

П.И. ПИЛОВ, Л.Ж. ГОРОБЕЦ, д-ра техн. наук
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),

Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук
(Украина, Днепропетровск, Институт технической механики НАН и НКА Украины),

Б.Ф. БЕВЗЕНКО, канд. техн. наук
(Украина, Владимировка, ОАО "Великоанадольский огнеупорный комбинат"),

В.П. КРАСНОПЕР
(Украина, Вольногорск, Вольногорский горно-металлургический комбинат)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Постановка проблемы. На основе экспериментальной апробации акустического мониторинга промышленной газоструйной мельницы [1, 2] сделан вывод о перспективности установления и поддержания максимальной эффективности струйного процесса путем компьютерной обработки акустической информации о состоянии загрузки струй и качестве (дисперсности) получаемого продукта с последующим регулированием загрузки измельчаемого материала.

Целью данной работы является установление основных связей технологических показателей струйной мельницы с акустическими параметрами зоны измельчения и их использование для оптимизации процесса.

При проведении акустического мониторинга струйной измельчительной установки решались следующие задачи:

- контроль количества и качества получаемого продукта с помощью активности акустического излучения рабочей зоны мельницы и значений амплитуд АС;
- установление значений акустических параметров в оптимальном процессе измельчения;
- разработка критериев оптимизации процесса на основе обработки акустических параметров.

На рис. 1 показана схема акустического мониторинга струйной измельчительной установки, включающая два блока: аппаратура, необходимая для регистрации сигналов, и комплекс аппаратуры и программ для анализа получаемой информации.

Основные результаты исследований. Струйному измельчению в противоточной мельнице УСИ-20 (производительность – 2...30 кг/ч) подвергали цирконовый концентрат Вольногорского горно-металлургического комбината, доменный шлак Мариупольского металлургического комбината, шамот Великоанадольского огнеупорного завода, кварцевый песок, известняк, газовый и бурый уголь месторождений Украины. Исходная крупность материалов – менее 2,5 мм. Дисперсность измельченных материалов изменяли путем регулирования частоты n вращения ротора классификатора типа КОВ, входящего в систему струйной измельчительной установки. Определение дисперсности готового

Підготовчі процеси збагачення

продукта проведено путем определения величины S_{y0} удельной поверхности и содержания β_{-10} (β_{-5}) наиболее тонких (менее 10 или 5 мкм) фракций на приборах Т-3 В.В. Товарова и фирмы "MALVERN" [3].

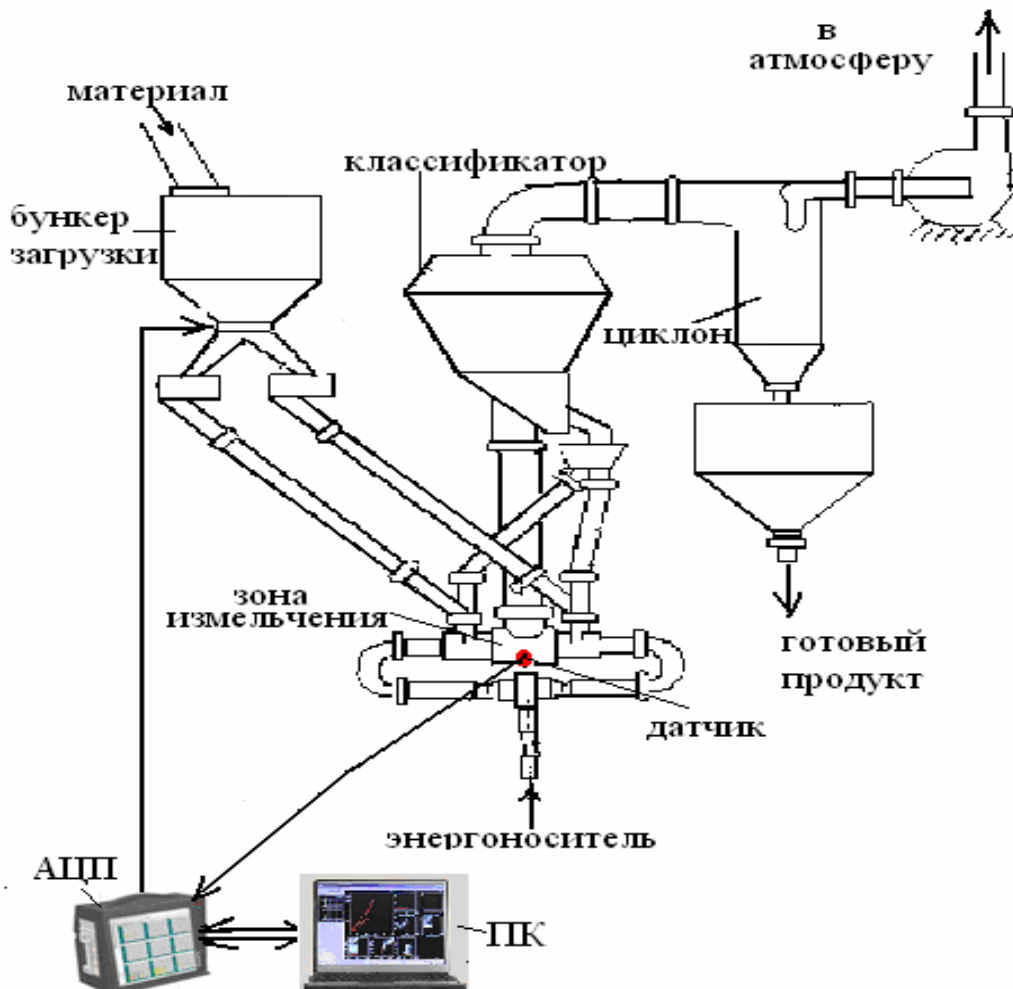


Рис. 1. Схема акустического мониторинга струйной измельчительной установки

Одной из основных задач исследования было изучение изменений гранулометрии тонких фракций и дисперсности измельченного порошка в различных режимах работы классификатора в диапазоне $n = 200 \dots 2000 \text{ мин}^{-1}$.

Было установлено, что с увеличением n от 200 до 2000 мин^{-1} происходит перемещение максимумов характеристик в область размеров более тонких частиц: от $70 \dots 20$ до $20 \dots 8 \text{ мкм}$. В идентичных режимах классификации (например, при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$) по изменениям величин S_{y0} и β_{-10} можно установить большую склонность к диспергированию (S_{y0} выше на 10%) шлака по сравнению с шамотом [3].

На рис. 2 показано влияние режима классификации на величину S_{y0} удельной поверхности ряда измельченных материалов: шамота, известняка, шлака, песка, угля, циркона. При росте частоты вращения ротора в диапазоне

Підготовчі процеси збагачення

$n = 200 \dots 2600 \text{ мин}^{-1}$ удельная поверхность $S_{y\partial}$ порошков возрастает примерно на порядок: от 2000 до 19000 $\text{см}^2/\text{г}$.

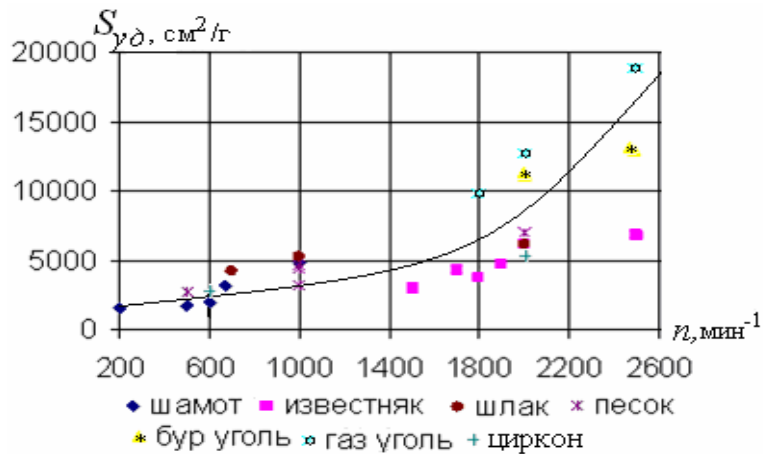


Рис. 2. Влияние режима классификации на величину удельной поверхности измельченных материалов в условиях УСИ-20

Установлена связь удельной поверхности $S_{y\partial}$ различных видов измельченных материалов (циркон, шлак, шамот, кварцевый песок) с содержанием в них β_{-10} и β_{-5} наиболее тонких фракций – менее 10 мкм и менее 5 мкм. Несмотря на различия свойств измельчаемых материалов, параметры связи $S_{y\partial} = f(\beta_{-10}, \beta_{-5})$ соблюдают практически линейный характер [4].

Перейдем к оценке акустических исследований процесса струйного измельчения. Акустические сигналы измерялись в зоне помола с помощью широкополосного аperiодического датчика, смонтированного на торце латунного волновода. Другой конец волновода размещался внутри помольной камеры мельницы. Датчик соединяли с аналого-цифровым преобразователем акустических сигналов и компьютером. Время регистрации акустических сигналов составляло 0,1 с, интервал измерения – 1 с.

Методика обработки АС состояла в следующем [5]. Из общего количества сигналов исключалось число АС фонового шума. При этом за уровень шума (уровень ограничения) принимали величину амплитуды $A = 0,002 \dots 0,005 \text{ В}$ (при частоте регистрации АС 400...200 кГц). При расчете амплитудных распределений учитывались сигналы с долевым участием более 0,01 % (более 10 имп).

В процессе акустического мониторинга устанавливались следующие зависимости:

- кинетика активности \dot{N} АЭ в рабочем режиме зоны измельчения;
- уровень максимальных (от 0,04 до единиц Вольта) значений A_{\max} амплитуд АС при максимальной (порядка 10^5 и выше) активности \dot{N} АЭ;
- доля $\dot{N}(A_{-40})$ счета акустических сигналов малой (менее 0,04 В) амплитуды на стадии завершения разгрузки струй;
- амплитудные распределения по величине АС – для контроля границы перехода рабочего режима в стадию разгрузки струй.

Підготовчі процеси збагачення

Анализ акустической информации о процессе струйного измельчения проводились по следующим направлениям:

1) выявление изменений амплитудных распределений АС при получении продуктов различной дисперсности ($S_{y\delta}$) и характерный для $S_{y\delta}$ уровень амплитуд (минимальные, максимальные, преобладающие значения);

2) оценка связей параметра $S_{y\delta}$ дисперсности порошка с долевым участием амплитуд характерного уровня.

Проведенные исследования позволили выявить следующие закономерности акустического мониторинга зоны помола струйной мельницы.

1. Количество актов соударений частиц (взаимных или с волноводом) контролируется суммарным счетом и активностью \dot{N} АЭ (\dot{N} – число АС в единицу времени τ).

2. Основной характеристикой эффективности измельчения является кинетика активности и амплитуды АС. Постоянство уровня высокой активности \dot{N} АС в зоне помола – (порядка $\lg \dot{N} = 5,2 \dots 5,4$ – для исследованных материалов) характеризует условие достижения максимальной эффективности струйного измельчения.

3. Смена режима загрузки струй (начало подачи материала, рабочий режим измельчения, разгрузка струй) приводит к различной насыщенности частиц в струе. Концентрация и размер частиц в струе в процессе измельчения также могут изменяться, в результате чего варьируют условия и эффекты разрушения частиц при ударах или динамичном истирании. С увеличением количества частиц в струе выше оптимальной концентрации уменьшается их скорость разгона в инжекторе и скорость встречных ударов частиц, что обуславливает снижение эффективности струйного измельчения.

3. Изменение размеров частиц в процессе измельчения сопровождается изменением значений амплитуд акустических сигналов при соударениях частиц с волноводом в рабочей зоне мельницы [6]. Максимальные значения амплитуд АС на стадии завершения разгрузки струй, коррелируют с параметром дисперсности $S_{y\delta}$ измельченного продукта.

4. Признаком возрастающего эффекта диспергирования при прочих равных условиях является увеличение доли малоамплитудных (менее 0,01...0,04 В при частоте регистрации 400...200 кГц) АС в измеряемом счете АС.

На рис. 3 иллюстрируется тенденция изменения максимальной величины A_{max} амплитуд АС с дисперсностью $S_{y\delta}$ измельченного продукта. При этом измерение амплитуд проводилась на стадии разгрузки струй, когда процесс измельчения близок к завершению, а размеры частиц в струе соизмеримы с частицами готового продукта. Уменьшение амплитуд A_{max} (от 1,6 до 0,1 В) указывает на рост дисперсности измельченных порошков $S_{y\delta}$ от 1000 до 19000 см²/г.

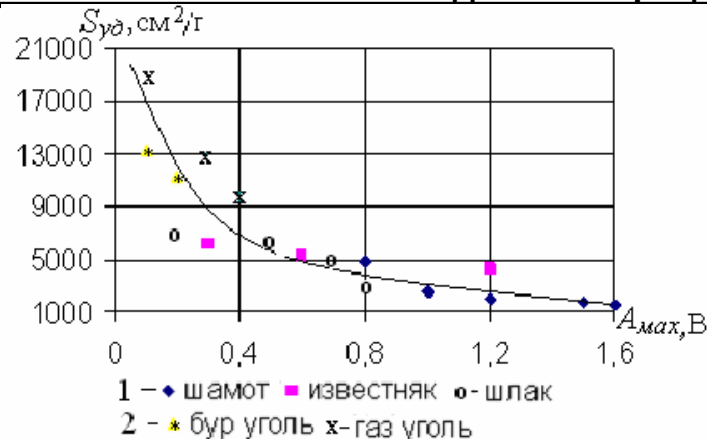


Рис. 3. Изменения максимальных значений A_{max} амплитуд АС с повышением дисперсности S_{yd} измельчаемых частиц (стадия разгрузки струй)

Для акустической диагностики изменений параметра дисперсности S_{yd} продукта представляет интерес закономерность, характеризующая увеличение доли $\dot{N}(A_{40})$ малоамплитудных сигналов (менее 40 мВ) в распределениях амплитуд при переходе к высокой дисперсности порошка: рост S_{yd} от ~ 2000 до ~ 19000 см²/г приводит к увеличению $\dot{N}(A_{40})$ от 75 до 94%.

Эффективность струйного измельчения предлагается оценивать коэффициентом $K_{\varepsilon} = G/lg \dot{N}$ (г/имп), характеризующего отношение производительности G мельницы к соответствующей активности (в виде логарифма) \dot{N} АЭ в зоне помола (рис. 4). В рабочих режимах струйной мельницы ($G = 1,6 \dots 5,5$ г/с) величина K_{ε} изменяется в пределах 0,3 – 1,5. Полагаем, что изменение G для одного и того же материала обусловлено отклонением от оптимального уровня насыщенности струй твердой фазой.

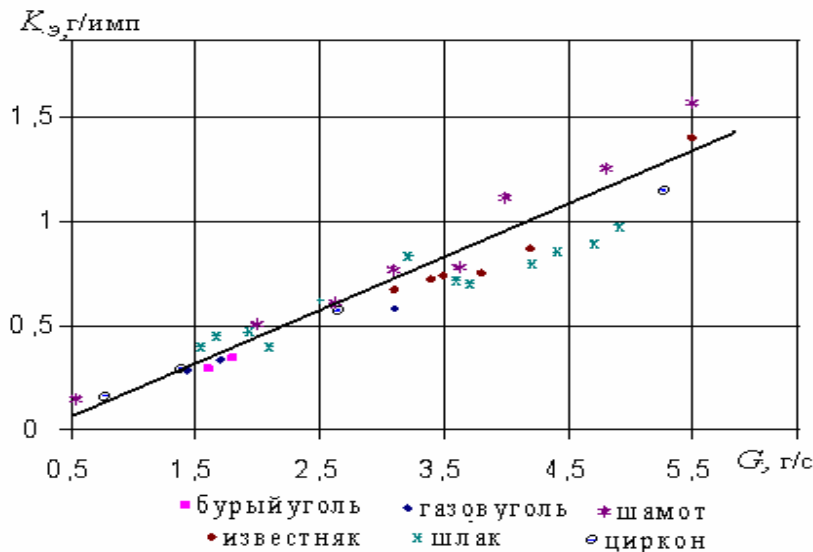


Рис. 4. Зависимость коэффициента эффективности K_{ε} струйного измельчения от производительности G мельницы УСИ-20

Підготовчі процеси збагачення

На рис. 5 ілюструється кінетика технологічних і акустических параметрів струйної мельниці УСИ-20 при измельченні цирконового концентрата до тонкого (63 мкм, $S_{y0} = 1857 \text{ см}^2/\text{г}$; $n = 600 \text{ мин}^{-1}$) і сверхтонкого (45 мкм, $S_{y0} = 2732 \text{ см}^2/\text{г}$; $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$) продукта. На рис. 6 показані результати аналогічного акустического спостереження для шамота: $n = 600 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,3 \text{ МПа}$.

Показані на рис. 5,6 значення кратності $K_{\text{ц}}$ циркуляції матеріала (величини циркулюючої навантаження) в системі мельниці розраховані з використанням співвідношення счота АС в началі завантаження $N_{\text{загр}}$ і в конкретний дослідюваний момент N : $K_{\text{ц}} \approx N/N_{\text{загр}}$.

Аналіз графіків кінетики $N/N_{\text{загр}}$ і G дозволяє зробити висновок про те, що максимальна продуктивність мельниці забезпечується в умовах наближення величини акустического показателя $K_{\text{ц}} \approx N/N_{\text{загр}}$ циркуляції матеріала до одиниці. В стані розвантаження струї величина $N/N_{\text{загр}}$ стає значно менше 1, а в режимах далеко не оптимальних за вмістом твердої фази в струї $N/N_{\text{загр}}$ становить порядку 2 – 4.

Слід відзначити установлені відмінності кінетики процесу струйного измельчення при зменшенні розміру частиць измельченого порошку:

- при підвищеній дисперсності стабілізується кінетика активності акустического випромінювання зони помолу в робочому режимі;
- зменшується величина текущої продуктивності мельниці: від 5 до 1,5 г/с при одночасному зменшенні середніх значень амплітуд АС;
- більша стабільність акустического параметра $K_{\text{ц}}$ спостерігається при більшій частоті n класифікатора, забезпечуючій підвищену дисперсність матеріала в струї.

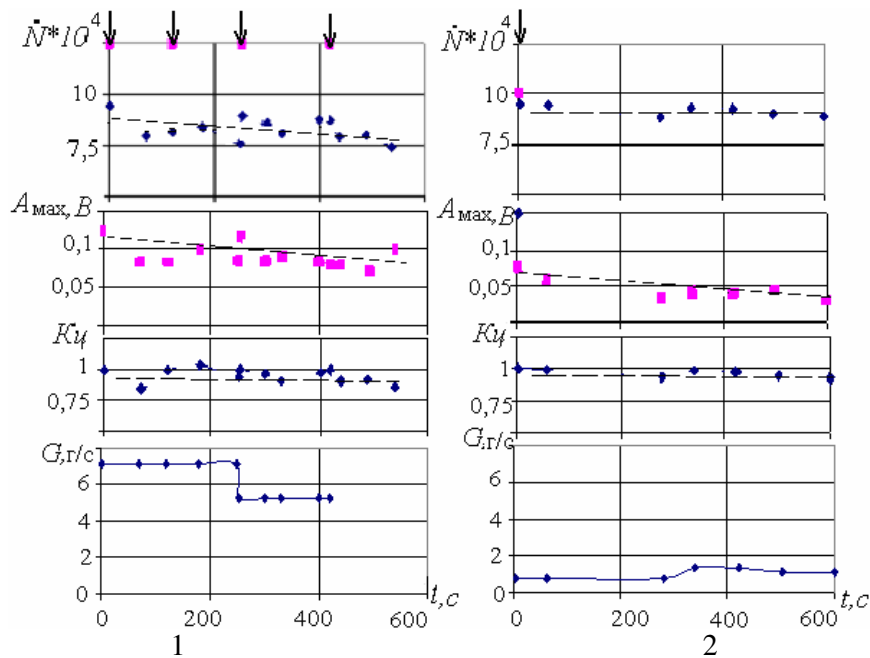


Рис. 5. Кінетика акустических і технологічних параметрів струйного измельчення цирконового концентрата в мельниці УСИ-20

в різних режимах класифікації:

1 – $n = 600 \text{ мин}^{-1}$, $S_{y0} = 2162 \text{ см}^2/\text{г}$; 2 – $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $S_{y0} = 5517 \text{ см}^2/\text{г}$

Підготовчі процеси збагачення

Таким образом, в аспекте вышеизложенных зависимостей эффективная работа струйной мельницы возможна на основе непрерывного акустического мониторинга зоны помола, поиска и поддержания требуемого уровня акустических параметров, соответствующих максимальной эффективности процесса.

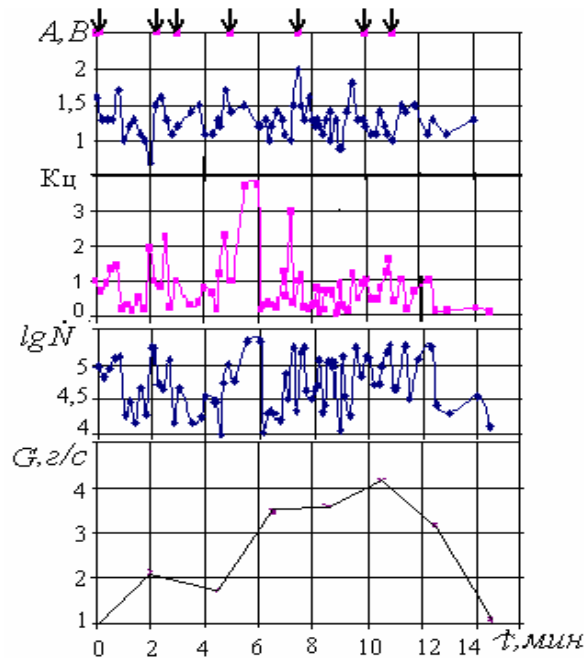


Рис. 6. Кинетика производительности G и параметров акустического "образа" струйного измельчения шамота: $N/N_{загр}$, $lg \dot{N}$, A

Список литературы

1. **Горобец Л.Ж.** Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореф. дис.... д-ра техн. наук / НГУ. – Д., 2004. – 35 с.
2. **Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Щербаков А.Е., Прядко Н.С., Верхоробина И.В.** Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки // Вестник нац. техн. ун-та "ХПИ". – Харьков, 2007. – Вип. № 27. – С. 33-41.
3. **Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Краснопер В.П., Цыбулько Л.А., Бакум П.А.** Характеристики дисперсности продуктов струйного измельчения. ЗКК, № 41-42, 2010, стр. 111-121.
4. **P.I. Pilov, L.ZH. Gorobets, N.S. Pryadko** Research of acoustic monitoring regularities in a jet grinding process // Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences, 2009, Vol. 54 (2009), No. 4, p. 841-848.
5. **Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Прядко Н.С.** Акустическое исследование измельчаемости гетерогенных материалов струйным способом. ЗКК, №34(75), 2008, С. 67-74.
6. **Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Шуляк И.А., Бевзенко Б.Ф.** О критериях акустического мониторинга струйного измельчения // Техническая механика.– 2009.-№3.– С. 116-121.

© Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Бевзенко Б.Ф., Краснопер В.П., 2011

Надійшла до редколегії 05.12.2011 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким