рекомендації раціональних видів навантаження квазікрихких і квазіпластичних природних середовищ.

Ключові слова: навантаження стискуванням, концентрація напружень, диспергованість геосередовищ

Постановка проблемы. Снижение энергоемкости разрушения природных гетерогенных материалов в процессах бурения, добычи, дробления и измельчения весьма актуально и возможно на основе изучения изменений удельных энергозатрат в зависимости от вида нагружения разрушаемого объекта и способа оценки энергоемкости, в частности, по эффектам дробимости, измельчаемости, диспергируемости геосреды.

Анализ последних исследований и публикаций.

Известно, что эффекты дезинтеграции и диспергирования сопровождают любые процессы разрушения гетерогенной среды. На всех микро- и макромасштабных уровнях разрушения имеет место пространственная орга-

низация иерархической системы структур фрагментирования. Со степенью раздробленности горного массива связывают свойство сейсмичности, а распределение по размерам образующихся трещин сопоставляют с распределением по размерам структурных элементов горных пород. Как установлено [1-3], очаг разрушения нагружаемой геосреды на стадии предельного деформирования представляет собой не отдельную трещину, а объемный объект с измененной структурой вещества в результате дробления зерен минералов на более мелкие фракции. Процесс диспергирования нагружаемой среды реализуется, проходя различные стадии в очагах разрушения (зонах трещинообразования) путем формирования и

роста микротрещин, а затем образования тонкодисперсных фрагментов и отдельностей.

По современным физическим представлениям разделение деформируемого тела на изолированные фрагменты (отдельности) происходит на стадии авторезонанса – стадии свободного разрушения за счет работы диссипативных сил (без подвода энергии извне). Эффекты разрушения нагружаемой среды формируются в зависимости от уровня критической плотности энергии W_V – энергетического порога разрушения, при переходе через который срабатывает спусковой механизм высвобождения накопленной энергии с образованием отдельностей и тонких частиц. Для различных процессов и технологий разрушения подтверждается закономерность проявления *динамического размерного эффекта* ($W_V d \cong const$), отражающая постоянство произведения критической плотности энергии W_V в разрушаемом объекте на его размер d [4, 5].

Исследования показали, что для прогнозной оценки энергозатрат на разрушение гетерогенных сред полезен метод нагружения объемным сжатием модельных образцов на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия (УНТС), разработанной А.Д. Алексеевым [6]. Установка позволяет четко и последовательно фиксировать главные особенности ди-

намической стадии разрушения горных пород: релаксацию напряжений и дилатансию (разуплотнение). Информацию об энергетике разрушения содержит *запредельная стадия деформирования* нагружаемого образца после достижения максимальной прочности, поскольку на этой стадии реализуется отклик нагруженной системы на полученную энергию, в частности, в виде релаксации напряжений с раскрытием очагов разрушения, содержащих отдельности и тонкодисперсные фрагменты минералов.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья. Рассмотрим показатели, параметры и их соотношения для оценки уровня накопленной упругой энергии к моменту разрушения геосред с учетом информации о стадии запредельного деформирования объемным сжатием. На рис. 1 приведена принципиальная диаграмма $\sigma(\varepsilon)$ распределения напряжений σ , деформаций ε и энергозатрат W при объемном нагружении образца гетерогенной среды [1]. На диаграмме обозначены: предел прочности σ_0 , остаточная прочность σ^* , деформации ε_0 и ε^* , отвечающие переходу к разупрочнению и остаточной прочности.

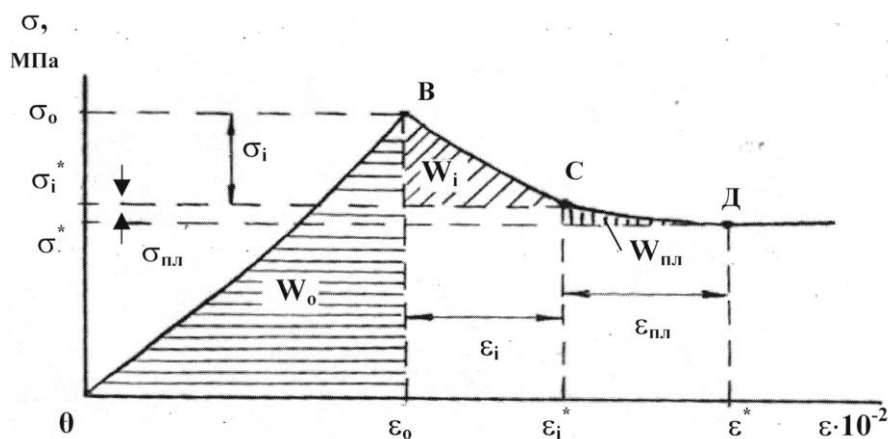


Рис. 1. Диаграмма $\sigma(\varepsilon)$ распределения напряжений, деформаций и энергозатрат (W_0 , W_i , $W_{пл}$) при объемном нагружении модельного образца

Полная диаграмма деформирования $\sigma(\varepsilon)$ трехосным неравнокомпонентным сжатием исследуемого материала строится на основе установленных зависимостей между усилиями по трем осям нагружения модельных образцов и получаемыми смещениями по тем же осям. В методике применяется следующая схема пропорционального объемного нагружения: модельный образец (в форме куба объемом 120

см³) доводится до максимального напряжения σ_1 , а затем разгрузкой по оси σ_3 – до потери максимальной сопротивляемости: $\sigma_1 = \max$, $\sigma_2 = 0,3\sigma_1$, $\sigma_3 = \sigma_1/K$, (K – коэффициент концентрации напряжений, $K = 2; 5$) [7, 8]. Программа трехосного неравнокомпонентного сжатия с последующей разгрузкой по одному из главных направлений напряжения соответствует в

наибольшей степени условиям инициирования саморазрушения угля и пород в забоях шахт.

На рис. 2 и 3 сопоставлены экспериментальные диаграммы природных материалов с

различными физико-механическими свойствами и различной реакцией за пределом прочности: уголь, тальк, песчаник выбросоопасный (ВО) и невыбросоопасный (НВО).

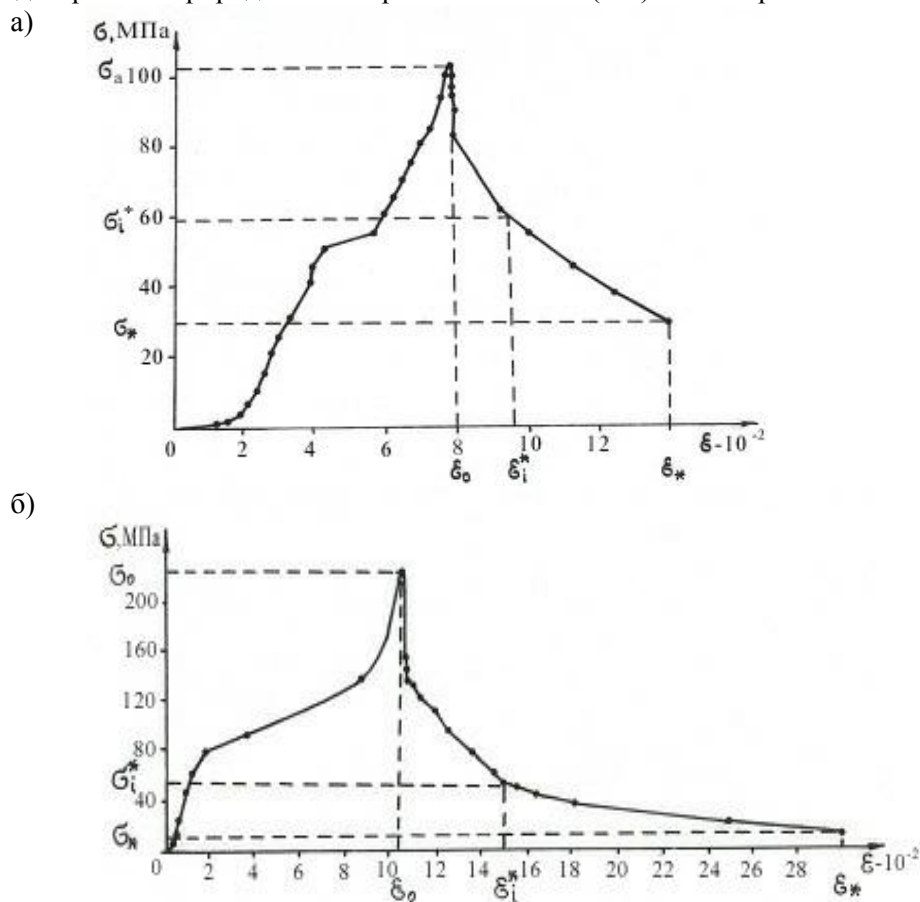


Рис. 2. Диаграммы деформирования образцов угля (а) и талька (б) в режиме трехосного неравнокомпонентного сжатия

Диаграмма рисунка 2а иллюстрирует стадийный характер деформирования материала. Начальный участок малой протяженности обусловлен исходной дефектностью структуры среды, следующие стадии характеризуют упругое и неупругое деформирование, далее начинается запредельная стадия с релаксации напряжений после достижения максимальной прочности (σ_0). За зоной релаксации напряжений (вертикальный участок графика) наблюдается область интенсивного разрушения ($\sigma_0 - \sigma_i^*$), т.е. стадия быстрой разгрузки напряжений с максимальным модулем (крутизной) спада графика σ - ϵ , разрыхлением структуры, образованием тонких фрагментов и частиц. Эта запредельная часть диаграммы отражает стадию саморазрушения (свободного разрушения), происходящего в эксперименте нередко взрывоподобно. В этой связи при нагружении образца высоким давлением особое внимание отводится развитию и контролю эффектов диспергирования, при котором реализуется

наиболее резкий прирост деформаций, усиление дилатансии с динамическим характером саморазрушения.

Участок саморазрушения-диспергирования на схеме рис. 1 обозначен интервалом ВС - от σ_0, ϵ_0 до σ_i^*, ϵ_i^* . Чем круче модуль спада запредельного участка разгрузки напряжений (от σ_0, ϵ_0 до σ_i^*, ϵ_i^*), тем ближе механизм разрушения к хрупкому (удароопасному, выбросоопасному) варианту. У квазипластичных материалов (рис. 2 б) за стадией саморазрушения следует отчетливо выраженная стадия пластического деформирования (с малым модулем спада), в процессе которой происходит сдвиг, трансляция и ротация обломков и отдельных частей, завершающаяся состоянием остаточной прочности (σ^*, ϵ^*). Для природных сред с хрупким механизмом разрушения (песчаник ВО) (см. рис. 3) запредельный участок пластического деформирования на диаграмме $\sigma(\epsilon)$ может практически отсутствовать.

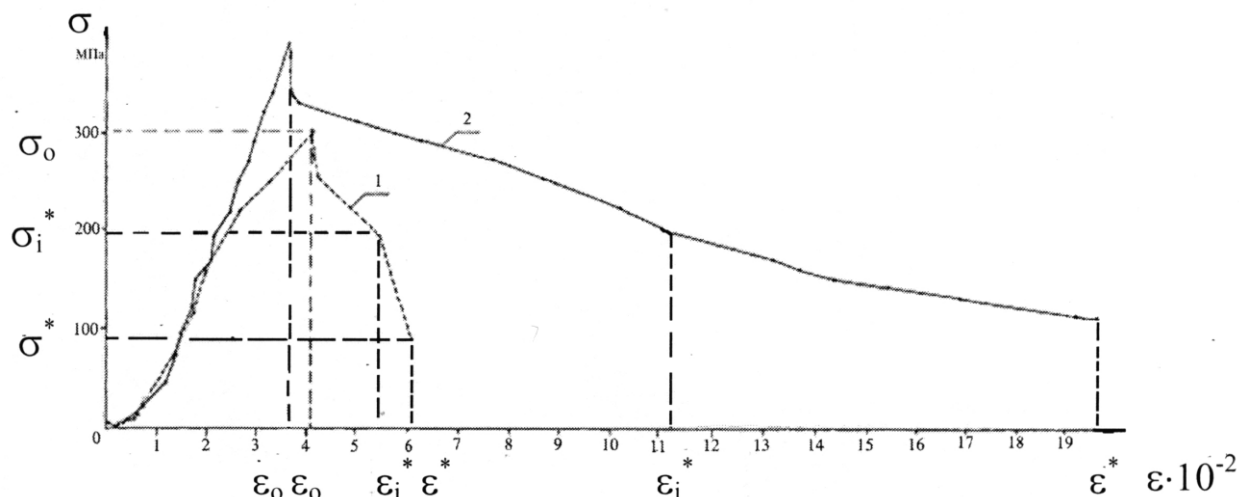


Рис. 3. Диаграммы деформирования в режиме трехосного неравнокомпонентного сжатия песчаника выбросоопасного (ВО) (1) и невыбросоопасного (НВО) (2)

Существенные отличия в запредельных параметрах нагружения дают основание для сравнительной оценки склонности гетерогенной среды к хрупкому (динамичному) или пластичному механизму разрушения с применением характеристик плотности энергии [9, 10]. Заштрихованные области на схеме рис. 1 характеризуют уровень плотности накопленной и реализованной энергии на стадиях диспергирования и дробления.

Расчет параметров динамичности (диспергируемости) K_D и пластичности K_{nl} разрушения проведем по опытным данным плотности энергии на различных стадиях допредельного (W_o) и запредельного (W_i , W_{nl}) деформирования:

$$K_D = \frac{W_o + W_i}{W_o}; K_{nl} = \frac{W_o + W_{nl}}{W_o}, \quad (1)$$

где W_o , W_i , W_{nl} - компоненты плотности энергии соответственно в зонах действия упругих напряжений W_o , само-разрушения-диспергирования W_i и пластического деформирования W_{nl} ($W_o = \sigma_o \varepsilon_o / 2$; $W_i = \sigma_i \varepsilon_i / 2$; $W_{nl} = \sigma_{nl} \varepsilon_{nl} / 2$).

Расчет параметров K_D и K_{nl} с применением предложенной методики открывает возможность экспериментальной оценки степени динамичности или пластичности разрушения и в результате позволит выявить категорию диспергируемости геосред.

Целью работы является обоснование рационального способа нагружения гетерогенных материалов с позиций снижения энергоемкости разрушения и измельчения в технологических процессах их переработки. При этом изучались различные подходы к оценке удельных энергозатрат (на единицу объема

или образованной поверхности разрушенного продукта) при нагружении различными вариантами сжатия (одноосное, объемное осесимметричное и неравнокомпонентное) с учетом природных свойств (хрупкости, пластичности разрушения и диспергируемости).

Основной материал исследования. Рассмотрим возможные показатели энергозатрат на разрушение и диспергирование геосреды. Эффекты диспергирования на практике оценивают величиной образованной удельной поверхности $\Delta S/V$ и параметром $\varepsilon_V = \Delta V/V$ - объемной долей ΔV тонких фракций в разрушенном продукте (V - объем разрушаемого образца). В условиях сжатия долю ΔV образующихся тонкодисперсных фракций можно оценить величиной относительной деформации ε трещинообразования: $\Delta V = \varepsilon V$. При одноосном сжатии величина ε сопоставима с деформацией ε_o на пределе прочности ($\varepsilon \approx \varepsilon_o$), а при объемном - с величиной ε_i запредельной деформации, обусловленной саморазрушением-диспергированием среды ($\varepsilon \approx \varepsilon_i$).

Исследования показали, что с ростом деформации (ε_o , ε_i) при разрушении наблюдается в продукте повышенное содержание β мелких фракций (менее малых сотен мкм) и увеличение удельной поверхности $\Delta S/V$: $\Delta S/V = (S - S_o) / V$; $\Delta S = (S - S_o)$, S_o и S - площадь поверхности объекта до и после разрушения. Удельная поверхность $\Delta S/V$ разрушенного продукта возрастает пропорционально средней W_V и локальной $W_{\Delta V}$ плотности энергии, запасенной при нагружении объекта [11, 12]:

$$\begin{aligned} \Delta S/V &\approx (W_V \eta) / \gamma, \\ \Delta S/V &\approx (W_{\Delta V} \varepsilon_i \eta) / \gamma, \end{aligned} \quad (2)$$

$$W_V = \sigma_o \varepsilon_o / 2;$$

$$W_{AV} = W_V / \varepsilon_i = \sigma_o \varepsilon_o / 2 \varepsilon_i,$$

где γ - удельная поверхностная энергия, η - к.п.д. диспергирования.

Физическую основу измельчения составляют естественно элементарные акты разрушения – необратимые разрывы межатомных связей вещества. Произведем расчет плотности энергии W_V в элементарном разрыве межатомных связей ($l \cong a = 10^{-10}$ м), с учетом осуществления диспергирования путем перекачки упругой энергии кристаллической решетки в акустическую энергию. Практическую оценку удельного расхода энергии γ_S на образование новой поверхности называют *эффективной поверхностной энергией*. Согласно теории предразрушения [1, 12] *эффективная* γ_S и *теоретическая* γ величины поверхностной энергии ($\gamma = 1-10$ Дж/м²) связаны формулой:

$$\gamma_S \cong \gamma N \frac{\lambda_D}{a} = 2,6 \times (10^2 - 10^3) \text{ Дж} / \text{м}^2, \quad (3)$$

где λ_D/a – дискретно-волновой критерий разрушения; $\lambda_D/a = 2,1-3,1$; (средняя величина – 2,6), λ_D - наименьшая длина упругой волны при разрывах межатомных связей, l – длина разрыва, a – кратчайшее расстояние между атомами; $N = \gamma a^2 / h v_m$ - число фононов, участвующих в выбросе атомов из узла решетки; $N \cong c/V_B = 10^2$; $v_m = c/a$ - максимальная частота тепловых колебаний атомов, h - постоянная Планка; c - скорость звука, $V_B = h/ma$ - критическая скорость частиц, величина которой для большинства твердых тел составляет $V_B / c = 10^{-3}-10^{-2}$; m - масса атома. Свежеобразованная удельная поверхность в элементарном акте разрушения составит $\Delta S/V \cong a^2/a^3 \cong 1/a = 10^{10}$ м²/м³. Таким образом, согласно теории средняя плотность энергии, необходимая для разрыва межатомных связей, составит величину: $W_V = \gamma_S / a = 2,6 \cdot (10^6-10^7)$ МДж/м³.

На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость параметра дисперсности $\Delta S/V$ от величины W_V критической плотности энергии при разрушении, где отмечен пунктиром диапазон расчетных значений [1].

Соответствие расчетных и опытных данных общей закономерности $\Delta S / V = f(W_V)$ для различных видов материалов подтверждает правильность исходных теоретических предпосылок. Практически установлено [1, 13], что применение высокочастотных, энергонапряженных режимов обработки минерального сырья в различных технологиях обеспечивает интенсивное разрушение струк-

туры вещества с ростом количества $\Delta V/V$ тонких фракций (менее 100 мкм) и их удельной поверхности $\Delta S/V$.

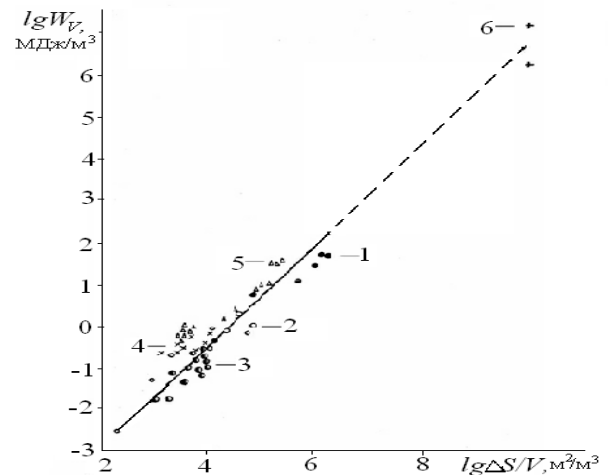


Рис. 4. Связь критической плотности энергии W_V и образованной удельной поверхности $\Delta S/V$ при разрушении материалов:

1 – стеклянные шарики; 2 – уголь; 3 – антрацит; 4 – габбро; 5 – железная руда; 6 – разрыв межатомной связи (теория).

Размеры объектов: 1 – 0,04-1 мм; 2 – 50-60 мм; 3 – 10-20 мм; 4 – 3 мм; 5 – 1-6 мм; 6 – 10^{-10} м.

На рис. 5 отражено влияние динамичности разрушения свободным ударом железной руды крупностью 10-14 мм в диапазоне изменения скорости порядка сотен метров в секунду.

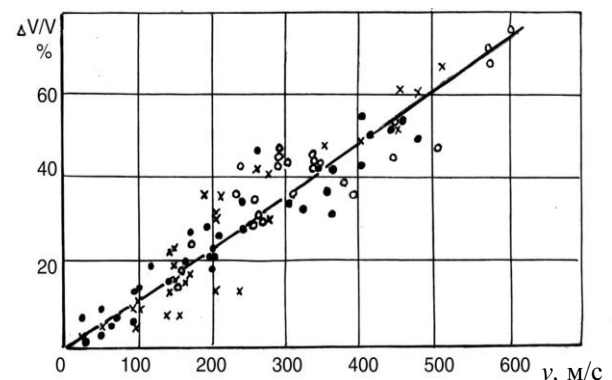


Рис. 5. Влияние скорости удара v на количество $\Delta V/V$ тонкодисперсных фракций (менее 74 мкм) при разрушении железной руды.

Исходная крупность частиц d (мм):

o - 14 мм; x - 12 мм; • - 10 мм

Анализ диаграмм объемного нагружения модельных образцов геосред показал, что запредельная стадия включает три составляющие, принципиально отличающиеся фазами разрушения и эффектами дезинтеграции: 1) релаксацию напряжений («акустическое затишение» [1,7]) с *микродиспергированием*, 2) само-

разрушение с быстрой разгрузкой напряжений и *макродиспергированием*, 3) разрушение с пластическим деформированием и дроблением. На основе аналогии между запредельной стадией быстрой разгрузки напряжений и процессом диспергирования возможно определение величины γ удельной поверхностной энергии, как энергетической оценки способности материала к диспергированию.

Удельная энергия γ для образования единицы поверхности ΔS определяется по величине энергии $W_i V_i$, накопленной в объеме V_i трещинного заполнителя ($V_i = \varepsilon_i V$) очага разрушения:

$$\gamma \cong \frac{W_i V_i}{\Delta S} \cong \frac{W_i \varepsilon_i}{\Delta S / V} = \frac{W_{\Delta V} \varepsilon_i}{\Delta S / V} \quad (4)$$

Здесь $W_i = \sigma_i \varepsilon_i / 2$ - работа диспергирования; σ_i, ε_i - изменение напряжений и деформаций на стадии быстрой разгрузки (см. рис. 1), $\sigma_i = \sigma_o - \sigma_i^*$; $\varepsilon_i = \varepsilon_i^* - \varepsilon_o$; $\sigma_i^*, \varepsilon_i^*$ - напряжение и деформация в образце по завершении стадии быстрой разгрузки; V - объем очагов разрушения (зон концентрации и укрупнения трещин), тогда как при лабораторных испытаниях модельных образцов V - объем разрушенного образца.

Общий удельный расход Γ энергии на единицу свежесформированной поверхности разрушенного продукта может быть рассчитан по данным полной диаграммы деформирования $\sigma-\varepsilon$, если полезную работу диспергирования $W_i V_i$ объединить с дополнительными затратами энергии, включающими компоненту дейст-

вия упругих напряжений $W_o V_o$ и работу пластического деформирования $W_{nl} V_{nl}$:

$$\Gamma = \frac{W_o V_o + W_i V_i + W_{nl} V_{nl}}{\Delta S} = \frac{W_o \varepsilon_o + W_i \varepsilon_i + W_{nl} \varepsilon_{nl}}{\Delta S / V} \quad (5)$$

Здесь V_o, V_i, V_{nl} - объемы зон действия соответственно упругих, разрушающих (диспергирующих) и перемещающих (сдвиговых) напряжений; $V_o = \varepsilon_o V, V_{nl} = \varepsilon_{nl} V, V_i = \varepsilon_i V$; $\sigma_{nl}, \varepsilon_{nl}$ - изменение напряжений и деформаций на стадии пластической разгрузки; $\sigma_{nl} = \sigma_i^* - \sigma^*$; $\varepsilon_{nl} = \varepsilon^* - \varepsilon_i^*$; $W_{nl} = \sigma_{nl} \varepsilon_{nl} / 2$; $W_o = \sigma_o \varepsilon_o / 2$; $W_i = \sigma_i \varepsilon_i / 2$.

Для варианта одноосного сжатия из-за отсутствия сведений о запредельном состоянии нагружаемого образца предлагается приближенная оценка удельного расхода энергии Γ на измельчение по формуле:

$$\Gamma = \frac{W_o V_o}{\Delta S} = \frac{W_o \varepsilon_o}{\Delta S / V} \quad (6)$$

В программу испытаний был введен коэффициент концентрации напряжений K (соотношение максимального и минимального напряжений) для оценки влияния на удельный расход Γ энергии степени нагруженности образцов. Экспериментально установлено, что величина концентратора напряжений колеблется в пределах 3-5 [8]. В условиях проведенного эксперимента величина K задана на уровне 2 и 5. Диаграммы объемного деформирования $\sigma(\varepsilon)$ образцов железной руды ($V=125 \text{ см}^3$) с коэффициентом концентрации напряжений $K = 2; 5$ показаны на рис. 6.

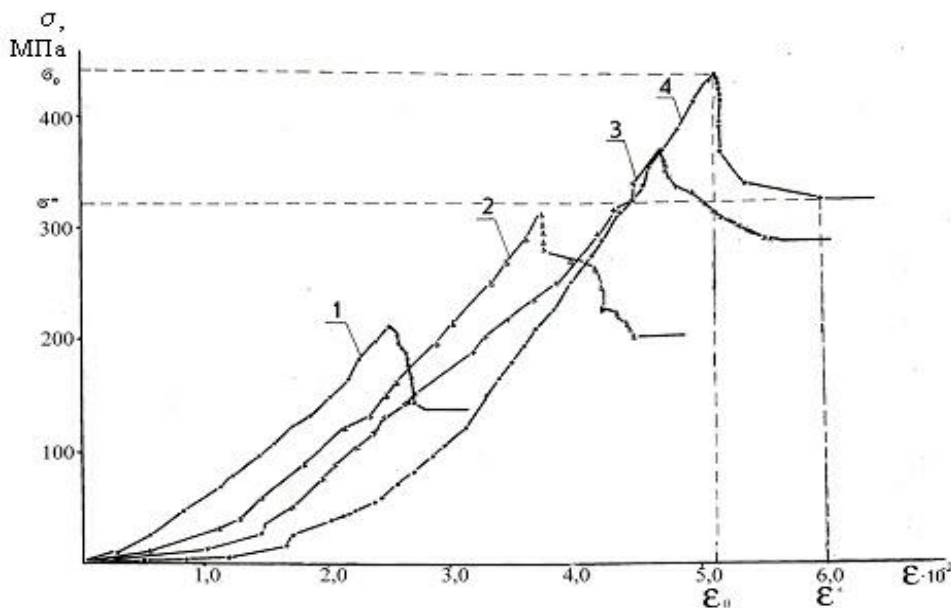


Рис. 6. Зависимости $\sigma(\varepsilon)$ при объемном деформировании железной руды. Коэффициент концентрации напряжений: 1, 2 - $K = 2$; 3, 4 - $K = 5$. Предел прочности (МПа): 1 - 215; 2 - 311; 3 - 365; 4 - 433

В таблице 1 представлены опытные данные, характеризующие влияние концентрации напряжений при одноосном и объемном нагружении образцов угля ($V = 175 \text{ см}^3$). Видно, что разрушение угля в режиме неравнокомпонентного объемного сжатия с $K=5$ сопровож-

дается по сравнению с одноосным нагружением почти двукратным увеличением количества β мелких фракций (-200 и -500 мкм) при меньших значениях Γ удельного расхода энергии на образование поверхности.

Таблица 1 - Показатели нагружения угля одноосным и объемным сжатием ($K = 2; 5$)

Нагружение	σ_0 , МПа	ε_0 , %	W_V , МДж/м ³	$W_{\Delta V}$, МДж/ м ³	β (%)		$\Delta S/V$, м ² /м ³	Γ , Дж/м ²
					фракции менее 200мкм	500мкм		
ООС	11	3,6	0,2	-	2,7	5,5	1970	102,0
ТНС, $K = 2$	50	2,4	0,6	25,0	0,9	1,7	342	137,0
ТНС, $K = 2$	40	1,7	0,34	13,0	1,9	2,3	427	39,5
ТНС, $K = 5$	104	7,7	4,0	210,0	8,2	10,2	7690	45,0
ТНС, $K = 5$	63	3,4	1,1	46,5	4,8	11,3	955	90,0

Примечание: ООС – одноосное сжатие; ТНС – трехосное неравнокомпонентное сжатие.

В таблице 2 сопоставлены показатели разрушения и диспергирования железной руды и угля при их объемном деформировании с различной величиной концентратора напряжений.

Для обоих исследуемых видов природных сред, весьма различающихся эффектами разрушения и диспергирования, с увеличением K в диапазоне от 2 до 5 зафиксированы некоторые общие закономерности, в частности, увеличение (\sim на 30 - 40 %) прочности и деформации на пределе прочности образца, а также средней W_V и локальной $W_{\Delta V}$ плотности энер-

гии; растет максимальная деформация разрушения ε^* , общая и удельная величина свежесформированной поверхности (ΔS , $\Delta S/V$), уменьшается величина теоретической γ и эффективной γ_S поверхностной энергии. Таким образом, в аспекте технологии измельчения этих гетерогенных материалов концентрация напряжений является положительным фактором, так как позволяет снизить в 1,5 - 4 раза величину γ_S удельных энергозатрат на диспергирование.

Таблица 2 - Энергетические показатели разрушения и диспергирования образцов железной руды и угля при их объемном деформировании

Показатель	Обозначение	Размерность	Железная руда		Уголь	
			$K = 2$	$K = 5$	$K = 2$	$K = 5$
Показатель прочности	σ_0	МПа	311	433	50	63
Остаточная прочность	σ^*	МПа	204	324	18	28
Деформация на пределе прочности	ε_0	МПа	3,7	5,2	2,4	3,4
Максимальная деформация при разрушении	ε^*	%	4,4	6,0	4,8	5,7
Деформация диспергирования	ε_i	%	0,7	0,8	2,4	2,3
Средняя плотность энергии при разрушении	W_V	МДж/м ³	5,7	11,3	0,6	1,1
Локальная плотность энергии	$W_{\Delta V}$	МДж/м ³	814	1413	25	46,5
Образованная поверхность частиц:						
общая	ΔS	м ²	0,04	0,48	0,058	0,167
удельная	$\Delta S/V$	м ² /м ³	349	3740	342	955
КПД диспергирования	η	%	0,05	0,03	1,5	0,9
Удельная поверхностная энергия:						
теоретическая	γ	Дж/м ²	7,4	1,0	26,6	9,9
эффективная	γ_S	Дж/м ²	765	188	137	90

Рассмотрим возможности оценки коэффициента η полезного действия акта диспергирования, совершаемого на стадии быстрой

разгрузки напряжений от σ_0 до σ_i^* (см. рис. 1). Показатель η характеризует по сути эффективность трансформации упругой энергии,

накопленной в локальных зонах (очагах разрушения, трещинообразования) нагружаемой среды до уровня плотности $W_{\Delta V}$ в работу диспергирования W_i .

В этой связи полученная информация о параметрах полной диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ деформирования на установке УНТС составит основу для расчета величины η по следующим формулам ($W_{\Delta V} = W_o / \varepsilon_i$):

$$\eta = \frac{W_i}{W_{\Delta V}} = \frac{W_i \varepsilon_i}{W_o} = \frac{W_i V_i}{W_o V};$$

$$h = \frac{W_i V_i}{W_o V} = \frac{\int_0^{\varepsilon_i^*} [\sigma(\varepsilon) - \sigma_i^*] d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_0} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon} \cdot \varepsilon_i. \quad (7)$$

В таблице 3 обобщены результаты экспериментов и расчета параметров (W_v , $W_{\Delta V}$, Γ) энергетики разрушения различных пород и минералов на основе представленных в работе опытных данных и формул.

Анализ информации показал, что характерным представителем пород с хрупким механизмом разрушения из числа исследованных материалов является выбросоопасный песчаник: $K_{nl} = 1,0$; $K_d = 1,32$. Тальк и невыбросоопасный песчаник обладают более высокой пластичностью при разрушении: $K_{nl} = 1,27$ для талька и $K_{nl} = 1,49$ для песчаника НВО. Уста-

новлено неоднозначное запредельное поведение невыбросоопасного песчаника: его высокая пластичность сочетается с повышенной диспергируемостью: $K_d = 2,04$. Прямо противоположные свойства проявила железная руда - чрезвычайно высокую сопротивляемость разрушению: $K_{nl} = 1,004$; $K_d = 1,08$. По этой причине, обуславливающей высокий уровень накапливаемой упругой энергии в очагах разрушения ($W_{\Delta V} = 814-1413$ МДж/м³), подобную геосреду следует считать ударо- и сейсмически опасной.

Знание параметров γ и η позволяет оценивать способность среды к образованию новой поверхности в акте саморазрушения-диспергирования и преимущественный характер (динамичность, пластичность) разрушения. Установлено в экспериментах, что наибольшее значение γ наблюдается для песчаника НВО ($\gamma = 205$ Дж/м²) и наименьшее - для железной руды и угля ($\gamma = 0,5-1,0$ Дж/м²). Малые величины γ у железной руды и угля свидетельствуют о легкости образования новой поверхности на стадии саморазрушения этих сред, что дает основание прогнозировать высокую скорость диспергирования и повышенную динамичность их разрушения.

Таблица 2 - Энергетические параметры разрушения и измельчения, установленные методом трехосного неравнокомпонентного сжатия

Показатели	Обозначение	Железная руда	Песчаник	Тальк	Уголь
Предел прочности	σ_o , МПа	311-433	296-392	224	63-104
Деформация на пределе прочности	ε_o , %	3,7-5,2	4,2-3,7	10,5	3,4-7,7
Средняя плотность энергии	W_v , МДж/м ³	5,7-11,3	6,2-7,2	11,8	4,0-1,1
Локальная плотность энергии	$W_{\Delta V}$, МДж/м ³	814-1413	326-97	261	46-210
Содержание фракции менее 250 мкм	β_{250} , %	0,4-5,8	2,3-3,1	2,4	2,4-8,2
Образованная удельная поверхность	$\Delta S/V$, м ² /м ³	349-3740	2080-2770	2830	955-7690
Удельная поверхностная энергия	γ , Дж/м ²	0,5-7,4	18-205	60	1,0
Удельный расход энергии на измельчение	Γ , Дж/м ²	158-765	147 - 410	664	45-90
КПД измельчения	η , %	0,05-0,02	0,6-7,8	1,5	0,2-0,9
Коэффициент пластичности	K_{nl}	1,004	1,0 - 1,49 ВО - НВО	1,27	1,16
Коэффициент динамичности (диспергируемости)	K_d	1,08	1,32 - 2,04 ВО - НВО	1,1	1,3

Правомерность использования формул (4) и (5) для расчета величин γ и Γ - теоретической поверхностной энергии и общего удельного расхода энергии на измельчение подтверждают данные таблицы 3 для исследуемых геоматериалов: отношение Γ / γ показывает различие значений Γ и γ в 1-2 порядка, что соответствует теоретическим предпосылкам [1, 12]. Экспериментальная оценка КПД измельчения (диспергирования) η для исследуемых сред составила диапазон $\eta = (0,02-7,8) \cdot 10^{-2}$, также входящий в пределы теоретической оценки величины $\eta = 10^{-2}-10^{-3}$. Опыты показали, что содержание в разрушенном продукте тонкодисперсных фракций составляет величину одного порядка с КПД диспергирования - $\beta_{100} = 0,1-2,3\%$, $\beta_{250} = 0,4-8,2\%$ [10, 11].

Исследования показали, что энергетически рациональным способом обработки тонкозернистых железных руд ($V \cong 10^2 \text{ см}^3$) является нагружение их высоким давлением до уровня порядка $\sigma_0 \cong 400 \text{ МПа}$ ($W_V \cong 1-13 \text{ МДж/м}^3$) с резким сбросом напряжений за пределом прочности. Например, минимальная величина удельного расхода энергии на измельчение железной руды с применением объемного сжатия составила:

в режиме $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, $\Gamma = 158 \text{ Дж/м}^2$ ($\sigma_0 = 433 \text{ МПа}$), тогда как в режиме $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, $\Gamma = 904 \text{ Дж/м}^2$ ($\sigma_0 = 580 \text{ МПа}$), а в режиме одноосного нагружения $\Gamma = 1234 \text{ Дж/м}^2$ ($\sigma_0 = 126 \text{ МПа}$).

Выводы

1. Установлены соотношения, связывающие энергозатраты при разрушении с эффектами диспергирования и характеристиками полной диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ деформирования нагружаемой геосреды: пределом прочности σ_0 , остаточной прочностью σ^* , деформациями ε_0 и ε^* .

2. Исследования показали высокую информативность прикладного метода предельного неравнокомпонентного деформирования для расчета следующих энергетических параметров геоматериалов в процессе разрушения и диспергирования:

- средней величины W_V критической плотности энергии, характеризующей условия образования крупных отдельностей (режим дробления);

- локальной величины $W_{\Delta V}$ критической плотности энергии, дающей прогнозную оценку удельного расхода энергии на измельчение - диспергирование;

- теоретической величины γ удельной поверхностной энергии, оценивающей способность геосреды к образованию новой поверхности при разрушении;

- эффективной величины γ_s поверхностной энергии как оценки реальных затрат на диспергирование;

- коэффициента η полезного действия диспергирования;

- общего удельного расхода Γ энергии на процесс измельчения нагружаемой геосреды.

3. В технологиях разрушения и измельчения (диспергирования) концентрация напряжений в нагружаемом материале служит положительным фактором уменьшения удельных энергозатрат: с увеличением коэффициента K от 2 до 5 возможно реализовать двух-четырёхкратное сокращение величины γ_s .

4. Энергетически выгодным в технологии измельчения квазихрупких природных материалов следует считать применение режимов объемного нагружения, тогда как для среды с квазипластичными свойствами целесообразно обрабатывать в режимах одноосного нагружения.

5. Выбор уровня W_V критической плотности энергии при разрушении зависит прежде всего от технологической задачи разрушения или измельчения, в частности, при требовании минимума энергозатрат величину W_V задают на основе динамического размерного эффекта $W_V(D)$, а в случае соблюдения требуемой дисперсности $\Delta S/V$ продукта величина W_V выбирается на основе зависимости $\Delta S/V(W_V)$. С изменением размера d разрушаемого объекта (или заданного уровня $\Delta S/V$ дисперсности продукта) рекомендуется обеспечивать плотность энергии W_V при разрушении геосреды согласно формул: $W_V = \Delta S/V \cdot \gamma / \eta$; $W_V d \cong const$ (с учетом информации об энергетических свойствах γ и η).

Література

1. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.15.08 / НГУ.- Днепропетровск. – 2004. - 35 с.
2. Горобец Л.Ж., Верхоробина И.В. Принципы и показатели функционирования геосреды при нагружении //Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. работ. – Днепр, 2016. – Выпуск 129. – С.122-135.
3. Горобец Л.Ж. Закономерности функционирования нагружаемой геологической среды

// Нафтогазова інженерія: Научно-техн. сб. – Киев-Полтава. - 2016. - Число 1. - С.68-79.

4. Горобец Л.Ж. Новые представления о природе и механизме процесса измельчения // Обогащение полезных ископаемых: Научн.-техн. сб. – Днепропетровск. - 2003. – Вып. 18 (59). – С. 51-55.

5. Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н. Определение зависимости плотности энергии от размера разрушения // ФТПРПИ. - 1986. - № 5. – С. 109-111.

6. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В. Предельное состояние горных пород. – Киев: Наук. думка, 1982. – 197 с.

7. Исследование акустоэмиссионных свойств природных материалов в режиме высоких давлений / Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, С.Б. Дуброва, О.Ф. Панченко // Физика и техника высоких давлений. – 1995. - № 3. – С. 65-73.

8. Горобец Л.Ж., Дуброва С.Б. Оценка энергетики запределного деформирования разрушения горных пород // Тр. VIII Междунар. науч. школы «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». – Симферополь: СГУ.- 1998. – С. 34-35.

9. Горобец Л.Ж., Ганкевич В.Ф., Плохотник Е.И., Шуляк И.А. Энергетический подход к

оценке свойств горных пород // Вибрации в технике и технологиях.- Днепропетровск: НГАУ. – 2002. - № 2 (22). – С. 20-23.

10. Обоснование рациональных режимов нагружения материалов при тонком измельчении / Л.Ж. Горобец, В.Н. Бредихин, С.Н. Гришаков, А.М. Кулеш // Вибротехнология – 2003.- Одесса: НПО «Вотум».- 2003. – Вып. 13. – С. 21-23.

11. Горобец Л.Ж., Шуляк И.А., Верхоробина И.В. Методика исследования и оценки показателей диспергирования горных пород // Вестник Нац. техн. ун-та “ХПИ”.- Харьков.- 2005.- № 51. - С.132-138.

12. Горобец Л.Ж. Изучение фундаментальных закономерностей энергетики измельчения // Обогащение полезных ископаемых. - 1998. - № 2. - С. 36-43.

13. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. Дискретно-волновая природа диспергирования // Научный вестник НГУ.- Днепропетровск.- 2008.- № 1, – С. 7-9.

14. Горобец Л.Ж., Шуляк И.А., Верхоробина И.В. Об эффективности высокодинамичной обработки материалов при тонком измельчении // Вибрации в технике и технологиях.- Днепропетровск: НГУ. – 2004. - № 1 (33). – С. 36-39.

Application of method of out-of-limit deformation is studied for the calculation of power parameters of destruction and dispersgating of geological materials. Influence of concentration of tensions is set at the monaxonic and by volume ladening of breeds and minerals on power-hungryness of destruction. Recommendations of rational types of ladening of fragile and plastic natural environments are given.

Keywords: *ladening of compression, concentration of tensions, dispersancy of geological materials.*

Відомості про автора:

Горобець Лариса Жанівна, доктор технічних наук, професор, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», має Почесну відзнаку Міністерства вугільної промисловості України "Шахтарська слава" 3 ступеня.

E-mail: larisa-gorobets@rambler.ru.