

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЗАТРАТНОСТИ СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

¹Горобец Л.Ж., ²Верхоробина И.В.

¹Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», ²Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ АКУСТИЧНОЇ ОЦІНКИ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ СТРУМЕНЕВОГО ПОДРІБНЕННЯ

¹Горобець Л.Ж., ²Верхоробіна І.В.

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», ²Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

THEORETICAL ASPECTS OF ENERGY CONSUMPTION ACOUSTIC EVALUATION AT THE JET GRINDING

¹Gorobets L.J., ²Verhorobina I.V.

¹National Technical University «Dnipro Polytechnic», ²Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine

Аннотация. Цель работы состоит в развитии акустического метода оценки затрат энергии в рабочем процессе струйной мельницы на основе обобщения новых закономерностей диспергирования при разрушении. Дано теоретическое объяснение проблемы снижения затрат энергии при тонком измельчении. Приведены зависимости дисперсности продукта от критической плотности энергии при разрушении. Рассмотрены акустоэмиссионные параметры диспергирования нагружаемых сжатием образцов и результаты акустической оценки струйного измельчения. Проведен анализ связи производительности газоструйной мельницы с параметрами, влияющими на энергозатратность работы. Обосновано применение критерия экстремального регулирования внутримельничного процесса для поддержания режима максимальной производительности. Оформлен акустический размерный эффект диспергирования по аналогии с динамическим размерным эффектом разрушения (ДРЭ). Новый подход к оценке энергозатратности работы струйной мельницы развит с позиций единства природы и механизма разрушения нагружаемых тел с общностью проявления сопровождающих разрушение закономерностей акустической эмиссии и эффектов образования новой поверхности разрушенных отдельностей. В методике оценки энергозатрат ведущая роль отводится коэффициенту γ_N (Дж/имп) трансформации потребляемой энергии в акустическое излучение в оптимальном режиме работы мельницы (с максимальной производительностью), который рассчитывается как отношение приведенной работы (энергии) к счету акустических сигналов в зоне помола. Оценка текущих затрат энергии $E_{\Delta\tau}$ (Дж) за период $\Delta\tau$ (с) работы проводится с учетом γ_N (Дж/имп) и усредненной (за интервал $\Delta\tau$) акустической активности $\dot{N}$ (имп/с). Поддержание минимальной энергозатратности струйного измельчения возможно путем быстродействующего регулирования загрузки струй до уровня измеряемой акустической активности в зоне помола, при котором достигается «условно постоянная» величина коэффициента γ_N . Результаты акустической оценки эффективной поверхностной энергии в оптимальном режиме измельчения соответствуют диапазону оценки γ_s в закономерности ДРЭ разрушения. Это подтверждает правомерность использования теории диспергирования (включая акустический размерный эффект) для оценки текущих затрат энергии в рабочем процессе струйной мельницы.

Ключевые слова: струйная мельница, плотность энергии, зона помола, акустическая активность, загрузка струй, диспергирование, производительность, энергозатратность.

Постановка проблемы. Изучение акустической информации о процессе измельчения начато в работах [1,2], где на примерах разрушения сжатием модельных образцов горных пород установлена связь количества образованных мелких и тонких фракций (менее 100...400 мкм) от удельного числа N_V (на единицу объема V) акустических сигналов (АС).

Метод акустической эмиссии (АЭ) применяется для прогнозной оценки энергозатрат на всех стадиях кинетического процесса разрушения (трещинообразование, микро- и макродиспергирование, дробление) [3]. Предложены следующие параметры АЭ: скорость счета $\dot{N}$ (имп/с) АС на *запредельной стадии деформирования*, энергетический выход $N_A = N/A$ (имп/Дж) и акустоэмиссионная эффективность $N\varepsilon = N/\varepsilon$, связывающие счет N акустических сигналов с работой A трещинообразования или текущей необратимой деформацией ε нагружаемого образца. Акустоэмиссионным признаком развития измельчения является рост величины $\dot{N}$ за пределом прочности образца с возможным повышением активности АЭ на 2-4 порядка. Величина мощности выделенной акустической энергии при разрушении задается уровнем плотности поглощенной материалом упругой энергии.

Эти результаты обозначили начало применения метода акустической эмиссии для мониторинга работы газоструйной мельницы, впервые успешно проведенного в условиях Волгоградского керамического завода [4,5]. Установлено, что плотность потока частиц в струях закономерно изменяет показатель $\dot{N}$ активности акустического излучения в зоне помола.

Снижение затрат энергии в технологии тонкого измельчения ($d < 100$ мкм) представляется сложной проблемой. Суть теоретического объяснения состоит в соблюдении константы произведения критической плотности W_V энергии на преимущественный размер d разрушения согласно соотношениям:

$$W_V d \cong \text{const}; \quad W_V d \cong \gamma_s \cong \gamma / \eta; \quad \gamma_s \cong 3 \cdot 10^3 \text{ Дж / м}^2, \quad (1)$$

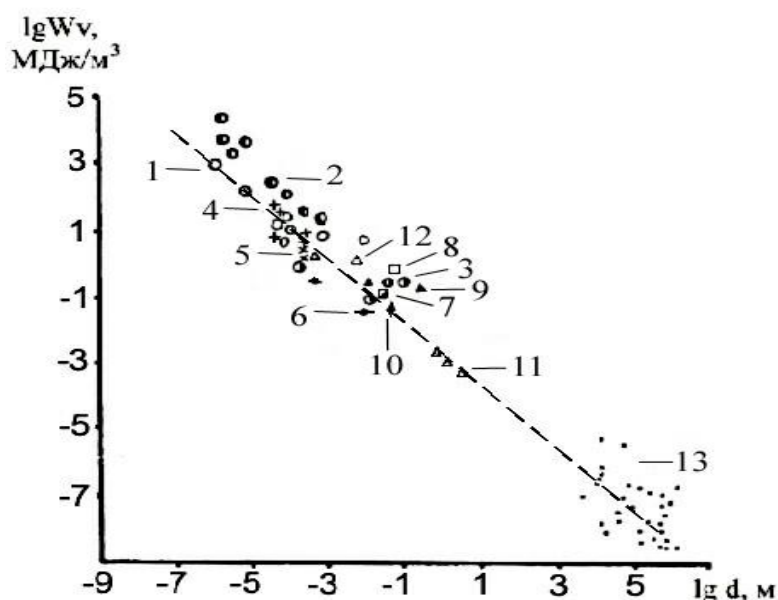
где γ , γ_s – теоретическая и эффективная поверхностная энергия, η – к.п.д. диспергирования.

Показатель W_V в значительной степени определяет величину площади поверхности S_Σ / V тонкодисперсного продукта: $S_\Sigma / V \approx (W_V \eta) / \gamma$ (V – объем диспергируемого продукта).

На рис. 1 представлена логарифмически линейная зависимость показателя W_V (МДж/м³) от размера нагружаемого объекта. Формула (1) подтверждается с точностью до 20% для различных материалов, видов и технологий микро- и макроразрушения (бурение, взрывание, дробление, измельчение) в природных или техногенных явлениях (горные удары, землетрясения). На рис. 2 показана связь W_V с удельной поверхностью $\Delta S / V$ (м²/м³) продуктов разрушения в широком диапазоне, включая разрыв межатомной связи.

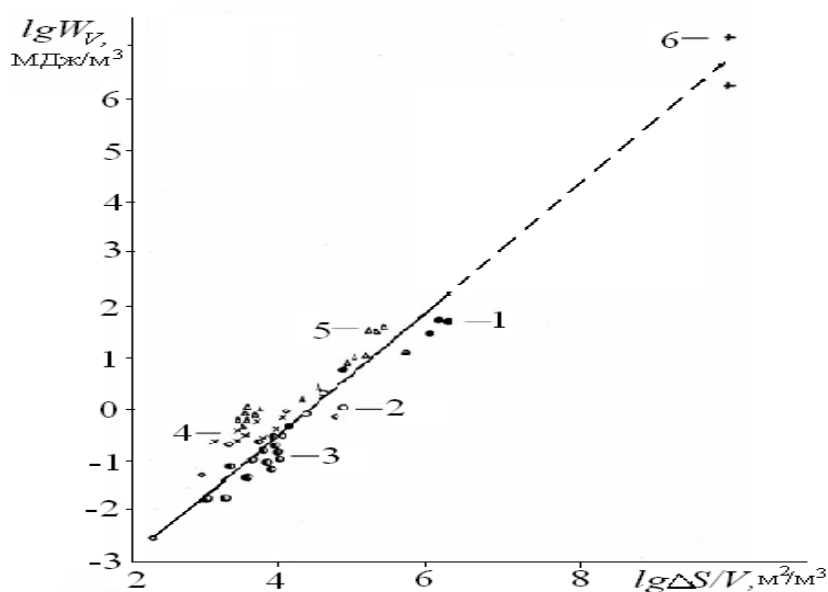
Из рис. 2 следует, что повышение дисперсности продукта в технологии измельчения связано с ростом средней критической плотности энергии W_V при разрушении частиц. Например, показатель $\langle W_V \rangle$ энергии при разрывах межатомных связей (размер разрыва $l \cong \langle a \rangle = 10^{-10}$ м, см. 6 рис. 2) составит величину [3]:

$$\gamma_s = 2,6 \cdot (10^2 \dots 10^3) \text{ Дж/м}^2; \quad \langle W_V \rangle = \gamma_s / \langle a \rangle = 2,6 \cdot (10^6 \dots 10^7) \text{ МДж/м}^3 \quad (2)$$



1-8 - нагужение сжатием кварца, стекла, мрамора, клинкера, порфира, угля, габбро, диабаза; 9 – бурение; 10 – взрывание; 11 – разрывы при горных ударах; 12 – удар на копре; 13 – разрывы при землетрясениях

Рисунок 1 - Зависимость удельной энергии W_V от размера объекта и вида разрушения



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

1 – 40-1000 мкм; 2 – 50-60 мм; 3 – 10-20 мм; 4 – 3 мм; 5 – 1-6 мм; 6 – 10^{-10} м

Рисунок 2 - Связь удельной энергии W_V с показателем $\Delta S/V$ дисперсности продукта

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [6,7] изучались возможности акустоэмиссионного метода оценки показателей струйной мельницы типоразмера УСИ-20 (производительность до 20 кг/ч) при измельчении ряда сыпучих материалов (шамот, известняк, уголь и др.).

Измерение акустической активности проводили датчиком сигналов, соединенным с волноводом, устроенным внутри помольной камеры и выведенным на преобразователь и компьютер (полоса регистрируемых частот от 20 кГц до 1 МГц, неравномерность амплитудно-частотной характеристики до 6 дБ, погрешность до 15 %).

Исследования показали связь производительности G (г/с) мельницы с уровнем акустической активности $\dot{N}$ (с⁻¹) ($\dot{N}$ - число сигналов в единицу времени) зоны помола. На различных стадиях измельчения (загрузка материала, рабочий процесс, разгрузка струй) концентрация частиц в потоке газозвеси определяет число их встречных соударений и соответственно величину $\dot{N}$.

Положительным результатом является использование коэффициента кратности циркуляции материала $K_{\text{ц}} \approx N/N_{\text{загр}}$ для оценки загрузки струй в мельнице. Следует отметить важность информации о состоянии перегрузки или чрезмерной разгрузки струй, так как в обоих случаях производительность мельницы отклоняется от максимального уровня и вероятны избыточные удельные энергозатраты. Параметр $K_{\text{ц}}$ определяют как отношение счета N (порядка 1с) на текущем моменте рабочей стадии к величине $N_{\text{загр}}$ в начале загрузки. Изучение кинетики $K_{\text{ц}}$ и G показало, что максимальная производительность соответствует $K_{\text{ц}} \approx 1$. При длительной разгрузке струй величина $K_{\text{ц}}$ значительно меньше 1, а в режимах перегрузки - $K_{\text{ц}} \approx 2-4$.

Для оценки эффективности процесса предложен условный коэффициент $K_{\text{э}} = G / \lg \dot{N}$, оценивающий соотношение производительности G (г/с) и логарифма акустической активности $\dot{N}$ (с⁻¹) зоны помола. В различных режимах загрузки струй эти показатели изменяются: $G = 1,6-5,5$ г/с; $K_{\text{э}} = 0,4-1,6$. Определены значения акустической активности $\dot{N}$ (с⁻¹) и дисперсности $S_{\text{уд}}$ (м²/г) продукта для «условно достаточной» эффективности ($K_{\text{э}} \geq 0,4$) измельчения:

шамот	$K_{\text{э}} = 1,6-0,7$; $\dot{N} = 10^{3,5-3,8}$; $S_{\text{уд}} = 0,17-0,28$;
известняк	$K_{\text{э}} = 1,4-0,8$; $\dot{N} = 10^{3,9-4,8}$; $S_{\text{уд}} = 0,3-0,68$;
газовый уголь	$K_{\text{э}} = 0,4-0,6$; $\dot{N} = 10^{5,0-5,3}$; $S_{\text{уд}} = 0,97-1,88$;
бурый уголь	$K_{\text{э}} = 0,4$; $\dot{N} = 10^{5,3}$; $S_{\text{уд}} = 1,11-1,32$.

Применение акустической информации для оценки работы мельницы позволило выявить тенденцию закономерного уменьшения показателя $K_{\text{э}} = G / \lg \dot{N}$ (из-за роста акустической активности до $\dot{N} = 10^{5,3}$) с повышением дисперсности продукта до $S_{\text{уд}} = 1,32$ м²/г. Акустический показатель $K_{\text{ц}} \approx N/N_{\text{загр}}$ может использоваться для прогнозной оценки количества циркулирующего некондиционного материала. Однако, акустическая оценка энергозатратности работы струйной мельницы в исследованиях не решена.

В этой связи уделим внимание закону реализации минимальной энергозатратности газоструйного измельчения, установленному в работах В.И. Горобца [8-10]. Предложенная функциональная схема автоматического управления внутримельничным процессом включает применение двух регуляторов, поддерживающих максимум производительности G (т/ч) и оптимальную концентрацию μ материала в потоке газозвеси. Обосновано,

что величину μ характеризует перепад ΔH (кПа/м) давления (на 1 м длины трубопровода) и разрежение H на выходе из зоны помола: $\Delta H = f(\mu)$.

Рассмотрим суть этой разработки с позиции снижения энергозатратности измельчения, включающей условие поиска и поддержания режима максимальной производительности по кондиционному продукту с минимальной величиной S_{y0} показателя дисперсности. Оценку текущей *энергозатратности измельчения* понимаем как расчет количества расходуемой энергии (Дж) за некоторый задаваемый отрезок времени (секунда, минута, час) в непрерывном рабочем процессе мельницы.

На рисунках 3 и 4 показана связь производительности G (т/ч) газоструйной мельницы с ведущими параметрами энергозатратности. Перечислим их: 1) разрежение H (кПа) при расходе Q (нм³/ч) энергоносителя (рис. 3); 2) перепад ΔH (кПа/м) при начальном давлении P_0 энергоносителя (МПа) (см. рис. 4).

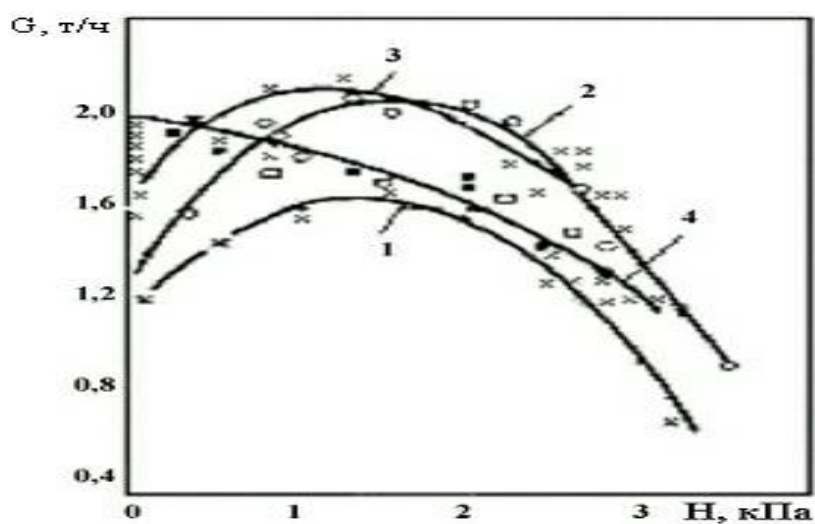


Рисунок 3 - Зависимость G от разрежения H при расходе воздуха Q (нм³/ч):
1 – 2200; 2 – 2400; 3 – 2600; 4 – 3000

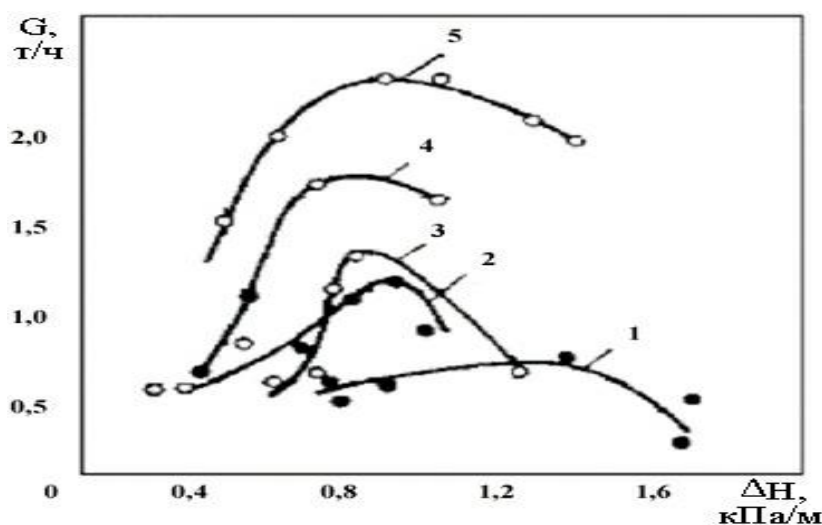


Рисунок 4 - Зависимости G от ΔH при P_0 (МПа): 1 – 0,08; 2 – 0,14; 3 – 0,16; 4 – 0,2; 5 – 0,27

Как видно из рисунков, условия минимальной энергозатратности выявляются как точки экстремумов функций $\mu = f(Q)$ и $G = f(\mu)$. В качестве критерия устойчивой (без завала материалом) работы мельницы используется производная $d\mu / dQ$: при $d\mu / dQ < 0$ - работа устойчивая, при $d\mu / dQ \geq 0$ - неустойчивая. Основу оптимального управления измельчением составляет реализация критерия качества ведения внутримельничного процесса: $dG / d\mu = 0$ при $d\mu / dQ = 0$ [10, с.121-123]. Алгоритм экстремального регулирования газоструйной мельницы ВГМК подтвержден промышленными испытаниями измельчения циркона с увеличением производительности мельницы на 20%.

Вышеизложенные формулы используются в работе [11] соискателя Л.В. Музыки для постановки задачи управления приводом загрузки струйной мельницы с дополнительной информацией акустического мониторинга.

Цель работы состоит в развитии и применении акустического метода оценки затрат энергии в рабочем процессе струйной мельницы, что позволит повысить быстродействие и качество регулирования технологии в оптимальном направлении. Поставленная цель реализуется теоретическим обобщением закономерностей стадии диспергирования при разрушении.

Основной материал исследования. Приведем основополагающие достижения в развивающейся теории диспергирования, открывающие *связи затрат энергии* на образование новой поверхности *с акустическим излучением* разрушаемых частиц в зоне помола струйной мельницы.

Эффекты диспергирования закономерно связаны с дискретностью строения нагружаемой геосреды, квантово-механической природой автовозбуждений вещества вблизи дефектов кристаллической решетки и дискретно-волновым проявлением механизма саморазрушения. С позиций *теории предразрушения* по В.Н. Бовенко, накопленная энергия кристаллической деформированной решетки трансформируется в кинетическую и потенциальную, а также в колебательную энергию разлетающихся частиц [12,13]. Величина $\eta_{кв}$ квантового коэффициента полезного действия АЭ равна отношению максимальной энергии акустических колебаний атомов ($h\nu_m$) к энергии межатомной связи (mc^2):

$$\eta_{кв} = h\nu_m / mc^2 = V_B / c = 10^{-3} \dots 10^{-2}, \quad (3)$$

где h - постоянная Планка; $\nu_m = c / \langle a \rangle$ - максимальная частота АЭ, m - масса атома, c - скорость звука, $\langle a \rangle$ - среднее межатомное расстояние; V_B - предельная амплитуда ($V_B = h / m \langle a \rangle$) колебательной скорости атомов, которая для большинства твердых тел составляет: $V_B / c = 10^{-3} \dots 10^{-2}$.

Согласно механизму диспергирования акустическими волнами величина η этой стадии не может превысить квантовый к.п.д АЭ: $\eta \leq \eta_{кв}$. Из этого следует, что поиск режима измельчения с максимальной акустической трансформацией энергии в эффекты диспергирования открывает информация об акустической активности зоны помола.

Природа разрушения, включая стадию диспергирования, контролируется дискретно-волновым критерием микроразрушения: $B_\lambda = \lambda_B / \langle a \rangle \cong 2,1 \dots 3,1$; среднее значение составляет $B_\lambda \cong 2,6$ ($\langle a \rangle$ – кратчайшее расстояние между атомами, λ_B – наименьшая длина акустической волны в твердом теле, возникающая при разрыве межатомных связей). Теоретическая оценка критерия B_λ включает соотношение физических параметров прочности вещества $U_o / kT_{пл}$ и ограничена параметром ε_* 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).

К числу энергетических свойств, характеризующих способность материала к образованию поверхности при разрушении, относится: теоретическая γ и эффективная γ_s поверхностная энергия. Различие на 2-3 порядка величин γ_s и γ обусловлено механизмом диспергирования аналогично «акустическому лазеру». Ниже показана зависимость γ_s от критерия B_λ микроразрушения и числа N актов излучения при разрывах межатомных связей ($B_\lambda = \lambda_B / \langle a \rangle = 2,6$; $N \cong c / V_B = 10^2 \dots 10^3$):

$$\gamma_s \cong \gamma \cdot N \cdot B_\lambda; \quad \gamma \cong 1 \dots 10 \text{ Дж/м}^2; \quad \gamma_s \cong 2,6 \cdot (10^2 \dots 10^3) \text{ Дж/м}^2. \quad (4)$$

В таблице 1 приведены энергетические показатели свойств, разрушения и диспергирования, установленные при нагружении модельных образцов *трехосным неравнокомпонентным сжатием* на УНТС А.Д. Алексеева. Например, для геоматериалов прочностью σ_o от 63 до 433 МПа определены значения их поверхностной энергии: $\gamma = 0,5\text{--}205 \text{ Дж/м}^2$; $\gamma_s = 45\text{--}765 \text{ Дж/м}^2$; средние величины: $\gamma = 88 \text{ Дж/м}^2$; $\gamma_s = 367 \text{ Дж/м}^2$. Как следует из таблицы, к.п.д. диспергирования составляет диапазон $\eta = (0,02 \dots 7,8) \cdot 10^{-2}$ на уровне единиц и долей процента, что по порядку величины соответствует количеству образованных тонкодисперсных фракций: $\beta_{100} = 0,1 \dots 2,3 \%$, $\beta_{250} = 0,4 \dots 8,2 \%$.

Таблица 1 - Энергетические свойства и показатели энергозатратности измельчения

Показатели	Размерность	Железная руда	Песчаник	Тальк	Уголь
Предел прочности σ_o	МПа	311...433	296...392	224	63...104
Деформация ε_o	%	3,7...5,2	4,2...3,7	10,5	3,4...7,7
Плотность энергии W_V	МДж/м ³	5,7...11,3	6,2...7,2	11,8	4,0...1,1
Плотность энергии $W_{\Delta V}$	МДж/м ³	814...1413	326...97	261	46...210
Содержание β_{250}	%	0,4...5,8	2,3...3,1	2,4	2,4...8,2
Дисперсность $\Delta S/V$	м ² /м ³	349...3740	2080...2770	2830	955...7690
Теоретическая энергия γ	Дж/м ²	0,5...7,4	18...205	60	1,0
Эффективная энергия γ_s	Дж/м ²	158...765	147...410	664	45...90
К.п.д. измельчения η	%	0,05...0,02	0,6...7,8	1,5	0,2...0,9

Экспериментальное подтверждение малой величины η (из-за весомой доли затрат энергии на возбуждение разрывных автоколебаний атомов конденсированного вещества) показало нереальность выявления заметных различий в энергозатратности работы измельчительного оборудования, если в каждом случае поддерживается *энергетически оптимальный* режим диспергирования. Подводя итоги изложенному теоретическому анализу и экспериментальным результатам, делаем заключение о наличии достаточной теоретической базы для оформления закономерности *акустического размерного эффекта диспергирования* и ее применения в развитии акустической оценки энергозатратности рабочего процесса струйной мельницы.

На рис. 5 иллюстрируется проявление динамического размерного эффекта (ДРЭ) в «акустическом варианте» на примере действия высоких боковых давлений на удельное акустическое излучение N_V разрушаемых образцов железной руды [3].

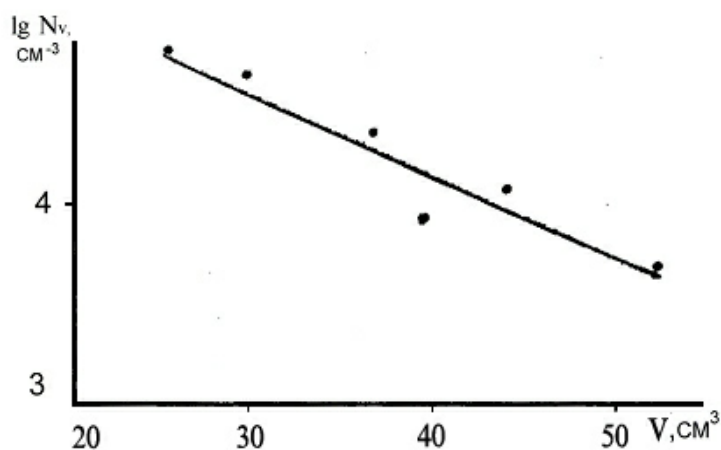


Рисунок 5 - Влияние объема V нагружаемого образца железной руды на удельное акустическое излучение N_V при действии боковых давлений:
 $\sigma_{2-3}=10\text{-}100$ МПа, $\sigma_o = 216\text{-}1160$ МПа

Суть в том, что сама физическая *природа разрушения* геосред ограничена рядом закономерностей: это - динамический размерный эффект ($\gamma_s \cong 0,3$ Дж/см²) в широком диапазоне изменения масштаба и вида разрушения; это - механизм диспергирования акустическими волнами с ограниченной величиной к.п.д. ($\eta \leq \eta_{кв} \cong 10^{-3}\text{-}10^{-2}$); это - зависимость эффективной поверхностной энергии γ_s от критерия B_λ микроразрушения и ограниченного числа N актов излучения ($\gamma_s \cong \gamma \cdot N \cdot B_\lambda$; $B_\lambda \cong 2,1\text{-}3,1$; $N \cong 10^2\text{-}10^3$) при разрывах межатомных связей.

Предлагаемый подход к оценке энергозатратности работы струйной мельницы исходит из единства природы и механизма разрушения нагружаемых тел с общностью проявления сопровождающих разрушение закономерностей акустической эмиссии и эффектов образования новой поверхности разрушенных отдельностей. Методика состоит в следующем.

Допускаем, что произведение величины N_V (имп/см³) удельной АЭ на характерный размер d (см) диспергированных фракций представляет собой

константу (по аналогии с ДРЭ), характеризующую показатель N_S (имп/см²) акустической энергоемкости образования новой поверхности:

$$N_V \text{ (имп / см}^3\text{)} d \text{ (см)} \cong \text{const} \cong N_S \text{ (имп / см}^2\text{)}; \quad (5)$$

Величину N_S определяем по акустической активности $\dot{N}$ (имп/с) в зоне помола и показателям технологии ($G, N, S_{y\partial}$):

$$N_S \text{ (имп / см}^2\text{)} = \dot{N} / G \cdot S_{y\partial} \cong \text{const}, \quad (6)$$

где G (г/с) – производительность мельницы, $S_{y\partial}$ (см²/г) – дисперсность продукта, N (кВт) – мощность привода компрессора в энергосистеме мельницы.

Коэффициент γ_N трансформации энергии в акустическую эмиссию в оптимальном режиме мельницы (с максимальной производительностью $G_{\text{макс}}$) определяем как отношение $\gamma_N = N / \dot{N}$ (Дж/имп) подведенной работы (энергии) к счету образованных акустических сигналов в зоне помола.

Величину γ_s (Дж/см²) эффективной поверхностной энергии для режима минимальной энергозатратности рассчитываем по формуле:

$$N_S \text{ (имп / см}^2\text{)} \cdot \gamma_N \text{ (Дж/имп)} \cong \gamma_s \text{ (Дж/см}^2\text{)} \cong \text{const}. \quad (7)$$

Рассмотрим на примере методику акустической оценки энергозатратности промышленной струйной мельницы для условий ВГМК (мощность компрессора $N=285$ кВт, $n=80$; 170 мин⁻¹).

Экспериментальные данные технологии и акустического излучения в оптимальных режимах (при $G_{\text{макс}}$) составляют:

- 1) $S_{y\partial} \cong 1800$ см²/г, $n=80$ мин⁻¹, $G_{\text{макс}} \cong 1400$ кг/ч;
- 2) $S_{y\partial} \cong 2500$ см²/г, $n=170$ мин⁻¹, $G_{\text{макс}} \cong 1000$ кг/ч.

В таблице 2 приведены результаты расчета эффективной поверхностной энергии γ_s (Дж/см²), коэффициента γ_N (Дж/имп) акустической трансформации потребляемой энергии и показателей N_G (имп/г) и N_S (имп/см²) акустической энергоемкости ($N_G = \dot{N} / G$; $N_S = \dot{N} / G \cdot S_{y\partial}$).

Таблица 2 - Показатели акустической энергозатратности работы струйной мельницы в оптимальных режимах

G , г/с	$S_{y\partial}$, см ² /г	$\dot{N} \cdot 10^{-5}$, имп/с	N_G , имп/г	N_S , имп/см ²	γ_N , Дж/имп	γ_s , Дж/см ²
Производительность $G = 1406-1416$ кг/ч, $n = 80$ мин ⁻¹						
393,3	1753	1,5	381	0,217	1,9	0,41
390,6	1809	1,6	410	0,226	1,78	0,4
Производительность $G = 1094-1022$ кг/ч, $n = 170$ мин ⁻¹						
304	2513	1,37	450	0,179	2,08	0,37
284	2342	1,9	669	0,286	1,5	0,43

Средние значения γ_N и γ_s для *оптимальных* условий работы мельницы составили: $\gamma_N = 1,8$ Дж/имп, $\gamma_s = 0,4$ Дж/см².

Последующие расчеты проведены для ряда экспериментов в условиях более широкого диапазона производительности и режимов загрузки струй (включая *неоптимальные*): $G = 354-1416$ кг/ч; $\dot{N} = (0,9-2,0) \cdot 10^5$ имп/с; $S_{y0} = 1515-2513$ см²/г. Получены следующие результаты:

- средняя величина $\gamma_N = 1,78$ Дж/имп в диапазоне $\gamma_N = 1,42 \dots 3,13$ Дж/имп;
- показатель $\gamma_s = 0,42$ Дж/см² для $G \geq 1000$ кг/ч.

Таким образом, использование комплексной акустико-технологической информации о работе струйной мельницы подтвердило «условно постоянный» уровень параметров: $\gamma_N \cong 1,8$ Дж/имп и $\gamma_s = 0,42$ Дж/см².

Расчет текущих затрат энергии $E_{\Delta\tau}$ за период $\Delta\tau$ работы мельницы проводим по формуле:

$$E_{\Delta}(\text{Дж}) \cong \gamma_N(\text{Дж/имп}) \cdot \dot{N}(\text{имп/с}) \cdot \Delta\tau(\text{с}) \quad (8)$$

При $\gamma_N \cong 1,8$ Дж/имп; $\dot{N} = 1,5 \cdot 10^5$ имп/с; $\Delta\tau = 3600$ с расход энергии составит:

$$E_{\Delta} = 1,8 \cdot 1,5 \cdot 10^5 \cdot 3600 = 9720 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 972 \text{ МДж}.$$

Полагаем, что применение изложенного метода акустической оценки текущих энергозатрат $E_{\Delta\tau}$ приблизит решение проблемы непрерывного экстремального регулирования работы струйной мельницы (на основе критерия качества ведения процесса: $dG / d\mu = 0$ при $d\mu / dQ = 0$ [7]) с позиции соблюдения минимума удельных и сокращения общих энергозатрат.

Эффект быстроедействующего регулирования загрузки струй до «условно постоянного» уровня γ_N ($\gamma_N \cong 1,8$ Дж/имп) состоит в достижении минимальных затрат энергии на диспергирование ($\gamma_s \cong 0,42$ Дж/см²) с максимальным уровнем производительности ($G \cong 1000-1400$ кг/ч) струйной мельницы при прочих равных условиях ($P_0 \cong 0,5$ МПа, $n = 80; 170$ мин⁻¹, $S_{y0} \cong 1800-2500$ см²/г, циркон, ВГМК).

Выводы.

1. Теоретическую основу акустической оценки рабочего процесса струйной мельницы составили закономерности природы разрушения (разрывные автоколебания, квантовый к.п.д. акустической эмиссии, дискретно-волновой критерий) утверждающие ограничения на к.п.д. ($\eta \leq \eta_{kv} \cong 10^{-3}-10^{-2}$) и эффекты ($\beta_{100} \cong 10^{-3}-10^{-2}$) диспергирования.

2. Обоснованы параметры и режимы работы струйной мельницы с минимальной энергозатратностью как точки экстремумов функций $\mu = f(Q)$ и $G = f(\mu)$ с реализацией критерия качества ведения процесса: $dG / d\mu = 0$ при $d\mu / dQ = 0$.

3. Исследования работы мельниц промышленного типоразмера показали, что концентрация материала в потоке газовзвеси задает уровень показателя $\dot{N}$ акустического излучения зоны помола. При этом произведение величины N_V

(имп/см³) удельной АЭ на преимущественный размер d (см) диспергированных фракций характеризует показатель N_s (имп/см²) акустической энергоемкости образования новой поверхности.

4. Величину γ_s (Дж/см²) эффективной поверхностной энергии в режиме минимальной энергозатратности рассчитываем на основе определения коэффициента γ_N *трансформации* потребляемой энергии в акустическую эмиссию в оптимальном режиме. В расчете используется показатель $\dot{N}$ акустической активности в зоне помола, предварительно установленный в режиме *максимальной* производительности мельницы.

5. Оценка затрат энергии $E_{\Delta\tau}$ (Дж) за период $\Delta\tau$ (с) работы мельницы проводится с учетом коэффициента γ_N (Дж/имп) и усредненной (за интервал $\Delta\tau$) акустической активности $\dot{N}$ (имп/с).

6. Условием поддержания минимальной энергозатратности струйного измельчения является регулирование загрузки струй до уровня акустической активности в зоне помола, при котором достигается «условно постоянная» величина коэффициента γ_N ($\gamma_N \cong 1,8$ Дж/имп, циркон, ВГМК).

7. Применение предложенного алгоритма поиска оптимального режима в сочетании с акустическим мониторингом зоны помола и регулированием загрузки струй до «условно постоянного» уровня γ_N (Дж/имп) позволит при прочих равных условиях (параметры энергоносителя, режим классификации) обеспечить минимальные затраты энергии на диспергирование γ_s с максимальным уровнем производительности G и требуемой дисперсности S_{y0} .

8. Акустическая оценка эффективной поверхностной энергии ($\gamma \cong 0,42$ Дж/см²) в *оптимальном режиме* струйного измельчения соответствует закономерности ДРЭ разрушения ($\gamma_s \cong 0,3$ Дж/см²), что подтверждает правомерность использования теории диспергирования (включая *акустический размерный эффект*) для оценки текущих затрат энергии в рабочем процессе струйной мельницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горобец Л.Ж., Дуброва С.Б. Оценка энергетических параметров горных пород на стадии саморазрушения // Деформирование и разрушение горных пород. Бишкек: Илим, 1990. С. 350-358.
2. Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Дуброва С.Б., Панченко О.Ф. Исследование акустоэмиссионных свойств природных материалов в режиме высоких давлений // Физика и техника высоких давлений. 1995. № 3. С. 65-73.
3. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.15.08: защищена 08.10.04 / Горобец Л.Ж. Дн-ск: НГУ, 2004. 35 с.
4. Горобец Л.Ж. Микророшки: технология и оборудование // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. Дніпропетровськ, 1999. № 4 (45). С. 33-41.
5. Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Верхоробина И.В., Бредихин В.Е., Гришаков С.Н. Производство тонкодисперсных материалов в установках струйного измельчения // Тонкоизмельченные и ультрадисперсные материалы в промышленности. Производство и применение: Материалы 1-й междунар. научн. практ. конф. Санкт-Петербург: "ИВА", 2003.—С.18-22.
6. Аперидический датчик для регистрации акустических сигналов: А.с. 512602 СССР / В.Н. Бовенко, В.И. Полунин (СССР). Оpubл. 30.08.76, Бюл. №16. 2с.
7. Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Щербаков А.Е., Прядко Н.С., Верхоробина И.В., Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки // Вісник нац.техн. університета «ХПІ». Харьков, 2007. Вип. № 27. С.33-41.
8. Горобец В.И. Оптимизация параметров и разработка способа автоматического регулирования газоструйной мельницы: дисс...канд.техн.наук: 05.198: защищена 09.11.1972 / Горобец В.И. Дн-ск: ДГИ им. Артема, 1972. 21 с.
9. Иванов А.А., Горобец В.И., Горобец Л.Ж. Способ автоматического регулирования процесса газоструйного измельчения. Авт. свид. №324069. «Бюлл. изобр.», 1972, №2, с.17.

10. Горобец В.И., Горобец Л.Ж. Новое направление работ по измельчению. М.: Недра, 1977. 182 с.
11. Музыка Л.В. Разработка автоматизированной системы управления работой струйной измельчительной установки. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. Дніпро, 2016. Вип. 63 (104). С.112-117.
12. Бовенко В.Н. Синергетические эффекты и закономерности релаксационных колебаний в состоянии предразрушения твердого тела: Автореф. дисс. д-ра физ.-мат. наук: М.:1990.30 с.
13. Бовенко В.Н., Герасимов Р.Ю., Горобец Л.Ж. Радиоспектроскопия продуктов сверхтонкого измельчения. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Аннотации докладов. В 3 томах. Т.2. Нанопизика и нанотехнологии. Фундаментальные проблемы науки, М.:НИЯУ МИФИ, 2010, С. 73-74.

REFERENCES

1. Gorobets L.Zh. and S.B. Dubrova (1990), "Estimation of power parameters of mountain breeds on the stage of independent destruction", *Deformation and destruction of mine rocks*, Bishkek: Ilim, pp. 350-358.
2. Gorobets L.Zh., Bovenko V.N., Dubrova S.V. and Panchenko O.F. (1995), "Research of acoustic emission properties of natural materials in the mode of high pressures", *Physics and echnique of high pressures*, no. 3, pp. 65-73.
3. Gorobets L.Zh. (2004), "Development of scientific foundation of the solid minerals grinding", Abstract of D.Sc. dissertation, Mineral dressing, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.
4. Gorobets L.Zh (1999) "Micropowders: technology and equipment", *Enriching of minerals*, no. 4 (45), pp.33-41.
5. Pilov P.I., Gorobets L.Zh., Verhorobina I.V., Bredihin V.E. and Grishakov S.N. (2003), "A production of the micronized materials in the options of the growing a stream shallow", *Tonkoizmelchennyye I ultradispersnyye materialy v promyshlennosti. Proizvodstvo I primeneniye* [Fine-divided and ultradispersible materials in industry. Production and application], *Materialy I mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of 1th international research and practice conference], S.-Peterburg, Iva, pp.18-22.
6. Bovenko V.N. and Polunin V.I. (1976), *Aperiodicheskiy datchik dlia registretsii akusticheskikh signalov* [Aperiodic sensor for registration of acoustic signals], SU, Copyright certificate 512602
7. Pilov P.I., Gorobets L.Zh., Bovenko V.N., Sherbakov A.E. and Verhorobina I.V. (2007), "Parameters of acoustic radiation of the industrial the option of the growing a stream shallow", *Announcer of nationally-technical university "HPI"*, Kharkiv, Vol. 27, pp. 33-41.
8. Gorobets V.I. (1972), "Optimization of parameters and development of method of automatic control of gas stream mill", Abstract of Ph.D. dissertation, Mineral dressing, Dnipropetrovsk Mining Institution name Artem, Dnipropetrovsk, UA.
9. Ivanov A.A., Gorobets V.I. and Gorobets L.Zh. (1972), *Sposob avtomaticheskogo regulirovaniya protsessa gazostruinogo izmelcheniya* [Method of automatic control of gas stream growing shallow process], SU, Copyright certificate 324069.
10. Gorobets V.I. and Gorobets L.Zh. (1977), "New direction of working researches on growing shallowm", *Bowels of the earth*, Moscow, SU, 182 p.
11. Muzika L.V. (2016), "Development of automated control system by the working growing a stream shallow option", *Mineral dressing*, National Mining University, Dnipro, no. 63(104), pp. 112-117.
12. Bovenko V.N. (1990), "The synergetics effects and conformities to law of relaxation vibrations in a state of pre-destruction of solid", Abstract of D.Sc. dissertation, Fiz.mat., Institute MIEM, Moscow, SU.
13. Bovenko V.N., Gerasimov R.U. and Gorobets L.Zh.(2010), "Radio-location spectroscopy of foods of the overmicronizing", *Scientific session NIYAU MIFI, Lemmatas of lectures*, in 3 volumes, t.2. Nanophysics and nanotechnologies. Fundamental problems of science, pp. 73-74.

Об авторах

Горобец Лариса Жановна, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, larisa-gorobets@rambler.ru.

Верхоробина Инна Владимировна, инженер в отделе геодинамических систем и вибрационных технологий (ОГДС и ВТ), Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, inna_kuchuk@ukr.net.

About the authors

Gorobets Larysa Zhanivna, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, National Technical University "Dnipro Politechnique" (NTU "DP"), Dnipro, Ukraine, larisa-gorobets@rambler.ru.

Verkhorobina Inna Volodymyrivna, Master of Sciences (M.Sc.), Engineer of the Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, inna_kuchuk@ukr.net.

Анотація. Мета роботи полягає в розвитку акустичного методу оцінки витрат енергії в робочому процесі струминного млина з основ узагальнення нових закономірностей диспергування при руйнуванні. Надано теоретичне пояснення проблеми зниження витрат енергії при тонкому подрібненні.

Надані залежності дисперсності продукту від критичної щільності енергії при руйнуванні. Розглянуті акустоємисійні параметри диспергування зразків, що навантажуються стискуванням, та результати акустичної оцінки струминного подрібнення. Проведений аналіз зв'язку продуктивності газоструминного млина з параметрами, що впливають на енерговитратність роботи. Обґрунтовано застосування критерію екстремального регулювання внутрішньомлинового процесу для підтримки режиму максимальної продуктивності. Оформлений

акустичний розмірний ефект диспергування по аналогії з динамічним розмірним ефектом руйнування (ДРЕ). Новий підхід до оцінки енерговитратності роботи струминного млина розвинений з позицій єдності природи та механізму руйнування навантажуваних тіл із спільністю прояву закономірностей акустичної емісії та ефектів утворення нової поверхні зруйнованих окремоностей. У методиці оцінки енерговитрат провідна роль відводиться коефіцієнту γ_N (Дж/імп) трансформації споживаної енергії в акустичне випромінювання в оптимальному режимі роботи млина (з максимальною продуктивністю), який розраховується як відношення підведеної роботи (енергії) до рахунку акустичних сигналів в зоні помелу. Оцінка поточних витрат енергії $E_{\Delta\tau}$ (Дж) за період $\Delta\tau$ (с) роботи проводиться з урахуванням γ_N (Дж/імп) і усередненої (за інтервал $\Delta\tau$) акустичної активності $\dot{N}$ (імп/с). Підтримка мінімальної енерговитратності струминного подрібнення можлива шляхом швидкодіючого регулювання завантаження струменів до рівня вимірюваної акустичної активності в зоні помелу, при якому досягається "умовно постійна" величина коефіцієнта γ_N . Результати акустичної оцінки ефективної поверхневої енергії в оптимальному режимі подрібнення відповідають діапазону оцінки γ_s в закономірності ДРЕ руйнування. Це підтверджує правомірність використання теорії диспергування (включаючи акустичний розмірний ефект) для оцінки поточних витрат енергії в робочому процесі струминного млина.

Ключові слова: струминний млин, щільність енергії, зона помелу, акустична активність, завантаження струменів, диспергування, продуктивність, енерговитратність.

Annotation. The objective of this work was to develop an acoustic method for evaluating energy consumption during the jet mill operation on the basis of the new generalized physical laws of material dispersion at its destruction. Theoretical explanation is given to the problem of energy consumption diminish in the mode of fine grinding. Dependences between the product dispersion and critical energy density in the course of destruction are described. The acoustic-emissive parameters of dispersion of the samples loaded by compression and results of acoustic estimation of the jet grinding are considered. Interrelation between the gas-jet mill performance and parameters impacting on the energy consumption are analyzed. Grounds are given for using a criterion of extremal control of the working process for maintaining maximal performance. An acoustic size effect of dispersion is formulated by the analogy with dynamic size effect of destruction (DSE). A new approach to evaluation of energy consumed by the jet mill is developed from positions of unity of nature and mechanism of the loaded body destruction with community of manifestation of physical laws of acoustic emission and effects of new surface formation on the destroyed particles. Leading role in the methodology of energy consumption evaluation is given to the coefficient γ_N (J/imp) of transformation of the consumed energy into acoustic radiation at optimal mode of the mill operations (at maximum performance), which is calculated as a ratio of the reduced work (energy) to the acoustic signal counts in the grinding zone. Current energy consumption $E_{\Delta\tau}$ (J) for period $\Delta\tau$ (s) of work is calculated with taking into account coefficient γ_N (J/imp) and average (for the interval $\Delta\tau$) acoustic activity $\dot{N}$ (imp/s). It is possible to maintain minimum energy consumption at the jet grinding by the snap-acting control of jets loading up to the level of the measured acoustic activity in the grinding zone, at which a "conditionally permanent" value of coefficient γ_N can be achieved. The results of acoustic evaluation of effective surface energy at optimal grinding mode correspond to the range of estimation γ_s in the regularity of the DSE destruction. This fact confirms validity of the dispersion theory (including the acoustic size effect) use for evaluating current energy consumption in the course of the jet mill operation.

Keywords: jet mill, energy density, grinding zone, acoustic activity, loading of jets, dispersion, productivity, energy consumption.

Стаття надійшла до редакції 20.05. 2020

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Б.О. Блюссом