

УДК 622.73

П.И. ПИЛЮВ, докт. техн. наук, ДНГУ,
Л.Ж. ГОРБЕЦ, докт. техн. наук, ДНГУ, г. Днепропетровск,
В.Н. БОВЕНКО, докт. техн. наук, МГТУ, г. Москва,
Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук, ИТМ НАН Украины,
И.В. ВЕРХОРОБИНА, ИГТМ НАН Украины, г. Днепропетровск

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Встановлено акустичні параметри, які характеризують ефективність струйного подрібнення, що дозволяє їх використовувати для регулювання процесу.

The acoustic parameters describing efficiency of jet crushing that allows to use them for management of process are established.

Введение.

К числу показателей эффективности измельчения относят удельную производительность мельницы, затраты энергии на единицу образованной поверхности или массы готового продукта. Струйные измельчительные установки рационально используются при получении высокодисперсных порошков, когда важна не только величина образованной поверхности, но и энергетические состояние частиц измельченного продукта, предназначенного для последующего технологического передела (растворения, спекания, изготовления высокопрочных изделий и т.д.) [1 – 3].

При струйном измельчении наблюдается значительное повышение реакционной способности измельченных частиц, обусловленное тем, что свежесформированная поверхность диспергированного вещества содержит активные функциональные группы А атомов; причем, их содержание по отношению к

числу структурных единиц В остова кристаллической решетки частицы пропорционально параметру S/V : $\frac{A}{B} \approx \frac{S}{V} \approx d^{-1}$ (V – объем разрушенной частицы, S – площадь образованной поверхности, d – обобщенный размер частицы измельченного продукта) [1]. Прирост удельной поверхности $\Delta S/V$ ($\Delta S \equiv S$) называют параметром дисперсности и используют для прогнозной оценки степени механоактивации измельченных частиц менее 100 мкм.

Установлена теоретическая взаимосвязь между параметром дисперсности $\Delta S/V$ и энергетическими свойствами измельчаемого материала, характеризующимися величиной γ удельной поверхностной энергии, коэффициентом η_D полезного действия диспергирования, критической плотностью энергии WV при разрушении и локальной плотностью $W\Delta V$ энергии в зоне диспергирования разрушаемого тела: $\Delta S/V \approx (W\Delta V \cdot \eta_D) / \gamma$; $WV \approx \gamma / (d \cdot \eta_D)$. В указанных формулах – $WV = \sigma_s \cdot \epsilon_s / 2$, МДж/м³, σ_s – предел прочности на сжатие; ϵ_s , ϵ_d – соответственно относительная деформация на пределе прочности и на стадии диспергирования [1].

Из этого следует, что повышение эффективности измельчения возможно в результате увеличения плотности энергии при разрушении WV измельчаемых частиц. В частности, при струйном измельчении возможно варьирование параметра WV за счет изменения скорости встречных ударов и соответственно скорости динамической деформации при разрушении частиц в зависимости от степени загрузки струй твердой фазой.

В этой связи актуальной проблемой является поиск и поддержание эффективного режима измельчения частиц в струях, при котором достигается высокий уровень WV и в результате максимальная производительность струйной мельницы по готовому продукту при соблюдении требуемой дисперсности порошка.

Цель работы.

В данной работе решалась задача исследования акустического излучения зоны помола в различных состояниях загрузки струй и определение связи производительности мельницы с акустическими параметрами процесса. Для измельчения использовалась противоточная струйная установка лабораторного типоразмера производительностью 2 – 30 кг/ч. Производительность мельницы рассчитывалась на основе взвешивания готового продукта, осажденного в циклоне. Масса порций загружаемого материала составляла $m = 0,5 - 1,0$ кг; интервал их загрузки – 3 – 8 мин. Измельче-

нию подвергался шломот крупностью менее 2,5 мм; частота вращения ротора классификатора типа КОВ составила $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; давление сжатого воздуха – $P = 0,3 \text{ МПа}$.

На рис. 1 показано изменение производительности струйной мельницы в различных режимах загрузки струй (подача порций исходного материала обозначена стрелками; пунктир – к графику 1; сплошная линия – к графику 2). При этом параметры энергоносителя, режим классификации, крупность исходного материала поддерживались на неизменном уровне:

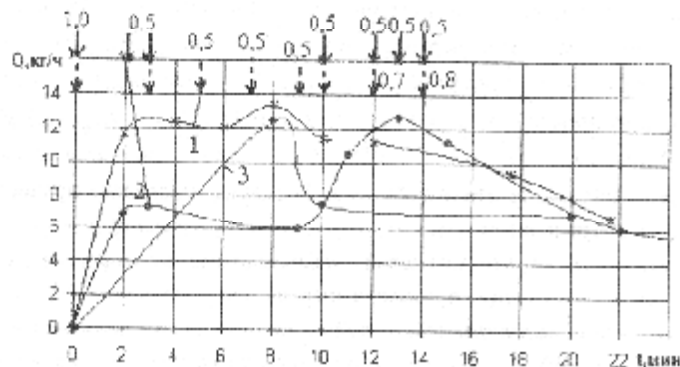


Рис. 1. Зависимость производительности Q мельницы от загрузки струй материалом: оптимальный режим загрузки струй материалом ($Q_{opt} = 10,36 \text{ кг/ч}$); режим с перегрузкой мельницы ($Q_{pr} = 7,58 \text{ кг/ч}$); режим без загрузки ($Q_{ct} = 9,11 \text{ кг/ч}$).

Опытами установлена необходимость одновременного контроля момента достижения оптимальных условий измельчения (график 1 рис.1) для подачи очередной порции исходного материала.

В случае задержки подачи материала (кривая 3 рис. 1) струя разгружается, что обуславливает снижение числа и вероятности встречных ударов частиц в зоне помола, и соответственно уменьшение производительности мельницы.

В процессе измельчения возможна некоторая перегрузка струй материалом, при которой также происходит отклонение производительности от максимального уровня по другой причине, в результате уменьшения скорости разгона частиц из-за превышения их оптимальной концентрации в струе

(график 2 на рис. 1). Если не прекратить подачу материала, может наступить неопустимый аварийный “завал” помольной камеры. В последнем случае в системе мельницы вместо измельчения происходит непрерывное или пульсирующее пневмотранспортирование, с резким падением производительности, а далее – длительным восстановлением (после отключения подачи материала) оптимального режима измельчения. Акустическая эмиссия измерялась в зоне помола с помощью широкополосного аперийодического датчика,

смонтированного на торце латунного волновода [4]. Другой конец волновода размещался внутри помольной камеры мельницы. Датчик соединяли с аналогоцифровым преобразователем акустических сигналов (АС) и компьютером.

На рис. 2 показана кинетика величин амплитуды АС в зависимости от стадии загрузки струй материалом (загрузка, рабочий режим, разгрузка). Видно, что на стадии загрузки струй материалом амплитуды АС могут отличаться на порядок, тогда как в рабочем режиме измельчения и на стадии разгрузки струй в результате удаления наиболее

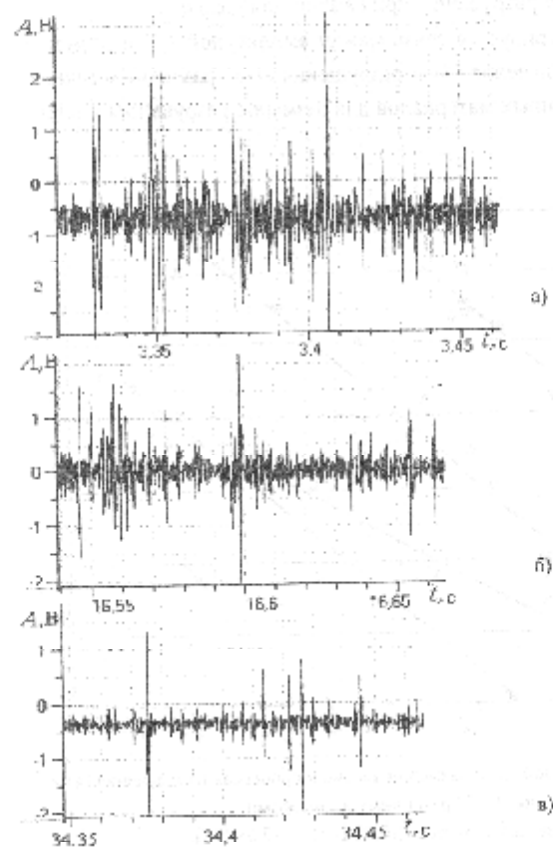


Рис. 2. Кинетика амплитуд АС в различных режимах измельчения: а) загрузка; б) рабочий режим; в) – разгрузка

тонких частиц продукта различие амплитуд уменьшаются до 2–3 раз.

Анализ амплитудных спектров позволяет считать характеристикой крупности исходного материала – распределение амплитуд АС на стадии загрузки, тогда как акустические сигналы на стадии разгрузки могут характеризовать размеры частиц циркулирующей нагрузки (возврата продукта классификатора в инжекторы). Полагаем, что контроль значений амплитуд АС целесообразен в акустическом мониторинге крупности измельчаемых частиц, поскольку согласно опытным данным работ [5, 6] величина амплитуды АС пропорциональна размеру разрушения при сжатии или ударах.

На рис. 3. иллюстрируется связь между амплитудой АС и размером частиц в процессах измельчения (4) и разрушения (1–3) различными способами различных гетерогенных материалов для размеров разрушения в диапазоне 0,04 – 2мм.

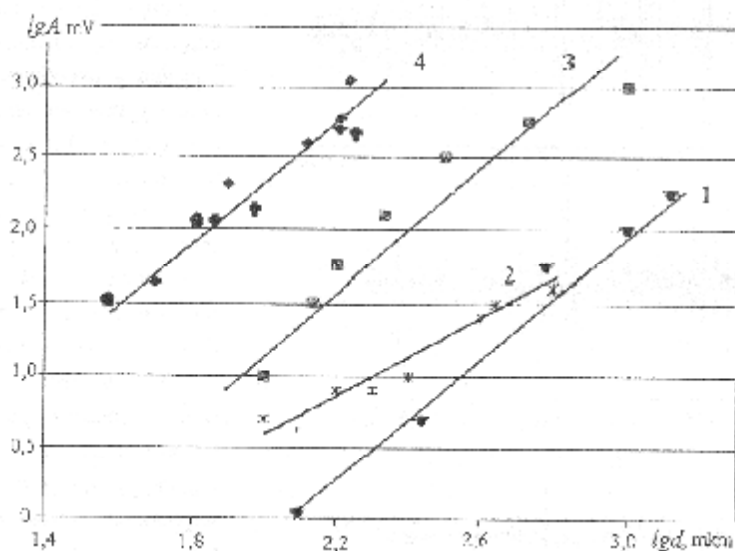


Рис. 3. Связь между амплитудой АС и размером частиц в процессах измельчения (4) и разрушения (1–3) различными способами:

- 1 – разрушение сжатием зерен диоксида, (0,1 – 2 мм) [5];
- 2 – разрыв стеклянных волокон (0,1 – 2 мм) [5];
- 3 – разрушение сжатием перемычек между порами в пористом стекле (0,1 – 1 мм) [6];
- 4 – струйное измельчение частиц шпота (●), кварцевого песка (◊), цемента (◊) (0,04 – 1,1 мм).

Рис. 4. характеризует влияние крупности измельчаемых в струях частиц в диапазоне максимального размера от 0,63 до 2,5 мм на кинетику амплитуд АС, из которого следует вывод об увеличении амплитуд как максимальных, так и средних значений при накоплении в струе частиц большей крупности.

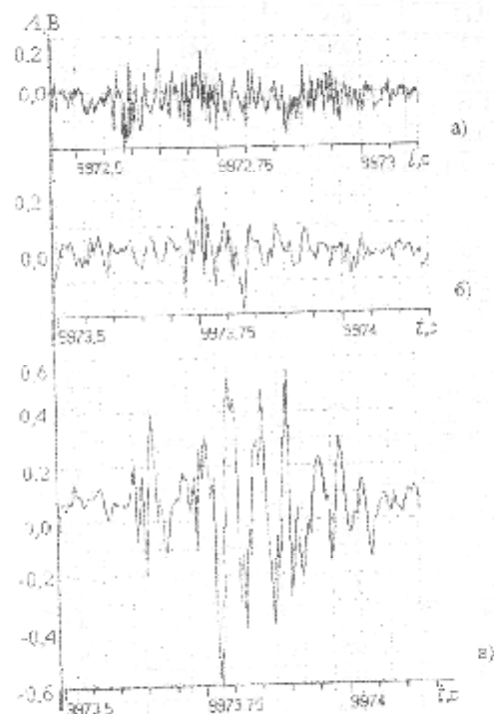


Рис. 4. Характеристики амплитуд АС в рабочем режиме при различной крупности измельчаемого материала: а) менее 0,63 мм; б) 0,63 – 1,6 мм; в) менее 2,5 мм.

Результаты проведенного исследования струйного измельчения показали, что с началом разгрузки струй наблюдается уменьшение не только величины амплитуды (средней A_{cp} и максимальной A_{max}) АС, но и акустической активности N (скорости счета) акустических сигналов зоны помола.

Результаты проведенного исследования струйного измельчения показали, что с началом разгрузки струй наблюдается уменьшение не только величины амплитуды (средней A_{cp} и максимальной A_{max}) АС, но и акустической активности N (скорости счета) акустических сигналов зоны помола.

В таблице приведены опытные данные, показывающие изменение во времени производительности мельницы Q и параметров акустического излучения зоны помола при работе мельницы в различных режимах заполнения струй материалом.

Результаты анализа кинетики производительности струйной мельницы
и параметров акустического излучения

t текущ. мин	Q, кг/ч	$\dot{N} \cdot 10^5$ ямд/с	$A_{ср}$, В	A_{max} , В
ОПЫТ 1 - $Q_{ср} = 6,4$ кг/ч; загрузка однократная				
0,1	-	1,56	2	6,5
2	9,15	0,96	1,5	4,5
4	7,2	0,94	0,46	2,5
6	3,0	0,46	0,22	0,6
8	1,35	0,75	0,2	0,5
10	0,6	0,18	0,1	0,4
ОПЫТ 2 - $Q_{ср} = 8,4$ кг/ч; загрузка многократная с одной перегрузкой				
0,1	-	0,86	2,5	6
2	9,0	1,75	1	3
4	6,24	1,29	1	4,5
6	12,45	1,30	1,5	4
8	12,6	1,60	1,4	4
10	15,0	1,79	1,2	4
12	3,9	1,45	1,5	4
14	0,9	0,45	0,7	2,5
ОПЫТ 3 - $Q_{ср} = 8,5$ кг/ч; загрузка многократная - оптимальная				
0,1	-	1,95	1,5	4,0
2	10,5	1,2	1,0	2,75
4	11,25	1,8	1,2	3,5
6	10,86	1,0	1,3	4,2
8	10,35	1,1	1,1	3,6
10	10,65	1,3	1,3	4,5
12	10,35	0,5	1,1	4,4
14	6,0	0,4	0,4	2,5
16	2,4	0,14	0,2	1,5

На рис. 5 проведено сравнение кинетики акустической активности \dot{N} зоны помола при одноразовой загрузке и порционной подаче измельчаемого материала. Из графиков следует, что изменение угла наклона зависимости $\lg \dot{N} = f(t)$ является признаком начала разгрузки струй, сопровождающейся уменьшением эффективности струйного измельчения.

Выводы.

Проведенные исследования позволили установить следующие закономерности изменения технологических и акустических параметров в процессе

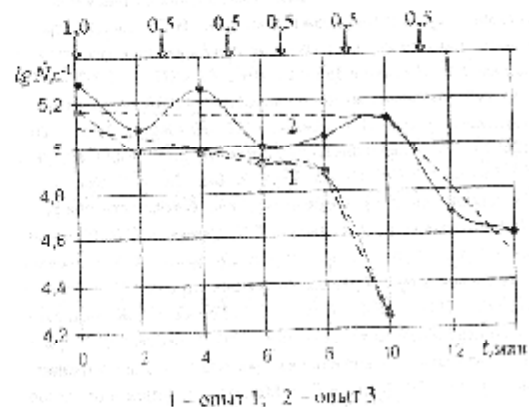


Рис. 5. Кинетика акустической активности зоны помола в условиях разовой (1) и многократной (2) загрузки материала

измельчения (загрузка, рабочий режим, разгрузка):

- в зависимости от крупности частиц, содержащихся в струе, изменяются амплитуды АС в зоне помола, причем на стадии загрузки средняя и максимальная величина амплитуд отличается на порядок, тогда как в рабочем режиме и на стадии разгрузки это различие уменьшается до 2-3 раз;

- отклонение скорости счета АС в зоне помола от диапазона $\lg \dot{N} = 5,0 - 5,3$ характеризует повышение эффективности измельчения, при этом изменение угла наклона графика зависимости $\lg \dot{N} = f(t)$ является признаком начала разгрузки струй и уменьшения эффективности струйного измельчения

Таким образом, основными акустическими характеристиками при мониторинге струйного измельчения является кинетика счета и амплитуды АС [7], а технологическими характеристиками - кинетика производительности при заданной дисперсности продукта, параметрах энергоносителя и режима классификации.

Алгоритм управления процессом струйного измельчения должен учитывать требования достижения максимальной эффективности процесса путем оптимальной загрузки струй материалом на основе мониторинга указанных акустических параметров.

струйного измельчения:

- производительность мельницы изменяется в зависимости от степени загрузки струй материалом, причем, как перегрузка, так и недогрузка струй материалом приводит к уменьшению производительности;

- величина амплитуды АС изменяется в зависимости от технологической стадии измельчения

Список литературы: 1. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых [автореф.] дисс. на соискание научн. степени докт. техн. наук. Днепропетровск: 2004. – 35 с. 2. Павлов П.И. Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки // [П.И. Павлов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко и др.] // Вестник НТУ «ХПИ». – 2007. – № 27. – С. 33 – 41. 3. Павлов П.И. Акустическое исследование измельчаемости гетерогенных материалов струйным способом // [Л.И. Павлов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, Н.С. Прыдако] // ЗЖК – 2008. – № 34(73). – С. 67 – 74. 4. А.с. 512602 СССР. А. периодический датчик для регистрации акустических сигналов: / В.Н. Бовенко, В.И. Палушич (СССР); Опубл. 30.08.76, Бюл. № 16. 5. Фролов Д.И. Связь между параметрами акустических сигналов и размерами разрывов сплошности при разрушении гетерогенных материалов / [Д.И. Фролов, Р.И. Кивышев, В.С. Курченко, С.В. Новосков] // Механика композитных материалов. – 1980. – № 5. – С. 907 – 911. 6. Статини С.А. Исследование временных параметров акустических сигналов при образовании трещин отрыва / С.А. Статини, П.Г. Таммлин // Прогноз землетрясений. – 1984. – № 4. – С. 31 – 45. 7. Горобец Л.Ж. Эксплуатация акустический мониторинг шламоструменного подрыва / Л.Ж. Горобец, Н.С. Прыдако, Г.О. Стрельников, Г.В. Верхова // Автоматизация производственных процессов в машиностроении та приладобудуванні. – 2006. – Вып. 40. – С. 69 – 74. 8. Павлов П.И. Мониторинг изменений технологических и режимных параметров в процессе струйного измельчения строительных материалов / [П.И. Павлов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прыдако и др.] // Применение дисперсных и ультра- (нано-) дисперсных порошковых систем в промышленной технологии: матер. науч.-техн. конф. – С.-Пб. 2008. – С. 112 – 127.

Поступила в редакцию 10.06.09

УДК 622.776

И.К. МЛАДЕЦКИЙ, докт. техн. наук, ДНГУ, г. Днепропетровск,
Ю.С. МОСТЫКА, докт. техн. наук, ДНГУ, г. Днепропетровск

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБОГАТИМОСТИ ВКРАПЛЕННОЙ РУДЫ ПРИ ЕЕ ОБОГАЩЕНИИ

На основе текстурно-структурных признаков валунной руды и показателя совершенства обогащающей технологии найдено требуемое значение крупности помола руды с целью достижения требуемых показателей качества концентрата.

On the basis of texture and structural signs of iron-stone and index of perfection of concentrating technology the required function of distributing of conglomerates and required largeness of grade of ore is found for achievement of the required indexes of enriching.

Проектирование обогащающих технологий для глубокого обогащения вкрапленных полезных ископаемых первую очередь требует определения количества стадий измельчения. Для этого необходима оценка начального и

конечного значений крупности частиц руды. Начальным значением крупности частиц для глубокого обогащения является крупность частиц мелкого дробления и его оценка не вызывает значительных трудностей. Конечное значение средней крупности помола связывают с требуемым значением качества концентрата. Поэтому для этого первоначально ориентируются на среднюю крупность вкрапления ценного минерала, а затем экспериментальными исследованиями по обогатимости полезного ископаемого оценивают окончательное значение средней крупности помола.

Для использования компьютерных технологий по исследованию обогатимости руды необходимы функциональные зависимости между требуемой конечной крупностью помола и параметрами руды, поступающей на обогащение.

Данная работа посвящена поиску упомянутой зависимости и решается при условии, что качество концентрата является заданной величиной β_K , а на потери ценного компонента в хвостах наложено ограничение, требуется, чтобы потери ценного компонента в хвостах были бы не более допустимого значения $\alpha_K < \alpha_{K\text{доп}}$. Известной величиной является также средняя крупность вкрапления ценного минерала d_{0K} и содержание ценного компонента в исходной руде α_H . Поиск зависимости будем вести на примере усредненных показателей железных руд Криворожского железорудного бассейна.

В работе [1] предложена формула, позволяющая в некоторой степени прогнозировать качество концентрата β , если известно содержание ценного минерала в исходной руде α_H , показатель раскрытия R и показатель совершенства технологии разделения K

$$\beta_K = \alpha_H + RK(1 - \alpha_H). \quad (1)$$

Коэффициенты K и R зависят от технологии переработки полезного ископаемого и совместно определяют трудность обогащения полезного ископаемого. Коэффициент K определяет совершенство разделения, поэтому связан с видом сепарационных характеристик аппаратов, применяемых в технологии. Определим значения показателей, характеризующих технологию обогащения.

Показатель совершенства технологии разделения зависит от применяемых сепараторов и технологии их соединения. Экспериментально этот показатель может быть определен по результатам опробования технологических потоков.