

В процессе расчета рабочего органа по представленному алгоритму производится оптимизация конструктивных параметров устройства по показателям его энергетической эффективности и качества дробленого продукта.

**Выводы:** разработана методика расчета производительности и потребляемой мощности вибрационных конусных дробилок для подготовки шихтовых материалов к плавке.

УДК 622.73

ГОРОБЕЦ Л.Ж., д.т.н., профессор

ГВУЗ «Национальный горный университет»

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПО РАЗМЕРАМ ЧАСТИЦ НАГРУЖАЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА**

*Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований роли дискретно-волнового критерия микроразрушения в процессе формирования распределений по размерам разрушенных частиц.*

*Наведено результати експериментально-теоретичних досліджень ролі дискретно-хвильового критерію мікроруйнування в процесі формування розподілів за розмірами зруйнованих частинок.*

*The results of experimental and theoretical investigation upon role microdestruction discrete-wave criterion in process of formation destroyed particles distributions according to sizes are given.*

**Проблема и ее связь с основными научными и практическими заданиями.** Цена реализуемых тонкодисперсных минеральных порошков задается содержанием полезного компонента, показателями их гранулометрии и дисперсности, например, величиной удельной поверхности и распределением частиц по размерам. Существуют некоторые, пока нерешенные проблемы обработки полезных ископаемых, связанные с большими потерями энергии при измельчении. Неизученность природы формирования гранулометрии измельченных частиц в процессе разрушения нагружаемой геологической среды затрудняет решение задачи получения порошков требуемого гранулометрического состава.

Проблема обоснованного выбора параметров нагружения материалов в процессе их измельчения является актуальной, поскольку режим нагружения (скорость динамической деформации, температура среды, плотность энергии при разрушении, длительность нагружения) должен изменяться в зависимости от задаваемых распределений по размерам измельченных частиц. Варьируя режим нагружения, можно изменить поверхностную энергию, технологические свойства измельченного материала и

затраты на измельчение. В процессах тонкого и сверхтонкого измельчения (диспергирования) особенно важно предусмотреть оптимальное использование энергии разрушения, накопленной материалом на стадии нагружения.

В данной работе рассмотрены закономерности формирования распределений по размерам измельченных частиц с учетом физической природы явления фрагментирования в процессе разрушения нагружаемого твердого тела.

**Анализ исследований и публикаций.** Рассмотрим физические закономерности и критерии, которые формируют предразрушающее состояние нагруженного твердого тела, задают структуру и уровень накопления энергии к моменту распада твердого тела на фрагменты и отдельные. Процесс разделения деформируемого твердого тела на изолированные отдельные происходит в активных локальных зонах вблизи дефектов структуры по достижении *критического* (предельного) состояния вещества. Последнее подобно резонансно-волновому состоянию, в котором диффузия акустического излучения оказывает разрушительное действие на кристаллическую структуру нагруженного тела [1, 2].

Согласно модели деформируемого твердого тела по В. Бовенко [3, 4] предразрушающее состояние включает три стадии: *стационарную* – квазипериодические релаксационные (разрывные) колебания, *ускоренную* – стохастические автоколебания и третью неустойчивую – *авторезонансные* колебания. Причем, соотношения между длительностями стадий выглядят как  $t_1 : t_{II} : t_{III} = 1 : 10^{-3} : (10^{-12} - 10^{-6})$ , то есть продолжительность *стационарной* стадии  $t_1$ , характеризующей ресурс долговечности материала при статических испытаниях, примерно на три порядка превышает общую продолжительность двух других стадий ( $t_{II}$  и  $t_{III}$ ). Стадии протекают неоднократно с контролем физики их функционирования дискретно-волновым критерием микроразрушения  $B_\lambda$  [4-6]. Теоретическая оценка этого критерия включает соотношение физических параметров прочности вещества  $U_o / kT_{пл}$  и ограничена величиной разрывной деформации  $\varepsilon_*$  кристаллической решетки – не более 0,2...0,25 ( $U_o$  – энергия разрушения решетки, эквивалентная теплоте сублимации,  $T_{пл}$  – температура плавления вещества,  $k$  – константа Больцмана) [4].

Теоретические исследования показали, что критерий  $B_\lambda$  для большинства твердых тел находится в узком интервале значений от 2,1 до 3,1, так что его среднее значение равно  $B_\lambda \cong 2,6$ . Если  $B_\lambda > 2,1...3,1$ , нагруженное тело находится в устойчивом состоянии, а при  $B_\lambda \leq 2,1...3,1$  релаксационные автоколебания атомов приводят нагруженную систему к разрушению. При этом характерные размеры образующихся фрагментов кратны величине инвариантности  $B_\lambda$  микроразрушения твердых тел.

Потеря устойчивости нагруженного тела наступает при совпадении длины  $\lambda_K$  излучаемой волны со средним расстоянием  $L_K$  между трещина-

ми. Это и есть авторезонансное условие интенсификации процесса разрушения и диспергирования, так как длительность накачки энергии совпадает с длительностью ее освобождения, а при этом разрыв одной или нескольких межатомных связей является “спусковым крючком” цепного процесса разрыва большого количества связей.

Отношение расстояния между трещинами  $L_k$  к их размеру  $l_k$  характеризует среднее значение концентрационного критерия  $K = L_k / l_k$  в процессе трещинообразования ( $k$  – порядок ранга разрушения) [7]. Разрушение наступает в том случае, когда величина  $K$  оказывается близкой к дискретно-волновому критерию  $B_\lambda$  :

$$B_\lambda = \lambda_B / \langle a \rangle \cong 2,1 \dots 3,1 ;$$

$$\lim_{L_k \rightarrow \lambda_k} K = \frac{\lambda_k}{l_k} = \frac{\lambda_B}{\langle a \rangle} . \quad (1)$$

Здесь  $\lambda_B$  имеет смысл наименьшей длины цуга акустической волны при разрыве межатомных связей активированного атома,  $\langle a \rangle$  – среднее расстояние между атомами в твердом теле.

В связи с тем, что длина волн акустического излучения  $\lambda_k$  в очаге разрушения совпадает по порядку величины со средним расстоянием  $L_k$  между трещинами, характерные размеры разрывов сплошности  $l$  и соответствующих им длин  $\lambda_k$  излучаемых волн описываются формулой В. Бовенко:

$$l_k = a (\lambda_B / a)^k ; \quad \lambda_k = a (\lambda_B / a)^{k+1} . \quad (2)$$

Закономерность (2) обусловлена единством дискретной и волновой природы разрушения. Принцип автомодельности процессов разрушения на любом масштабном уровне задает связь длины акустических волн  $\lambda_k$ , возникающих при разрывах, с длиной трещин  $l_k$  соотношением  $\lambda_k / l_k = \lambda_B / a$ .

Это означает, что процесс формирования гранулометрического состава частиц при разрушении (дроблении, измельчении, диспергировании) происходит естественно с участием закономерности выполнения геометрической прогрессии (для ряда характерных размеров частиц разрушаемого тела), основанием которой служит величина дискретно-волнового критерия микроразрушения. В согласии с автоколебательной теорией предразрушения фрактальная размерность диспергирования продукта связана с дискретно-волновым критерием разрушения. Закономерностями (1), (2) объясняется появление максимумов в распределениях по размерам разрушенных частиц, а именно: один максимум связан с длиной излучаемой волны  $\lambda_k$  (или расстоянием  $L_k$  между трещинами), а второй – с размером разрыва  $l_k$ .

Таким образом, соотношения (1) и (2) составляют физическую основу теоретического подхода к изучению формирования размеров разрушенных (измельченных) частиц.

**Постановка задачи.** В практике исследований гранулометрического состава продуктов измельчения, представляемого в виде кривых распределения частиц по числу или массовой доле в материале, встречаются случаи, когда распределение частиц по размерам имеет два и более максимумов. Полиmodalность в распределении отдельностей по размерам отмечают также при анализе разрушения горных пород взрывом, при изучении повторяемости землетрясений, спектров рассеянных акустических колебаний в земной коре.

В данной работе решалась задача оценки соответствия вышеизложенных теоретических положений практическим данным путем количественного анализа ряда гранулометрических характеристик для 16 видов материалов в широком диапазоне свойств, масштабов, способов и режимов измельчения.

**Изложение материала и результаты.** Гранулометрическому анализу подвергались материалы однокомпонентного состава (глинозем, электрокорунд, шамот, цемент, уголь, марганцевый и пирротиновый концентраты) и полиминеральные руды и породы (железистые кварциты, оловосодержащая и медно-никелевая руда, талькмагнезиты).

Физико-механические свойства исследуемых материалов изменялись в широких пределах: размер частиц  $2 \cdot 10^{-5} \dots 9 \cdot 10^{-1}$ , плотность  $1,5 \dots 6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, твердость по десятибальной шкале 1...9. Исследовались материалы, измельченные 12 способами в диапазоне размеров отдельностей от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  м. Анализировались дробленые и измельченные продукты в конусной, инерционной и центробежной дробилках, шаровой, рудногалечной, вибрационной, струйной и аэродинамической мельницах. Длительность нагружения раздавливанием, ударами, истиранием, термомеханической обработкой в зависимости от способа разрушения составляла от долей секунды до нескольких часов.

На рис. 1 дан пример распределений размеров измельченных частиц железной руды при различных значениях скорости удара ( $v=25-200$  м/с) и размерах разрушаемых частиц ( $D=0,5-6,0$  мм) [9].

В табл. 1 приведены средние значения отношения  $d_k/d_{k-1}$  последовательно расположенных преимущественных размеров  $d_k$  и  $d_{k-1}$  измельченных частиц, установленных анализом графиков их распределений по размерам (при условии соблюдения модуля шкалы классификации).

Из таблицы видно, что в области дробления и измельчения величина показателя дискретности  $d_k/d_{k-1} = 2,6 \pm 0,6$  хорошо согласуется с интервалом изменения дискретно-волнового параметра  $\lambda_D/a = 2,1 \dots 3,1$ , характеризующим теоретическую величину, предсказанную автоколебательной теорией [6, 8]. При исследовании гранулометрических характеристик измельченных продуктов величину соблюдаемого модуля классификации, следует принимать равной значению дискретно-волнового параметра. Если же анализу подвергаются более крупные отдельности ( $d \geq 10^{-3}$  м), величина модуля может задаваться близкой к значению концентрации

онного критерия с учетом его размерного эффекта.

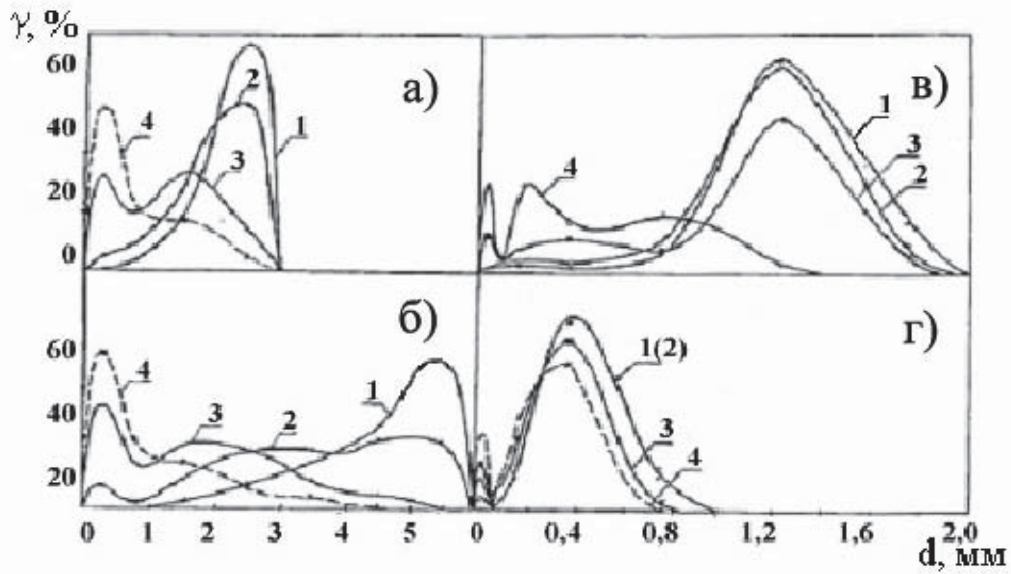


Рис. 1. Распределение размеров измельченных частиц железной руды при различной скорости удара  $v$  (м/с) и размерах исходных частиц  $D$  (мм) : а)  $D = 2...3$ ; б)  $3...6$ ; в)  $1...2$ ; г)  $0,5...1$  мм; 1 -  $v = 25$ ; 2 -  $v = 50$ ; 3 -  $v = 100$ ; 4 -  $v = 200$  м/с;  $\gamma$ -массовая доля фракций менее  $d$ , %.

Таблица 1

Проявление свойства дискретности в распределениях частиц по размерам.

Вид обработки	Преимущественный размер в распределении частиц	Отношение последовательно расположенных преимущественных размеров $d_k/d_{k-1}$	Среднее значение $d_k/d_{k-1}$
Дробление	$228 \pm 77$	$3,1 \pm 1,7$	$3,4 \pm 1,4$
	$74 \pm 16$	$4,9 \pm 2,4$	
	$15 \pm 4$	$3,0 \pm 1,4$	
	$5 \pm 1$	$3,3 \pm 0,8$	
	$1,5 \pm 0,1$	$4,0 \pm 1,5$	
	$0,37 \pm 0,12$	$2,2 \pm 0,9$	
Измельчение	$(170 \pm 14) \cdot 10^{-3}$	$2,3 \pm 0,5$	$2,6 \pm 0,6$
	$(74 \pm 11) \cdot 10^{-3}$	$2,3 \pm 0,4$	
	$(32 \pm 2) \cdot 10^{-3}$	$2,7 \pm 0,7$	
	$(11,7 \pm 1,8) \cdot 10^{-3}$	$3,3 \pm 1,2$	
	$(3,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$	-	



Действием критерия  $B_\lambda$  объясняется наличие максимумов в распределениях частиц по размерам.. Установлено, что гранулометрические характеристики продуктов измельчения в диапазоне размеров частиц от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  м подчиняются геометрической прогрессии для ряда преимущественных размеров частиц  $d_k/d_{k-1}$ , и знаменателем прогрессии служит величина дискретно-волнового критерия микроразрушения, то-есть практически величина соотношения  $d_k/d_{k-1}$  кратна параметру  $B_\lambda = \lambda_B / \langle a \rangle = 2,6 \pm 0,5$  [3, 10].

Из полученных результатов следует вывод о целесообразности применения дискретно-волнового критерия в качестве *модуля классификации* при сопоставлении гранулометрических характеристик диспергированных материалов.

Физический критерий микроразрушения  $B_\lambda$  может также найти применение для прогнозной оценки наиболее важных технологических показателей диспергирования, например, удельной поверхности измельченного продукта, степени измельчения, удельного расхода энергии на измельчение [3, 9-11]. В приведенном ниже соотношении, связывающем эффективную  $\gamma_s$  и теоретическую  $\gamma$  величины поверхностной энергии, показано влияние на характеристики диспергирования критерия  $B_\lambda$  и параметра  $N$ , характеризующего число элементарных актов излучения при разрывах межатомных связей:

$$\gamma_s \cong \gamma N \frac{\lambda_B}{\langle a \rangle};$$

$$N = \gamma \langle a \rangle^2 / h \nu_m; \quad N \cong c/V_B; \quad V_B = h/m \langle a \rangle, \quad (3)$$

где  $h$  - постоянная Планка;  $\nu_m = c/\langle a \rangle$  - максимальная частота тепловых колебаний атомов,  $c$  - скорость звука,  $V_B$  - предельная амплитуда колебательной скорости атомов, которая для большинства твердых тел составляет  $V_B/c = 10^{-3} \dots 10^{-2}$ .

Расчеты показывают, что средняя плотность  $\langle W_V \rangle$  энергии при разрывах межатомных связей (размер разрыва  $l \cong \langle a \rangle = 10^{-10}$  м) составляет величину:  $\langle W_V \rangle = \gamma_s / \langle a \rangle = 2,6 \cdot (10^6 \dots 10^7)$  МДж/м<sup>3</sup>;  $\gamma_s = 2,6 \cdot (10^2 \dots 10^3)$  Дж/м<sup>2</sup>;  $N = 10^2 \dots 10^3$ ,  $\gamma = 1 \dots 10$  Дж/м<sup>2</sup>, среднее  $B_\lambda = \lambda_B / \langle a \rangle = 2,6$ . Различие на 2-3 порядка величин  $\gamma_s$  и  $\gamma$  связано с дополнительными затратами энергии на возбуждение автоколебаний атомов.

Об этом свидетельствует экспериментально установленная закономерность *динамического размерного эффекта* разрушения, а именно [9, 12]:

$$W_B d \cong \gamma_s; \quad W_B d \cong const; \\ \gamma_s \cong 3 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2. \quad (4)$$

Здесь  $W_B$  - критическая плотность энергии микроразрушения, которая в значительной степени определяет величину площади поверхности  $S_\Sigma/V$  тонкодисперсного продукта:

$$S_{\Sigma}/V \approx (W_B \eta_B) / \gamma \quad (5)$$

( $\eta_B$  – квантовый к.п.д. акустической эмиссии,  $V$  – объем диспергируемого продукта).

Весьма полезной для оценки поверхностной энергии  $\gamma_s$  при микродиспергировании является формула:

$$\gamma_s = \left(1 + \frac{m}{2}\right) \gamma \frac{S_{\Sigma}}{S}, \quad (6)$$

где  $m$  – постоянная, характеризующая потенциальную энергию взаимодействия между атомами твердого тела;  $S$  – исходная площадь поверхности диспергируемых частиц.

С автономностью и автоколебательной природой процесса разрушения твердых тел связан выбор оптимальной величины степени диспергирования в измельчительном аппарате. Степень измельчения  $I_{pq}$  при получении тонкодисперсных порошков может характеризоваться соотношением, включающим дискретно-волновой критерий  $B_{\lambda} = \lambda_B / \langle a \rangle$  и показатель диспергирования  $\alpha_{pq}$  [3, 10]:

$$I_{pq} = \frac{d_p}{d_q} = (B_{\lambda})^{\alpha_{pq}}; \alpha_{pq} = p - q. \quad (7)$$

При статических или слабодинамических 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 нагружения эти параметры значительно больше, достигая при взрывных методах разрушения максимальных значений:  $I_{pq} = 5 \cdot 10^3$ ,  $\alpha_{pq} = 7 \dots 9$ . Из этого следует, что в процессе измельчения имеет практически выгодно задавать время накачки измельчаемых частиц энергией соизмеримым по порядку величины со временем их разрушения, что будет способствовать интенсификации диспергирования и снижению энергоемкости процесса. Экспериментально установлено, что степень диспергирования увеличивается пропорционально продолжительности третьей стадии предразрушающего состояния – авторезонанса [13, 14].

**Выводы.** Новый методологический подход к рассмотрению закономерностей формирования распределений частиц при разрушении нагружаемых твердых тел основан на учете единства дискретных и волновых свойств вещества в конденсированном состоянии. Для выбора режима диспергирования в производстве тонкодисперсных порошков целесообразно использование дискретно-волнового критерия микроразрушения и связанных с ним закономерностей.

*Список литературы:*

1. Бовенко В.Н. Коэффициент трансформации акустической эмиссии при необратимой деформации кристалла // ДАН УССР. Серия А. -1983. - № 8. -С. 42-45.

2. Бовенко В.Н. Основные положения автоколебательной модели предразрушающего состояния твердых тел // ДАН СССР.-1986. -Т. 286, №5. -С. 1097-1101.
3. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. Применение автоколебательной теории разрушения для прогнозирования энергоемкости процесса измельчения твердых тел // ФТПРПИ. –1986. -№ 1. –С. 106-111.
4. 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.
5. Бовенко В.Н., Старцев В.М. Дискретно-волновая природа надмолекулярной организации аморфного полимера //Высокомолек. соедин., Серия Б. –1994. –Т. 36, №6. –С. 1004 –1008.
6. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. Дискретно-волновая природа диспергирования //Науковий вісник НГУ. -2008. -№1. –С. 7-9.
7. Куксенко В.С. Микромеханика разрушения материалов: Автореф. дис... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07/Ин-т высокомолек. соедин. -Л., 1977. -36 с.
8. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. О проявлении дискретности твердых тел //ДАН СССР. -1987. -Т. 292, № 5. -С. 1095-1100.
9. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореф. дисс. д-ра техн. наук: НГУ: Днепр-ск. –2004. -35 с.
10. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. Определение зависимости плотности энергии от размера разрушения //Физ.-техн. пробл. разработ. полезн. ископаемых. -1986. -№5. -С. 109-111.
11. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж., Дуброва С.Б. Явление акустического затишья перед разрушением конденсированных сред//Синергетика, структура и свойства материалов. Самоорганизующиеся технологии. -М., 1996. -С. 48-50.
12. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. Определение зависимости плотности энергии от размера разрушения //Физ.-техн. пробл. разработ. полезн. ископаемых. -1986. -№5. -С. 109-111.
13. 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.
14. Горобец Л.Ж. Физические основы прогнозирования технологии измельчения // Обогащение руд, -1995. -№ 4-5. -С. 19-23.