

УДК [622.02 : 539.2/.8]: 620.174.24

**Горобець Л.Ж.**, д-т.техн.наук, професор  
(Государственное ВУЗ «НГУ»),  
**Верхоробина И.В.**, магистр  
(ИГТМ НАН Украины)

### **ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГИИ НА СТАДИИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ГЕОСРЕДЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ**

**Горобець Л.Ж.**, д-т.техн.наук, професор  
(Державний ВНЗ «НГУ»),  
**Верхоробіна І.В.**, магістр  
(ІГТМ НАН України)

### **ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕНЕРГІЇ НА СТАДІЇ ДИСПЕРГУВАННЯ ГЕОСЕРЕДОВИЩА ПРИ НАВАНТАЖЕННІ**

**Gorobets L.J.**, D.Sc. (Tech.), Professor  
(State HEI «NMU»),  
**Verhorobina I.V.**, M.S. (Tech.)  
(IGTM NAS of Ukraine)

### **TRANSFORMATION OF ENERGY ON THE STAGE OF DISPERGATING OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT AT LADENING**

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований закономерностей трансформации энергии на стадии диспергирования разрушаемой геосреды. Рассмотрено формирование распределений по размерам измельченных частиц с учетом физических основ фрагментирования нагружаемого гетерогенного объекта. Обосновано применение дискретно-волнового критерия микроразрушения для изучения эволюции стадии диспергирования и оценке показателей эффективности диспергирования при разрушении геосред. Для усиления эффектов диспергирования в процессах измельчения геоматериалов рекомендуется обеспечивать высокоскоростной и высокочастотный импульсный режим нагружения. Для исследования кинетики трансформации упругой энергии в акустическую на стадии нагружения образцов геосред предложены акустические параметры. Экспериментально определены показатели трансформации энергии при нагружении и разрушении ряда геоматериалов одноосным и объемным сжатием в диапазоне давлений 114-1720 МПа. Отмечена важность информации об энергетике диспергирования на запредельной стадии деформирования.

**Ключевые слова:** геологическая среда, энергия разрушения, эффекты диспергирования.

**Введение.** Недостаточная изученность природы формирования эффектов диспергирования геосреды при разрушениях любого вида и масштабного уровня объясняет существующую и пока нерешенную проблему повышенных затрат энергии на обработку полезных ископаемых, особенно в технологии получения высокодисперсных минеральных порошков. В этой связи представляется актуальным анализ физической сущности явления фрагментирования нагружаемой геосреды с оценкой роли трансформации энергии на стадии дисперги-

рования. Современные достижения в физике разрушения [1] позволяют считать процесс диспергирования завершающей стадией разрушения нагруженного твердого тела, которая включает распад конденсированной фазы в результате необратимых разрывов межатомных связей по авторезонансному механизму с образованием тонкодисперсных фрагментов (порядка долей, единиц и десятков микрон). На базе новых достижений в статистической термодинамике обоснована возможность описания процесса диспергирования как критического явления в конденсированной фазе вещества [2, 3]. В свете новых результатов о термодинамике критического состояния веществ не имеет значения вид подводимой энергии (механическая, термическая, электрическая, магнитная и др.). Важно условие достижения веществом в локальных зонах нагружаемого тела критического уровня внутренней энергии, характеризующего генетические свойства вещества и природу его критического состояния.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Рассмотрим физические модели и критерии, которые характеризуют предразрушающее состояние нагруженной гетерогенной среды, задают структуру и уровень накопления энергии к моменту распада на фрагменты и отдельности.

Суть нового методологического подхода к рассмотрению закономерностей стадии диспергирования на микроуровне состоит в признании и учете единства дискретных и волновых свойств вещества в конденсированном состоянии [3, 6-9]. Согласно автоколебательной модели предразрушения деформируемого твердого тела ведущая роль в механизме диспергирования принадлежит положительной обратной связи, возникающей за счет генерации акустической эмиссии вблизи дефектов структуры и приводящей к авторезонансу (лавинοобразному разрушению). Разделение нагружаемой геосреды на изолированные фрагменты и отдельности происходит на стадии авторезонанса – стадии свободного разрушения (саморазрушения), когда формирование разрывов сплошности среды происходит за счет работы диссипативных сил (без подвода энергии извне). При достижении авторезонанса разрыв нескольких межатомных связей служит «спусковым крючком» цепного процесса разрывов множества связей.

Процесс диспергирования конденсированного вещества является пороговым и многостадийным, приводящим к возникновению иерархии преимущественных размеров диспергированных частиц в диапазоне от нескольких десятков ангстрем до сотен и тысяч микронов. Согласно теории эволюция неоднократно протекающих стадий диспергирования контролируется дискретно-волновым критерием микроразрушения  $B_\lambda$ , так что характерные размеры образующихся фрагментов и отдельностей в зонах диспергирования кратны величине инвариантности  $B_\lambda$  микроразрушения.

Развитие иерархии размеров диспергированных частиц описывается с помощью итерационного процесса, если исходить из того, что характерные линейные размеры частиц  $d_k$  и связанных с ними длин волн индуцированного акустического излучения  $\lambda_k$  являются членами геометрической прогрессии:  $d_k = 2\pi \langle a \rangle B_\lambda^k$ ,  $\lambda_k = 2\pi \langle a \rangle B_\lambda^{k+1}$ , где  $B_\lambda$  - знаменатель прогрессии, отвечающий физическому смыслу дискретно-волнового критерия. Теоретическая оценка вели-

чины  $B_\lambda$  включает соотношение физических параметров прочности вещества  $U_o / kT_{пл}$  и ограничена параметром  $\varepsilon_*$  разрывной деформации кристаллической решетки – не более 0,2-0,25 ( $U_o$  – энергия разрушения решетки, эквивалентная теплоте сублимации,  $T_{пл}$  – температура плавления вещества,  $k$  – константа Больцмана) [1, 6, 7]. Для большинства твердых тел  $B_\lambda$  находится в сравнительно узком интервале от 2,1 для одномерного до 3,1 для трехмерного кристалла, среднее значение  $B_\lambda \cong 2,6$ .

Потеря устойчивости нагруженного тела реализуется в локальной зоне разрушения при совпадении длины  $\lambda_k$  излучаемой волны со средним расстоянием  $L_k$  между трещинами. В физике разрушения отношение расстояния между трещинами  $L_k$  к их размеру  $l_k$  характеризуют концентрационным критерием  $K = L_k / l_k$  ( $k$  – порядок ранга разрушения), величина которого для лабораторных образцов изменяется от 2 до 5 [4, 5]. Разрушение на микроуровне происходит при условии, когда величина концентрационного параметра  $K = L_k / l_k$  оказывается близкой к величине дискретно-волнового критерия  $B_\lambda$  микроразрушения

$$B_\lambda = \lim_{L_k \rightarrow \lambda_k} K = \frac{\lambda_k}{l_k} = \frac{\lambda_B}{\langle a \rangle} \cong 2,1-3,1, \quad (1)$$

где  $k = 0,1,2,\dots$  - номер уровня фрактального размера частицы,  $\langle a \rangle$  - среднее кратчайшее расстояние между атомами,  $\lambda_B$  - наименьшая длина акустической волны в твердом теле, возникающая при разрыве межатомных связей.

Если  $B_\lambda > 2,1-3,1$ , нагруженное тело находится в устойчивом состоянии, при  $B_\lambda \leq 2,1-3,1$  релаксационные автоколебания атомов приводят нагруженную систему к разрушению.

При разрушении геосред в природе и технологиях переработки отмечают полимодальный характер распределений по размерам образованных отдельных частей (блоков, кусков, частиц), наблюдаемый в диапазоне 15 порядков ( $10^{-10}$ - $10^5$  м) [3, 7-9]. Например, в работах [1, 9] представлены результаты исследования 62 гранулометрических характеристик в широком диапазоне изменения свойств и режимов измельчения 16 видов материала, измельченного 12 способами. Показатель проявления свойства дискретности при разрушении оценивали на основе гранулометрических характеристик как отношение  $d_k / d_{k-1}$  последовательно расположенных преимущественных размеров  $d_k$  и  $d_{k-1}$  измельченных частиц. Исследования показали, что в области измельчения величина установленного показателя дискретности  $d_k / d_{k-1} = 2,6 \pm 0,6$  хорошо согласуется с интервалом изменения теоретической величины дискретно-волнового параметра  $B_\lambda = 2,1 \dots 3,1$ .

Использование критерия  $B_\lambda$  практически полезно в поиске наиболее эффективного режима диспергирования при разрушении геосред различными способами. Согласно теории на стадии авторезонанса нагружаемой геосреды реали-

зается предельная скорость перестройки кристаллической решетки вещества и максимальная величина КПД диспергирования [3, 10]. В таблице 1 приведены экспериментальные значения степени  $I_{pq}$  и показателя эффективности диспергирования  $\alpha_{pq}$ , рассчитанные по следующим формулам

$$I_{pq} = \frac{d_p}{d_q} = (B_\lambda)^{\alpha_{pq}}; \quad \alpha_{pq} = p - q; \quad B_\lambda = \lambda_B / \langle a \rangle \quad (2)$$

Таблица 1 - Показатели диспергирования при различных способах разрушения

Материал	Способ разрушения	Размер разрушения, м	Показатели	
			$I_{pq} = d_p/d_q$	$\alpha_{pq}$
Стекло	одноосное сжатие	$10^{-5} \dots 10^{-3}$	3...4	1...1,5
Антрацит	динамическое сжатие ( $\dot{\varepsilon} = 10^2 \dots 10^3 \text{ с}^{-1}$ )	$(2 \dots 4) \cdot 10^{-2}$	2...5	1...2
Гранит	удар ( $V = 50 \dots 80 \text{ м/с}$ )	$(2 \dots 6) \cdot 10^{-2}$	4...10	2
Уголь	сброс газового давления	$(2 \dots 5) \cdot 10^{-2}$	40...340	4...6
Новакулит	удар ( $V = 500 \text{ м/с}$ )	$10^{-1}$	1540	8
Новакулит	контактный взрыв	$10^{-1}$	3080	8,5
Уголь	внезапный выброс	3...14	900...4700	7...9

Как видно из приведенных данных, подтверждается теоретический вывод: при обработке различных материалов в статических или слабодинамических («мягких») режимах нагружения параметры диспергирования соответствуют наименьшим значениям:  $I_{pq} \rightarrow \lambda_B / \langle a \rangle \approx 2$ ,  $\alpha_{pq} = 1 \dots 2$ . При высокодинамических («жестких») режимах автовозбуждения эти параметры значительно больше, достигая при взрывных методах разрушения максимальных значений:  $I_{pq} = 5 \cdot 10^3$ ,  $\alpha_{pq} = 7 \dots 9$ . Таким образом, для усиления эффектов диспергирования геоматериалов следует обеспечивать в процессах их обработки более «жесткий» (высокоскоростной и высокочастотный) импульсный режим нагружения.

Практикой газоструйного способа измельчения, реализуемого при относительной скорости соударения частиц порядка удвоенной скорости звука в воздухе, подтверждена эффективность использования высокодинамических (квазиавторезонансных) режимов нагружения геоматериалов с достижением высокой дисперсности порошков (микро- и наноразмеров) [11, 12]. Полагаем, что знание параметров диспергирования  $I_{pq}$  и  $\alpha_{pq}$  и их изменения в различных режимах нагружения (сдвиг, отрыв, сжатие, удар, сброс давления, взрыв) важно также для создания шкалы классификации (типизации) геосред по измельчаемости (диспергируемости).

**Выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья.** Анализ достижений в теории предразрушающего состояния нагружаемой геосреды указывает на определяющую роль акустической информации в прогнозе эффектов развивающегося диспергирования: общих и удельных энергозатрат, количества тонкодисперсных фракций в продукте [3]. При экспериментальном изучении закономерностей формирования эффектов дис-

пергирования нагружаемой геосреды весьма информативны параметры акустической эмиссии (АЭ).

В этой связи представляется актуальным изучение связей между диспергированием и акустическим излучением не только при разрушении модельных образцов геосреды, но и в технологиях измельчения, например, путем соударений ускоряемых частиц в рабочей камере измельчительного устройства.

**Цель работы** состоит в анализе и обобщении теоретических и экспериментальных закономерностей трансформации энергии на стадии диспергирования разрушаемой геосреды в природных условиях или в технологиях обработки гетерогенных материалов.

При диспергировании в энергонапряженных измельчительных аппаратах (дезинтегратор, струйная, планетарная мельницы и др.) время накачки энергии в измельчаемый материал совпадает по порядку величины со временем ее релаксации, что указывает на высокую вероятность интенсивного проявления авторезонансного механизма разрушения. Если исходить из разрушительного действия автоакустических возбуждений на кристаллическую структуру вещества, то определяющая роль в исследовании физических закономерностей на стадии диспергирования нагружаемой геосреды принадлежит методу акустической эмиссии.

Рассмотрим процесс диспергирования во встречных двухфазных потоках газоструйной мельницы, когда разрушение частиц происходит практически хрупким механизмом, поскольку период взаимодействия частиц при соударениях друг с другом составляет в микронной области размеров частиц порядка  $10^{-10}$  -  $10^{-9}$  с. В этой связи газоструйную мельницу можно считать разновидностью необратимых термодинамических машин квазихрупкого разрушения, в которых энергия разгоняемых частиц трансформируется в энергию акустического излучения, кинетическую и поверхностную энергию разрушенных частиц. Коэффициент полезного действия процесса диспергирования  $\eta_d$  для такой машины отвечает физической сути квантового КПД  $\eta_{кв}$  акустической эмиссии [3, 7]

$$\eta_{кв} = (P_{макс} c) / U = (h c / a) / U = h \nu_m / U = 10^{-2} \dots 10^{-3}, \quad (3)$$

где  $P_{макс}$  - максимальная энергия фонона,  $c$  - скорость звука в твердом теле,  $U$  - энергия межатомной связи,  $\nu_m$  - максимальная частота колебаний атомов в акустической волне,  $h$  - постоянная Планка.

Начало стадии саморазрушения-диспергирования вещества связано с достижением критической плотности  $W_{\Delta V}$  энергии в активных локальных зонах вблизи дефектов структуры, причем, уровень  $W_{\Delta V}$  должен быть достаточным для запуска авторезонансного механизма разрушения межатомных связей. Полагаем, что локальная плотность энергии  $W_{\Delta V}$  при диспергировании равнозначна по смыслу молярной теплоте фазового перехода (испарения, сублимации) вещества в критическом состоянии:  $W_{\Delta V} \cong \Delta H_{кр}^{исп}$ . Можно утверждать, что энергия диспергирования до молекулярного состояния есть не что иное как

скрытая теплота испарения, которую можно рассчитать с помощью уравнения состояния реального газа [13, 14].

Известно, что накопление образующихся микротрещин в нагружаемом твердом теле проявляется в виде импульсов акустической эмиссии (АЭ), так что амплитуда сигналов пропорциональна размерам микротрещин [9, 15]. Для экспериментального изучения кинетики трансформации упругой энергии в акустическую при одноосном сжатии пород используем следующие акустические параметры  $N_A$  (имп/Дж) и  $N\varepsilon$  (имп/%), связывающие счет сигналов акустической эмиссии с работой трещинообразования и необратимой деформацией нагружаемого образца:

-  $N_A = N / A$  – энергетический выход (имп/Дж) акустической эмиссии, рассчитываемый как отношение числа  $N$  акустических сигналов к работе  $A$  образования микротрещин;

-  $N\varepsilon = \dot{N} / \dot{\varepsilon}$  – акустоэмиссионная эффективность разрушения, определяемая как счет сигналов  $\dot{N}$ , отнесенный к показателю текущей деформации;  $\dot{N} = N / \tau$ ,  $\tau$  – длительность излучения  $N$  сигналов.

В таблице 2 приведены физико-механические и акустоэмиссионные характеристики деформирования и разрушения образцов геосред сжатием.

Таблица 2 - Физико-механические и акустоэмиссионные показатели разрушения геоматериалов одноосным сжатием

Параметры	Обозначения	Размерность	Геосреда		
			Железная руда	Диабаз	Мрамор
Предел прочности	$\sigma_0$	МПа	318	194	114
Плотность геосреды	$\rho$	г/см <sup>3</sup>	3,5	3,0	2,9
Деформация на пределе прочности	$\varepsilon_0$	%	0,52	0,35	0,21
Средняя плотность энергии	$W_V$	МДж/м <sup>3</sup>	1,65	0,66	0,24
Локальная плотность энергии	$W_{\Delta V}$	МДж/м <sup>3</sup>	317	189	114
Энергетический выход АЭ на стационарной стадии	$N_A$	имп/Дж	1...4	100...150	20...50
АЭ-эффективность на стационарной стадии на стадии саморазрушения	$N\varepsilon$	имп/%	(0,4...1,2)·10 <sup>3</sup> (2...4)·10 <sup>5</sup>	(4...8)·10 <sup>3</sup> (2...20)·10 <sup>4</sup>	(0,5...0,8)·10 <sup>3</sup> (2...5)·10 <sup>4</sup>
Удельная активность АЭ на стационарной стадии на стадии саморазрушения	$\dot{N}_V$	имп/с·м <sup>3</sup>	(3...50)·10 <sup>4</sup> (1,2...1,5)·10 <sup>7</sup>	(2...6)·10 <sup>5</sup> (5...6)·10 <sup>6</sup>	(4...9)·10 <sup>4</sup> (1...1,5)·10 <sup>6</sup>
Удельная мощность разрушения	$P$	кДж/м <sup>3</sup> ·с	13,8	5,9	2,7
Амплитуда АС при разрушении	$A$	мкВ	490	360	210

Из данных таблицы 2 видно, что на заключительной стадии разрушения на 1-2 порядка возрастает акустоэмиссионная эффективность  $N\varepsilon$  макроразруше-

ния, и этот параметр  $N\varepsilon = \dot{N}/\dot{\varepsilon}$  коррелирует с удельной мощностью  $P$  разрушения, амплитудой АС и удельной акустической активностью  $\dot{N}_V$ . На величину энергетических затрат, контролируемых методом акустической эмиссии, оказывают влияние размер структурных неоднородностей, размер образца, уровень концентрации напряжений и степень необратимой деформации трещинообразования. Наиболее тонкодисперсную структуру и наибольшую поверхность сопротивления развитию трещин имеет железная руда (размер зерен 5-100 мкм). В результате разрушение железной руды произошло с наибольшей плотностью поглощенной структурными зернами упругой энергии ( $W_{\Delta V} = 317$  МДж/м<sup>3</sup>), более высоким, чем у других пород, уровнем концентрации напряжений ( $\sigma_0 = 318$  МПа), повышенной мощностью ( $P = 13,8$  кДж/м<sup>3</sup>·с) и удельной акустической активностью ( $\dot{N}_V = 1,5 \cdot 10^7$ ) взрывного акта саморазрушения.

На рис. 1 показано изменение во времени показателя  $N_A(\tau)$  трансформации упругой энергии в акустическую при одноосном сжатии на примерах ряда геосред: мрамор, диабаз, железная руда.

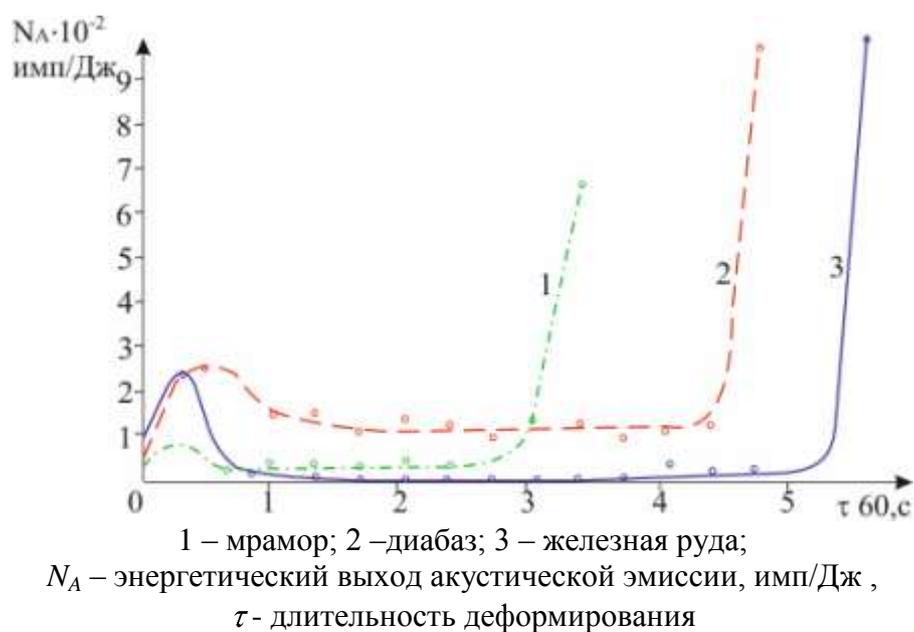


Рисунок 1 - Кинетика трансформации упругой энергии в акустическую  $N_A(\tau)$  в процессе деформирования и разрушения геосреды при нагружении одноосным сжатием

Полагаем, что степень дефектности исходных образцов геосреды задает различие в расположении начального участка графика  $N_A(\tau)$ , а затем в течение стационарной стадии работа трещинообразования примерно постоянна. Более слабо выраженное трещинообразование у мрамора можно объяснить тем, что в пластически деформируемой среде подавляется рост и накопление трещин. Исследование показало правомочность оценки способности геосреды к диспергированию методом акустической эмиссии по накоплению повреждаемости от трещинообразования к моменту разрушения.

На рис. 2 показана связь между количеством  $\gamma$  образованных тонких фракций (менее 100 мкм и 400 мкм) и удельным  $N_V$  (на единицу объема  $V$  образца -  $N_V=N/V$ ) акустическим излучением нагружаемой железной руды.

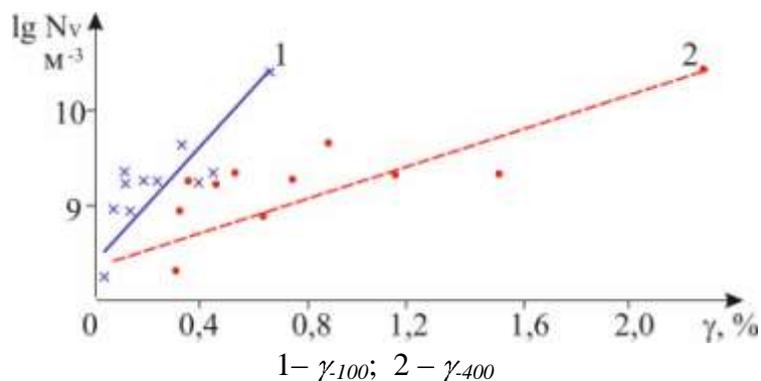
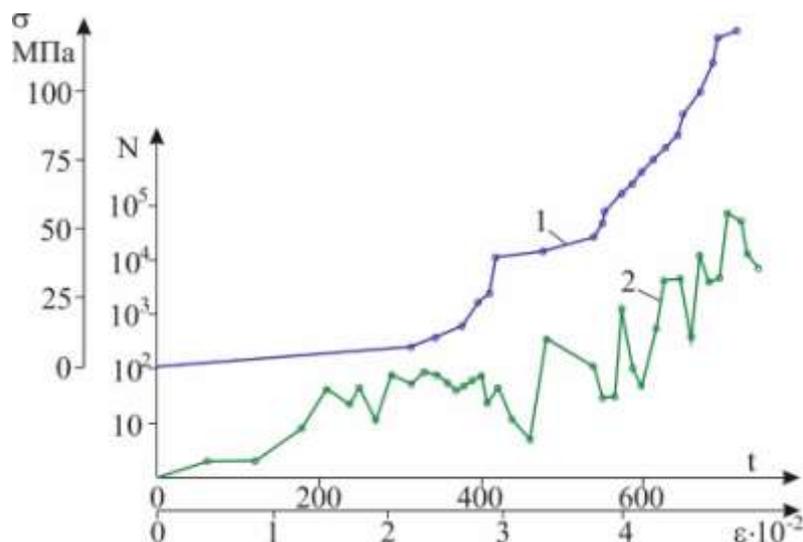


Рисунок 2 - Связь между выходом  $\gamma$  тонкодисперсных фракций и удельным акустическим излучением  $N_V$  при нагружении сжатием железной руды:

На рис. 3 показана кинетика напряженно-деформированного состояния и акустической эмиссии нагружаемой одноосным сжатием железной руды.



$\varepsilon$  - текущая деформация, доли ед.;  $\sigma$  - напряжение, МПа;  
 $\dot{N}$  - активность АЭ,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\tau$  - длительность нагружения, с

Рисунок 3 - Кинетика  $\sigma(\tau)$  роста напряжений (1) и акустического излучения  $\dot{N}(\tau)$  (2) в процессе деформирования образца железной руды

Видно, что с ростом напряжений в нагружаемом образце усиливается акустическое излучение, сопутствующее актам раскрытия и развития трещин на стадии диспергирования. Установлено, что величина деформации  $\varepsilon_0$  на пределе прочности служит прогнозной оценкой выхода фракций характерного размера, соизмеримого с зернами минералов.

Однако, более высокий уровень информации о развивающихся зонах диспергирования в нагружаемых геосредах был достигнут при объемным сжатии на установке УНТС (неравнокомпонентного трехосного сжатия). При этом

наиболее важную информацию об энергетике диспергирования несет запредельная стадия деформирования [3, 10]. В экспериментах объемного нагружения геосред последовательно фиксировались главные особенности динамической стадии разрушения: релаксация напряжений и дилатансия (разуплотнение). Очаг разрушения нагружаемой геосреды на стадии запредельного 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 развивается, проходя различные стадии в очагах разрушения (зонах трещинообразования) путем формирования и роста микротрещин, а затем образования тонкодисперсных фрагментов и отдельностей. Интенсивное развитие зоны диспергирования в нагружаемых объемным сжатием образцах геосред сопровождается повышением активности акустической эмиссии на 2-4 порядка с преимущественным накоплением малоамплитудных акустических сигналов. Закономерности трансформации энергии на стадии диспергирования разрушаемой геосреды раскрываются на основе использования полной диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  нагружения объемным сжатием [5].

Приведем примеры исследования, устанавливающего связь локальной плотности энергии  $W_{\Delta V}$  в критическом состоянии и эффектов диспергирования с режимом нагружения геосреды. На рис. 4 представлены графики трехосного неравнокомпонентного сжатия ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) железной руды в виде модельных образцов (объем куба  $V = 125 \text{ см}^3$ ).

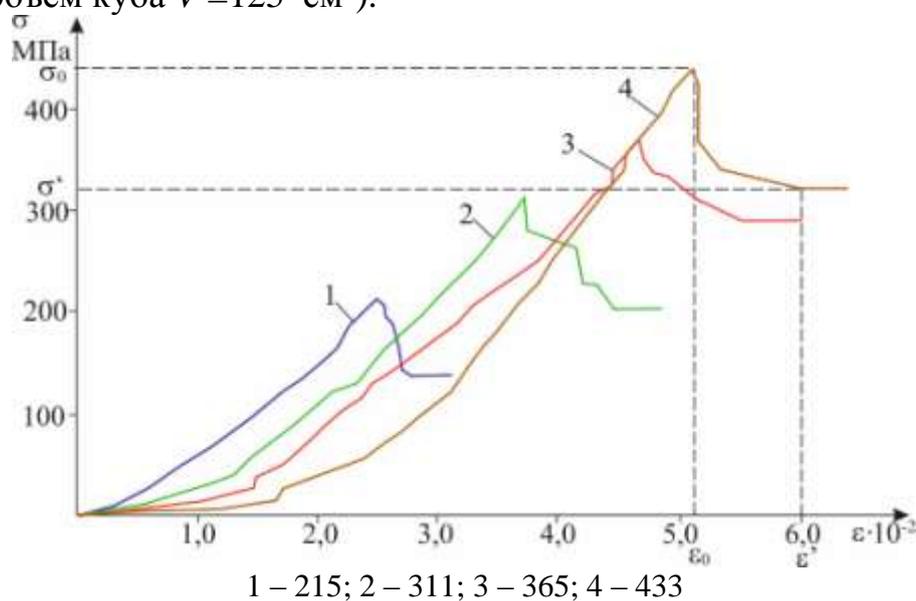


Рисунок 4 - Зависимости  $\sigma(\varepsilon)$  при объемном деформировании железной руды;  $V = 125 \text{ см}^3$ ; предел прочности (МПа)

Опыты показали, что в режимах с повышенной концентрацией напряжений наблюдается увеличение деформации  $\varepsilon_0$  на пределе прочности и эффекта диспергирования, оцениваемого по удельной поверхности  $\Delta S/V$  измельченного продукта и количеству  $\beta_{250}$  (%) образованных мелких фракций (менее 100-250 мкм). В таблице 3 сопоставлены показатели деформирования, накопления и

расхода энергии на стадии диспергирования при нагружении различных геосред (до  $\sigma_0=104-433$  МПа).

Таблица 3 - Энергетические показатели и эффекты стадии диспергирования при нагружении геосред в режиме неравнокомпонентного объемного сжатия

Показатели	Обозначение	Руда	Песчаник	Гальк	Уголь
Предел прочности	$\sigma_0$ МПА	215...433	296...392	224	104
Деформация на пределе прочности	$\varepsilon_0$ %	3,7...5,2	4,2...3,7	10,5	7,7
Средняя плотность энергии	$W_V$ МДж/м <sup>3</sup>	5,7...11,3	6,2...7,2	11,8	4,0
Локальная плотность энергии	$W_{\Delta V}$ МДж/м <sup>3</sup>	814...1413	326...97	261	210
Содержание фракции менее 0,25 мм	$\beta_{0,25}$ %	0,4...5,8	2,3...3,1	2,4	8,2
Образованная удельная поверхность	$\Delta S/V$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	347...3740	2080...2770	2830	7690
Удельная поверхностная энергия	$\gamma$ , Дж/м <sup>2</sup>	1,0...7,6	18...205	60	1,0
Удельный расход энергии на процесс измельчения	$G$ , Дж/м <sup>2</sup>	158...765	147...410	664	45

Установлено, что повышение локальной плотности энергии при разрушении руды от  $W_{\Delta V} = 900$  МДж/м<sup>3</sup> до 1400 МДж/м<sup>3</sup> сопровождается более чем двукратным увеличением деформации  $\varepsilon_0$  (от 2,5 до 5,2 %) и на порядок ростом показателя дисперсности  $\Delta S/V$  (от 350 до 3700 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>) и количества  $\beta_{.250}$  тонких фракций (от 0,4 до 6 %).

Еще более высокие уровни давлений (до 1720 МПа) выдерживались в экспериментах осесимметричного сжатия железной руды боковым давлением  $\sigma_{2,3}$  [5]. Размеры модельных образцов цилиндрической формы составляли: диаметр  $d = 3$  см, высота  $h = 4-6$  см. Одноосное сжатие проводили на жестком серийном прессе. Объемное нагружение осуществляли на оборудовании, разработанном в лаборатории механических испытаний Санкт-Петербургского горного института. Испытания трехосного осесимметричного сжатия ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ;  $\sigma_1 = \max$ ) проведены при трех уровнях давления:  $\sigma_{2,3} = 10$ ; 100 и 600 МПа.

На рис. 5 приведены диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  для восьми образцов железной руды:

1 -  $\sigma_0 = 216$  МПа,  $\sigma_{2,3} = 0$  МПа; 2-  $\sigma_0 = 259$  МПа,  $\sigma_{2,3} = 0$  МПа;

3-  $\sigma_0 = 490$  МПа,  $\sigma_{2,3} = 10$  МПа; 4-  $\sigma_0 = 580$  МПа,  $\sigma_{2,3} = 10$  МПа;

5-  $\sigma_0 = 904$  МПа,  $\sigma_{2,3} = 100$  МПа; 6-  $\sigma_0 = 1160$  МПа,  $\sigma_{2,3} = 100$  МПа;

7-  $\sigma_0 = 1550$  МПа,  $\sigma_{2,3} = 600$  МПа; 8-  $\sigma_0 = 1720$  МПа,  $\sigma_{2,3} = 600$  МПа/

В таблице 4 сведены результаты обработки экспериментальных данных, характеризующие новые особенности и эффекты диспергирования на примере железной руды.

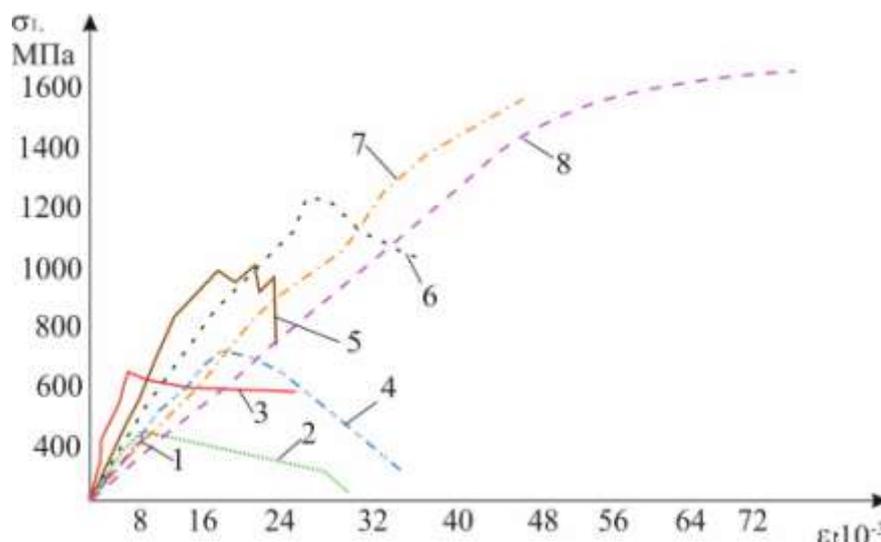


Рисунок 5 - Диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  деформирования железной руды одноосным (1, 2) и трехосным (3-8) осесимметричным сжатием ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ).

Таблица 4 - Показатели трансформации энергии разрушения в эффекты диспергирования железной руды под действием высоких давлений в диапазоне 200-1700 МПа

$V$ , см <sup>3</sup>	$\sigma_{2,3}$ МПа	$\sigma_0$ МПа	$\varepsilon_0$ %	$W_V$ МДж/м <sup>3</sup>	$W_{\Delta V}$ МДж/м <sup>3</sup>	$\gamma$ Дж/м <sup>2</sup>	$\Gamma$ Дж/м <sup>2</sup>	$\beta_{0,25}$ %	$\Delta S/V$ м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>
осесимметричное объемное сжатие ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ )									
36,6	0	216	0,36	0,39	-	-	-	0,44	552
44,0	0	259	0,43	0,56	28,4	31,2	428	1,8	1310
24,7	10	580	1,2	3,48	204,7	17,2	904	6,5	3850
39,0	10	490	0,32	0,78	49,4	11,1	1012	1,0	770
28,7	100	1160	2,2	12,76	580	2,3	4580	4,9	2780
39,3	600	1550	4,0	31,0	-	-	-	0,37	460
51,8	600	1720	6,6	56,8	860	-	-	1,7	1150
неравнокомпонентное трехосное сжатие ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )									
128,3	-	433	5,2	11,3	1413	1,0	158	5,8	3740
114,6	-	311	3,7	5,7	814	7,6	765	0,5	349
123,3	-	365	4,7	8,6	955	3,2	515	1,6	973
144	-	215	2,5	2,7	900	1,0	227	0,4	347

Во-первых, с ростом бокового давления увеличиваются  $\sigma_0$ ,  $\varepsilon_0$  и  $W_{\Delta V}$ , причем, влияние давления на эффекты диспергирования имеет экстремальный характер. С увеличением боковых давлений  $\sigma_{2,3}$  более 100 МПа наблюдается рост  $\sigma_0$  от 1160 до 1720 МПа,  $\varepsilon_0$  от 2,2 до 6,6 %,  $W_{\Delta V}$  от 580 до 860 МДж/м<sup>3</sup>. Однако, количество мелких фракций  $\beta_{500}$  (менее 500 мкм) достигает максимума при  $\sigma_{2,3} = 10$  МПа:  $\beta_{500} = 7,3$  %.

Во-вторых, дальнейший рост давления  $\sigma_{2,3}$  на образец приводит к снижению степени диспергирования: при  $\sigma_{2,3} = 100$  МПа  $\beta_{500} = 5,2$  %;  $\beta_{250} = 4,9$  %; при  $\sigma_{2,3} = 600$  МПа  $\beta_{500} = 2,0-0,6$  %;  $\beta_{250} = 1,7-0,4$  %. Величина удельной свежесформированной поверхности  $\Delta S/V$  (м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>) разрушенного продукта становится

меньше в 1,4-3,3 раза: от 3850 при  $\sigma_{2,3} = 10$  МПа до 2780 при  $\sigma_{2,3} = 100$  МПа и  $1150 \text{ м}^2/\text{м}^3$  при  $\sigma_{2,3} = 600$  МПа.

Полагаем, что эта закономерность связана с эффектами критического состояния вещества при высоких давлениях. В области  $\sigma_{2,3} \geq 100$  МПа с ростом в 3-4 раза уровня локальной плотности энергии  $W_{\Delta V}$  происходит трансформация упругой энергии в тепло, пластические деформации и фазовые превращения. Образование жидкой фазы в руде обуславливает преимущественно пластичный механизм деформационного процесса, который становится преобладающим, что и снижает эффект диспергирования нагружаемой геосреды. Поведение конденсированной фазы подобно жидкости отображается плавностью изменения графика  $\sigma(\varepsilon)$  (см. кривые 7, 8 на рис. 5).

С учетом инициирования диспергирования акустическими волнами предлагается представлять КПД акта диспергирования как коэффициента трансформации упругой энергии, сконцентрированной в очагах разрушения в критическом состоянии  $W_{\Delta V}$  ( $W_{\Delta V} \approx E = mc^2$ ), в полезную работу диспергирования  $W_i$  ( $W_i \approx E_a = h\nu_m$ ), совершаемого на стадии быстрой разгрузки напряжений от  $\sigma_o$  до  $\sigma_i^*$  [3]

$$\eta = \frac{W_i}{W_{\Delta V}} = \frac{W_i \varepsilon_i}{W_o} = \frac{W_i V_i}{W_o V}; \quad \eta = \frac{W_i V_i}{W_o V} = \frac{\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_i^*} (\sigma(\varepsilon) - \sigma_i^*) d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_0} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon} \cdot \varepsilon_i, \quad (4)$$

где  $W_{\Delta V} = W_o / \varepsilon_i$  - критическая локальная плотность энергии, приходящейся на единицу объема трещин;  $W_o = \sigma_o \varepsilon_o / 2$ .

Параметр  $W_{\Delta V}$  справедливо назвать «энергетическим порогом» акта диспергирования. Уровень  $W_{\Delta V}$  задает величину свежесформированной поверхности  $\Delta S$  согласно выражению:  $\frac{\Delta S}{V} \cong W_{\Delta V} \varepsilon_D \frac{\eta}{\gamma}$  ( $V$  - объем нагружаемого объекта;  $\varepsilon_D$  - относительная деформация геосреды на стадии диспергирования;  $\gamma$  - теоретическая поверхностная энергия;  $\eta$  - к.п.д диспергирования) [3, 10].

Мощность  $W_a$  выделенной на стадии диспергирования акустической энергии  $W_a$  пропорционально связана со средней плотностью  $W_V$  поглощенной материалом упругой энергии и периодом  $\tau$  акустического отклика нагружаемой геосреды [3, 10]. Поскольку при высокоскоростных ударах частиц время накачки энергией  $T$  и длительность  $\tau$  акустического отклика на завершающей стадии разрушения (авторезонанса - саморазрушения - диспергирования) находятся в пределах величины одного порядка (соизмеримы), устанавливаем выражение ( $\dot{W}_a = B_\lambda \varepsilon W_{\Delta V}$ ), связывающее затраты энергии  $W_{\Delta V}$  на диспергирование с мощностью  $\dot{W}_a$  акустического излучения

$$\dot{W}_a \approx \frac{W_V}{\tau} \cong \frac{\lambda}{a} W_V \cdot \dot{N} = \frac{\lambda}{a} W_V \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon} = \frac{\lambda}{a} \dot{\varepsilon} W_{\Delta V}; \quad \tau \dot{N} \cong \frac{a}{\lambda}; \quad \frac{1}{\dot{N}} \cong T; \quad T \cong \frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}}. \quad (5)$$

где  $\dot{\varepsilon}$  - скорость относительной динамической деформации частиц ( $\dot{\varepsilon} = V/d$ ,  $V$  – скорость удара,  $d$  – размер частиц,  $\lambda/a$  - критерий  $B_\lambda \cong 2,1 \dots 3,1$ ).

Экспериментально установлено, что эффекты диспергирования возрастают пропорционально длительности спонтанного разрушения (авторезонанса).

### Выводы.

1. Преимущественную информацию о трансформации энергии на стадии диспергирования содержат экспериментальные данные за пределом прочности нагружаемой геосреды. Разрушение на микроуровне с эффектами диспергирования происходит при условии, когда величина концентрационного параметра  $K$  оказывается близкой к величине дискретно-волнового критерия  $B_\lambda$  микроразрушения. Физический критерий  $B_\lambda$  составляет основу оценки показателей диспергирования: соотношения размеров преимущественных фракций и удельной поверхности измельченного продукта.

2. Для исследования и прогнозирования эффектов диспергирования при разрушении геосреды рекомендуется применение метода акустической эмиссии. Для АЭ-мониторинга эволюции стадии и эффектов диспергирования определены следующие информативные параметры: энергетический выход  $N_A$  и активность  $\dot{N}$  АЭ, акустоэмиссионная эффективность разрушения  $N_\varepsilon$ , удельное акустическое излучение  $N_V$ , распределение по величине амплитуд акустических сигналов.

3. Управление эффектами энерговыделения на стадии диспергирования при разрушении геосреды достигается изменением скорости  $\dot{\varepsilon}$  динамической деформации, длительности накачки тела энергией и уровнем  $W_{\Delta V}$  локальной плотности энергии. Для уменьшения энергозатрат на стадии диспергирования следует задавать время  $T$  накачки энергией измельчаемых частиц (или разрушаемого объекта) соизмеримым по порядку величины с периодом  $\tau$  их разрушения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бовенко, В.Н. Синергетические эффекты и закономерности релаксационных колебаний в состоянии предразрушения твердого тела: Автореф. дисс. д-ра физ.-мат. наук / В.Н. Бовенко. - М.-1990.-30с.
2. Горобец, Л.Ж. Связь термодинамических параметров горных пород на глубине/ Л.Ж. Горобец, А.И. Лютый // Вибрации в технике и технологиях: Днепропетровск. - 1998. - № 4 (8). - С. 59 - 61.
3. Горобец, Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореф. дисс. д-ра техн. наук Л.Ж. Горобец. - НГУ: Днепр-ск. – 2004. - 35 с.
4. Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов / В.С.Куксенко, Х.Ф.Махмудов, В.А. Мансуров [и др.] // ФТПРПИ. – 2009. - №4. – С. 55-59.
5. Кинетика и иерархия процесса накопления трещин в гетерогенных материалах / В.И. Веттерень, В.С. Куксенко, Н.Г.Томилин, М.А. Крючков // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли; под ред. Леонтьев А.В. - Новосибирск: Институт горного дела, 2004. - С. 373–377.
6. Бовенко, В.Н. Дискретно-волновая природа диспергирования / В.Н. Бовенко, Л.Ж. Горобец // Науковий вісник НГУ. - 2008. № 1. - С.7-9.

7. Бовенко, В.Н. Радиоспектроскопия продуктов сверхтонкого измельчения / В.Н. Бовенко, Р.Ю. Герасимов, Л.Ж. Горобец // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Аннотации докладов. В 3 томах. Т.2. Нанопластика и нанотехнологии. Фундаментальные проблемы науки. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.- С.73-74.
8. Гейликман, М.Б. О самоподобии в геофизических явлениях / М.Б.Гейликман, В.Ф. Писаренко // Дискретные свойства геофизической среды. - М.: Наука, 1989. - С. 109-131.
9. Горобец, Л.Ж. Закономерности формирования распределений по размерам частиц нагружаемого твердого тела / Л.Ж. Горобец // Тезисы докладов 7-го Международного симпозиума «Качество минерального сырья»: ГВУЗ «Криворожский НУ». 2015.- С 17-23.
10. Горобец, Л.Ж. Принципы и показатели функционирования геосреды при нагружении / Л.Ж. Горобец, И.В. Верхоробина //Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. работ. – Днепр. – Вып. 129. – 2016. – С.122-135.
11. Горобец, Л.Ж. Микророшки: технология и оборудование / Л.Ж. Горобец // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. - Дніпропетровськ, 1999. - № 4 (45). – С.33-41.
12. Пилов, П.И. Технологические возможности струйных измельчителей / П.И.Пилов, Л.Ж.Горобец, И.В. Верхоробина // ГИАБ. – 2007. – №3. – С. 359-367.
13. Лютый, А.И. Строение Земли и геологические процессы в свете релаксации упругой энергии вещества недр: Монография / А.И. Лютый, С.Е. Поповченко - Днепр-ск: НГУ, 2005. - 272 с.
14. Лютый, А.И. Термодинамический расчет критического давления вещества и его техническое применение / А.И.Лютый, Л.Ж.Горобец, С.Б.Дуброва //Физика и техника высоких давлений. - Донецк, 1997.- Т.7, № 3. - С.81-88.
15. Горобец, Л.Ж. Физические основы прогноза технологии измельчения / Л.Ж. Горобец // Обогащение руд. – 1995. - № 4-5. – С.19-23.

#### REFERENCES

1. Bovenko, V.N. (1990), "The synergetics effects and conformities to law of relaxation vibrations in a state of pre-destruction of solid", Abstract of Ph.D. dissertation, Fiz.mat., Institute MIEM, Moscow, Russia.
2. Gorobets, L.Zh. and Lutyi, A.I. (1998), "Association of thermodynamics parameters of mountain breeds on the depth", *Vibratsii v tekhnike i tekhnologii*, no 4(8), pp. 59 - 61.
3. Gorobets, L.Zh. (2004), "Development of scientific foundation for the solid minerals grinding", Abstract of Ph.D. dissertation, Mineral dressing, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.
4. Kuksenko, V.S., Mahmudov, H.F. and Mansurov, V.A. (2009), "Structural changes during deformation of natural heterogeneous materials", *Fiziko-technicheskie problemy razrabotki mestorozhdeniy*, no.4, p.55-59.
5. Vettergen, V.I., Kuksenko, V.S. and Tomilin, N.G. (2004), "Kinetics and hierarchy of process of accumulation of cracks in heterogeneous materials", *Geodinamika i napryazhennoe sostoyznie neдр zemli*, p. 373-377.
6. Bovenko, V.N. and Gorobets, L.Zh. (2008), "Discrete-wave nature of dispergating", *Naukoviy visnik Natsionalnogo girnychogo universytetu*, no. 1, pp. 7-9.
7. Bovenko, V.N., Gerasimov, R.U. and Gorobets, L.Zh. (2010), "Radio-location spectroscopy of foods of the overmicronizing", *Nauchnay sessiya NIYAU MIFIF-2010. Nanofizika i nanotekhnologiya* [Scientific session NIYAU MIFI, Nanophysics and nanotechnologies. Fundamental problems of science], vol.2, p.73-74.
8. Geylikman, M.B. and Pisarenko, V.F. (1989), "About selfsimilarity in the geophysical phenomena", *Diskretnye svoistva geofizicheskoy sredy*, pp. 109-131.
9. Gorobets, L.Zh. (2015), "Conformities to law of forming of distributions on the sizes of particles of the loaded solid", Theses of lectures of the 7 International symposium "Quality of mineral raw material", pp. 17-23.
10. Gorobets, L.Zh. and Verhorobina, I.V. (2016), "Principles and indexes of functioning of geological environment at a ladening", *Geo-Technical Mechanics*, vol. 129, pp.122-135.
11. Gorobets, L.Zh (1999), "Micropowders: technology and equipment", *Zbagachennya korysnykh kopalyn*, no 4 (45), pp.33-41.
12. Pilov, P.I., Gorobets, L.Zh. and Verhorobina, I.V. (2007) "Technological possibilities of the stream grinding", *Gornyi informatsionno-analiticheskii bulletin*, no 3,pp.359-367.
13. Lutyi, A.I. and Popovchenko, S.E. (2005), *Stroenie Zemli i geologicheskije protsessy v svete relaksatsii uprugoy energii veshchestv neдр* [Structure of Earth and geological processes in the light of relaxation of resilient energy of substance of bowels of the earth], NМУ, Dnepropetrovsk, Ukraine.

14. Lutyi, A.I., Gorobets, L.Zh. and Dubrova, S.B. (1997), "Thermodynamics calculation of critical pressure of substance and his technical application", *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy*, vol.7, no 3, pp. 81-88.

15. Gorobets, L.Zh (1995), "Physical bases of prognosis of technology of grinding", *Obogashchenie rud*, pp. 4-5, pp.19-23.

---

#### Об авторах

**Горобець Лариса Жановна**, доктор технічних наук, професор, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГВУЗ НГУ), Днепр, Украина, [larisa-gorobets@rambler.ru](mailto:larisa-gorobets@rambler.ru).

**Верхоробина Інна Владимировна**, магістр, інженер в відділі геодинамічних систем і вібраційних технологій (ОГДС і ВТ), Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Днепр, Украина, [inna\\_kuchuk@ukr.net](mailto:inna_kuchuk@ukr.net).

#### About the authors

**Gorobets Larisa Zhanovna**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Professor, State Higher Education Institution «National Mining University» (SHEI "NMU"), Dnepr, Ukraine, [larisa-gorobets@rambler.ru](mailto:larisa-gorobets@rambler.ru).

**Verkhorobina Inna Vladimirovna**, Master of Sciences (M.Sc.), Principal Engineer of Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, [inna\\_kuchuk@ukr.net](mailto:inna_kuchuk@ukr.net).

---

**Анотація.** Надані результати експериментально-теоретичних досліджень закономірностей трансформації енергії на стадії диспергування геосередовища при руйнуванні. Розглянуто формування розподілів за розмірами подрібнених частинок з урахуванням фізичних основ фрагментації гетерогенного об'єкту при навантаженні. Обґрунтовано застосування дискретно-хвильового критерію мікроруйнування для вивчення еволюції стадії диспергування і оцінки показників ефективності диспергування при руйнуванні геосередовищ. Для посилення ефектів диспергування в процесах подрібнення геоматеріалів рекомендується забезпечувати високошвидкісний і високочастотний імпульсний режим навантаження. Для дослідження кінетики трансформації пружної енергії в акустичну на стадії навантаження зразків геосередовищ запропоновані акустичні параметри. Експериментально визначені показники трансформації енергії при навантаженні і руйнуванні ряду геоматеріалів одноосісним і об'ємним стиском в діапазоні 114-1720 МПа. Відмічена важливість інформації про енергетику диспергування на поза межній стадії деформації.

**Ключові слова:** геосередовище, що навантажується, енергія руйнування, ефекти диспергування.

**Abstract.** The results of experimental and theoretical studies relation energy transformation at the stage dispersion of the destroyed geo-environment are presented. The formation distributions on the sizes of the crushed particles are investigated taking into account physical bases fragmentation under loaded heterogeneous object. The use discrete-wave criterion of micro-destruction for the study evolution of the dispersing stage and estimation characteristics efficiency dispersion when a geo-environment is destroyed are substantiated. To enhance dispersive effects in the process of grinding geomaterials to use high-speed and high-frequency impulse loading mode is recommended. To study the kinetics transformation elastic energy into acoustic at the stage of under loading geo-environment samples, acoustic parameters are proposed. The parameters of energy transformation under loading and destruction series geomaterials by uniaxial and volumetric compression in the pressure range of 114-1720 MPa were experimentally determined. The importance information on the energy of dispersing at an over-extreme limit stage of deformation is registered.

**Keywords:** geological environment, energy destruction, dispersion effects.

*Статья поступила в редакцию 30.10.2017*

*Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Блюссом Б.А.*