

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 НАНУ и НКАУ)

О МЕХАНИЗМЕ РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ СТРУЙНОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ

Постановка проблемы. Опыт измельчения указывает на целесообразность применения струйных измельчительных установок для получения микропорошков с размерами частиц менее 10-5 мкм и удельной поверхностью порядка $S_{уд}=0,6-3 \text{ м}^2/\text{г}$ [1, 2]. В этой области дисперсности крайне важно применять систему мониторинга технологии измельчения, позволяющую поддерживать режимные параметры на оптимальном уровне, обеспечивающем минимум удельных энергозатрат.

Особенность измельчения частиц в противоточных струях состоит в способе воздействия струй на частицы. Струями энергоносителя (сжатого воздуха, перегретого пара или продуктов сгорания природного газа) частицы захватываются и выносятся через инжектируемое устройство в помольную камеру навстречу друг другу. При движениях на пути разгона частицы приобретают энергию от энергоносителя, подвергаются многочисленным ударам в помольной камере и, разрушаясь, производят эффекты диспергирования. В этих эффектах проявляются все детали механизма разрушения (ударами, истиранием), включая образование и развитие трещин.

В струйных мельницах реализуется два механизма измельчения: высокоскоростной удар и динамичное истирание, преобладающая роль которых изменяется на пути разгона частиц в инжекторе и разрушения в зоне помола. Для материалов повышенной твердости и прочности (циркон, искусственные алмазы, кварц, шамот, шлаки металлургического и химического производства) рекомендуют разрушение ударами с высокой скоростью (до 0,5-1,0 км/с) в противоточных струях. Мягкие и хрупкие материалы (мел, тальк, магнезит, известняк, уголь) нагружают динамичным истиранием в вихревых струях энергоносителя (нагретым или холодным воздухом).

Разрушение частиц сыпучего материала в струйных мельницах можно рассматривать как преобразование случайных микроповреждений частиц в некоторый регулярный процесс измельчения. Одним из наиболее выраженных эффектов, характеризующих микроповреждения и степень диспергирования материала, является акустическая эмиссия (АЭ), обусловленная излучением упругих волн в результате динамической перестройки структуры вещества при его нагружении [3, 4]. При этом соответствующая аппаратура фиксирует акустические сигналы.

Сложность расшифровки акустических сигналов в процессе измельчения заключается в том, что одному и тому же напряженно-деформированному со-

стоянию измельчаемого материала соответствует статистическое распределение акустических параметров повреждаемости и диспергирования материала.

По современным физическим представлениям диспергирование – это процесс разделения деформируемого твердого тела на изолированные отдельности в активных локальных зонах вблизи дефектов структуры по достижении критического (предельного) состояния вещества на неустойчивой авторезонансной стадии предразрушения под действием акустических волн, возникающих при автоколебательном движении атомов в этих зонах [5].

Метод акустической эмиссии, как средство акустического мониторинга, может служить основой идентификации вида разрушения частиц при измельчении [6, 7].

В связи с этим актуальной задачей является идентификация акустических сигналов различных видов разрушения в процессе акустического мониторинга струйного измельчения.

Цель данной работы – исследовать возможности распознавания, классификации и применения акустических параметров для оптимизации процесса струйного измельчения.

В зоне струйного измельчения частицы разрушаются до необходимых размеров полностью или частично, затем удаляются в классификатор и после классификации осаждаются в циклоне готового продукта. Некондиционные по крупности фракции поступают из классификатора на повторное измельчение.

В работах [7, 8] были установлены некоторые важные информативные параметры в акустическом мониторинге процесса струйного измельчения. Перечислим основные закономерности этого вида наблюдения и соответствующие выводы.

1. Счет импульсов АЭ за весь период мониторинга отражает степень измельчения для преобладающего вида (удар, истирание) разрушения. Счет АС на отдельных стадиях струйного измельчения характеризует состояние струй по содержанию твердой фазы. Для удобства обработки массива акустических данных анализируются небольшие временные участки. Необходимо иметь в виду, что в этих случаях кратковременной регистрации АС существует вероятность пропустить какую-то существенную особенность процесса в момент записи файла данных. Поэтому выбор интервал наблюдения для анализа АС должен быть обоснован для конкретного материала и степени загрузки струй.

2. Распределение сигналов АЭ по амплитуде относится к наиболее изученной характеристике акустического мониторинга измельчения. Установлено, что величина амплитуды АС при ударах частиц о волновод изменяется в зависимости от их преимущественного размера. На рис. 1 показана связь между амплитудой акустического сигнала и размером частиц в процессах измельчения и разрушения (сжатием, разрывом) различных гетерогенных материалов (шамот, кварцевый песок, диабаз, шлак, пористое стекло) [4, 5, 7, 9].

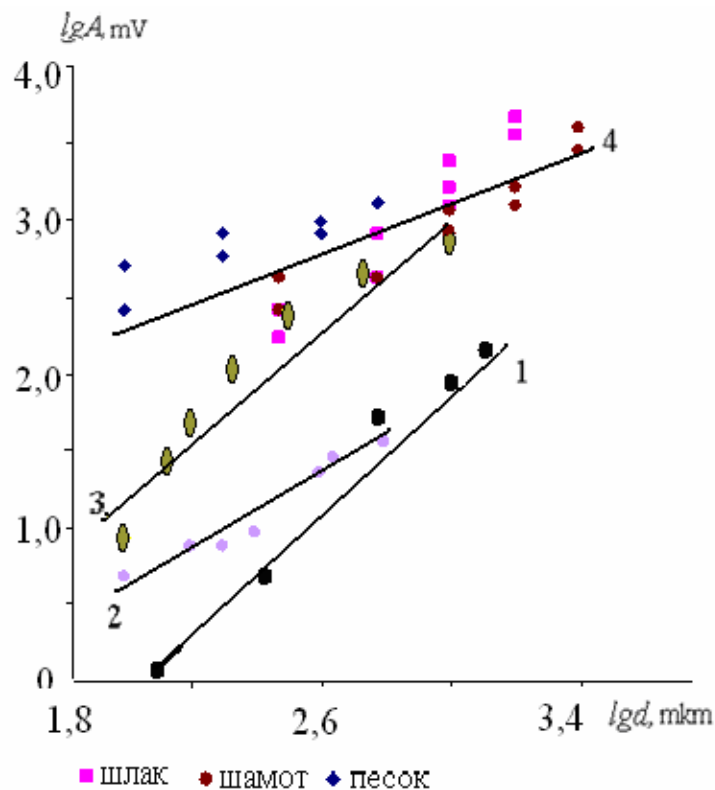


Рис. 1. Связь между амплитудой АС и размером частиц в процессах измельчения (4) и разрушения (1-3) различными способами:
 1 – разрушение сжатием зерен диабаза (0,1-2 мм) [4];
 2 – разрывы стеклянных волокон (0,1-2 мм) [4];
 3 – разрушение сжатием перемычек между порами в пористом стекле (0,1-1 мм) [4];
 4 – струйное измельчение частиц шамота (•), шлака (■), кварцевого песка (◆) (0,04-1,1 мм)

Следует отметить, что изменения технологического процесса (стадиальности) струйного измельчения, например, подача в струю материала, его вынос из системы, изменения крупности и динамичности разрушения частиц, их измельчаемости и содержания твердой фазы в струе, сопровождаются трансформацией амплитудных распределений акустических сигналов в зоне помола. Так, в состоянии разгрузки струй величина характерной (преимущественной) амплитуды может достигать наименьшего уровня по сравнению с другими режимами (загрузка, рабочий режим, разгрузка). Экспериментально показано также, что с увеличением начального давления энергоносителя в диапазоне $P = 0,25-0,4$ МПа наблюдается рост амплитуд АС, излучаемых зоной измельчения [10].

3. Активность \dot{N} АЭ (отношение числа импульсов АЭ к интервалу времени наблюдения) в рабочей зоне измельчения является фактором роста числа ударов частиц и, следовательно, интенсификации измельчения и увеличения производительности мельницы.

4. Критерием оценки соответствия процесса оптимальным условиям измельчения может служить условный коэффициент эффективности разрушения $K_3 = G / \lg \dot{N}$ (г/имп), характеризующий отношение производительности G мель-

ниці к соответствующей активности (в виде логарифма) \dot{N} АЭ в зоне помола. В рабочих режимах струйной мельницы при $G = 1,6 - 5,5$ г/с величина K_3 изменяется в пределах 0,3-1,5. Изменение G для одного и того же материала можно объяснить отклонением от оптимального уровня насыщенности струй твердой фазой.

Основу акустического мониторинга работы струйной мельницы составляет закономерность $\dot{N} = f(G, S_{yd}, K_3)$ изменения акустической активности \dot{N} в зависимости от технологических показателей количества и качества измельченного продукта.

Основные результаты исследований включают изучение комплекса акустических параметров и критериев, характеризующих режимы и показатели измельчения. Применение акустического мониторинга позволило установить взаимосвязь производительности G (г/с) мельницы, параметров дисперсности (S_{yd} , β_{-10} , β_{-5}), акустической активности \dot{N} (имп/с) зоны помола, амплитудных распределений АС и акустического показателя K_3 (г/имп) эффективности измельчения.

Струйное измельчение проводилось в противоточной установке лабораторного типоразмера производительностью 2-30 кг/ч, энергоносителем служил сжатый воздух среднего давления. Производительность мельницы рассчитывалась на основе взвешивания готового продукта, осажденного в циклоне. Масса порций загружаемого материала крупностью менее 2,5 мм составляла $m=1$ кг, интервал их загрузки – 3-8 мин, длительность измельчения – 15-30 мин.

Струйному измельчению подвергали материалы исходной крупностью менее 2,5 мм: доменный отвальный шлак Мариупольского металлургического комбината им. Ильича, шамот Великоанадольского огнеупорного завода, известняк, газовый и бурый уголь месторождений Украины.

Изменение крупности измельченных материалов проводилось путем регулирования режима работы (частоты n вращения ротора) классификатора типа КОВ, входящего в систему струйной измельчительной установки. Определение дисперсности готового продукта проведено путем измерения величины S_{yd} 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".

Акустическая активность измельчения измерялась с применением специального пьезодатчика, соединенного с латунным волноводом, установленным внутри помольной камеры мельницы. Датчик АС сигналов, разработанный в МГТУ им. Баумана [6], был соединен с аналогово-цифровым преобразователем и компьютером.

Методика обработки опытных данных акустического мониторинга состояла в следующем. На различных стадиях заполнения помольной камеры материалом измерялось общее число N_{Σ} акустических сигналов различных амплитуд (период измерения АС – $\tau=1$ с, период регистрации – 0,1 с). Далее определялось число N_x сигналов, характеризующих режим истечения струй без подачи материала в мельницу (фоновый шум, режим "холостого" хода, амплитуда АС –

Підготовчі процеси збагачення

менее 0,05-0,1В). Разница ($N_{\Sigma} - N_x$) характеризует искомое число АС для исследуемого режима загрузки и производительности мельницы.

Полагаем, что величина активности \dot{N} (имп/с) акустического излучения пропорциональна реальному числу ударов частиц о волновод, поскольку из общего счета АС в расчетах исключается фоновый шум струй энергоносителя: $\dot{N} = (N_{\Sigma} - N_x) / \tau$. При различных режимах работы струйной мельницы, отличающихся степенью загрузки струй твердой фазой, устанавливались амплитуды акустических сигналов (АС) в зоне помола.

При исследованиях решались следующие задачи:

- 1) сравнительный анализ кинетики акустических и технологических параметров струйного измельчения при получении тонких (S_{y0} – порядка долей $\text{м}^2/\text{г}$) и сверхтонких (S_{y0} – порядка единиц $\text{м}^2/\text{г}$) порошков;
- 2) изучение характера изменения технологических и акустических параметров в их взаимосвязи;
- 3) обоснование информативных акустических и технологических параметров, характеризующих преимущественный вид механизма разрушения (удар, истирание) в процессе струйного измельчения;
- 4) разработка принципиальной информационной системы для оптимизации процесса струйного измельчения на основе акустического мониторинга.

Ранее было установлено [11], что преимущественное действие того или другого механизма измельчения (ударами, истиранием) проявляется трансформацией гранулометрической частной характеристики измельченного продукта с образованием ряда максимумов в различной области размеров частиц.

Полагаем, что наблюдаемые максимумы с повышенным содержанием тонких фракций характеризуют механизм абразивного износа (истирания) поверхности измельчаемых частиц. Этот вывод подтверждается более овализованной или округлой формой частиц на примерах искусственных алмазных порошков, циркона и диоксида циркония [11].

В данной работе повышенное содержание тонких фракций в измельченном продукте оценивалось уровнем значений амплитуд АС на примерах тонкого измельчения шамота и сверхтонкого – угля.

На рис. 2 сопоставляется кинетика максимальных значений $A_{\text{макс}}$ амплитуд АС для этих материалов.

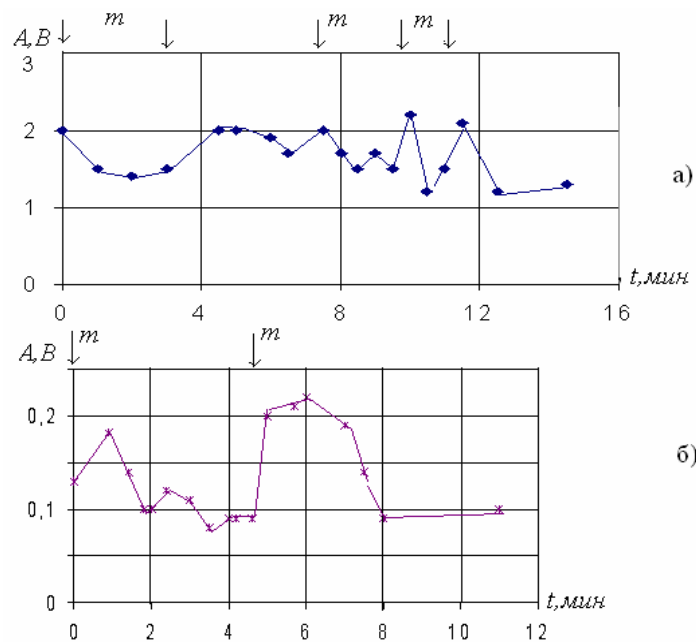


Рис. 2. Кинетика максимальных значений амплитуд A_{\max} АС при тонком (а) и сверхтонком измельчении (б) шамота (а) и угля (б)

Стрелками показаны моменты подачи исходных порций материала. Режим классификации обеспечивался соответственно: для шамота $n = 700 \text{ мин}^{-1}$, для угля – $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$. Видно, что несмотря на симбатный характер сравниваемых графиков порядок максимальных величин A_{\max} амплитуд значительно разнится: для сверхтонких частиц угля ($S_{y\partial} = 1 - 1,3 \text{ м}^2/\text{г}$) – это десятые доли Вольта, для шамота ($S_{y\partial} = 0,2 - 0,5 \text{ м}^2/\text{г}$) – единицы Вольта.

Таким образом, принципиально возможно проводить акустическую диагностику механизма измельчения (удар, истирание) по порядку максимальных значений амплитуд АС в рабочем режиме струйного измельчения, в частности, через 1-2 минуты после загрузки порции материала.

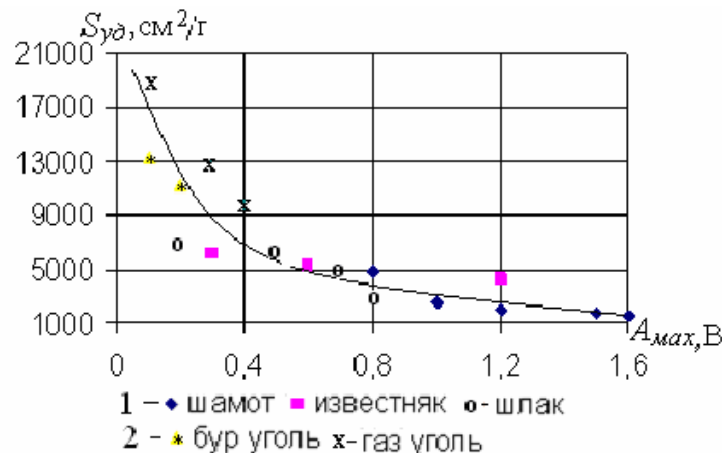


Рис. 3. Изменение максимальных значений A_{\max} амплитуд АС с повышением дисперсности $S_{y\partial}$ измельчаемого материала (стадия разгрузки струй)

Підготовчі процеси збагачення

На стадії разгрузки струй параметр A_{\max} дозволяє прогнозувати рівень дисперсності получаемого продукту, що підтверджується залежністю, показаною на рис. 2 для різних видів матеріалів. Покращення дисперсності змельчаємих частиц в діапазоні $S_{y\delta} = 0,1-2,1 \text{ м}^2/\text{г}$ характеризується зменшенням значень амплитуд A_{\max} для стадії разгрузки струй. Доля АС з A_{\max} складала 10...15%.

На рис. 4 сопоставлена кинетика активності акустических сигналів \dot{N} .

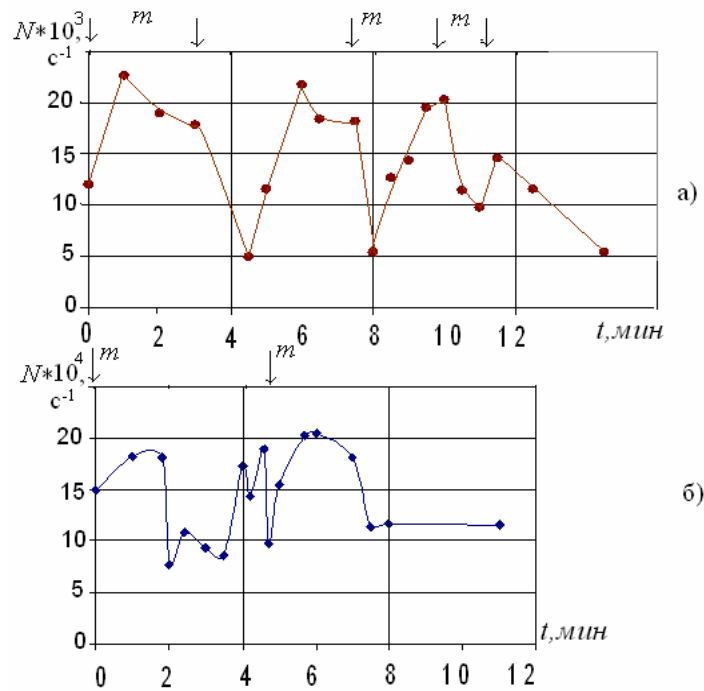


Рис. 4. Кинетика активності \dot{N} АС при тонком (а) и сверхтонком змельченні (б) шамота (а) и угля (б)

Из графика следует, что процесс получения порошков повышенной дисперсности сопровождается ростом акустической активности зоны помола в рабочем режиме змельчения: \dot{N} для угля составляет $(1,8 - 2) \cdot 10^5 \text{ (с}^{-1}\text{)}$, для шамота – $(1,8 - 2,3) \cdot 10^4 \text{ (с}^{-1}\text{)}$. Это означает, что переход от тонкого к сверхтонкому змельчению (т.е. от ударного механизма змельчения к истиранию) сопровождается повышением активности АС примерно на порядок.

На рис. 5 дано схематическое изображение поведения наиболее информативных акустических ($\dot{N} = N/\tau$, N , $N_{\text{загр}}$, A_{\max}) и технологических параметров струйного змельчения, таких как производительность мельницы, дисперсность продукта и критерии: коэффициенты K_3 ($G/\text{лг } \dot{N}$, г/имп) эффективности и циркуляции K_4 ($\approx N/N_{\text{загр}}$) материала.

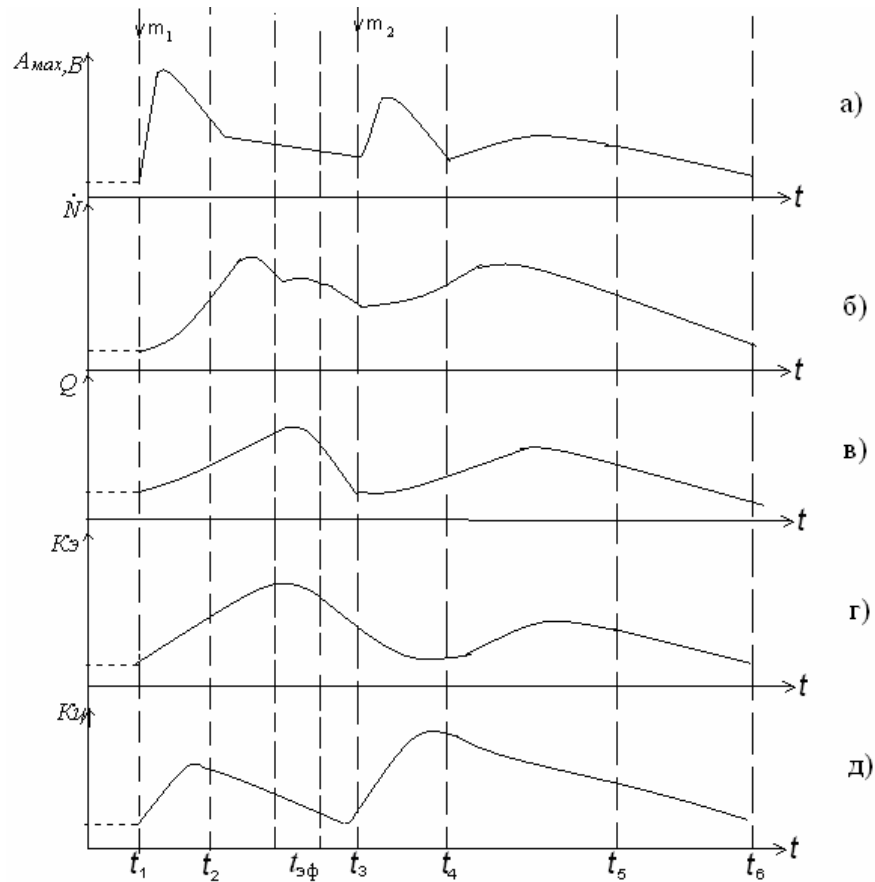


Рис. 5. Схематическое изображение информативных акустических и технологических параметров процесса струйного измельчения

Процесс рассматривался при постоянных параметрах энергоносителя ($P=0,3$ МПа) и режима классификации ($n=600$ мин⁻¹). Режимы, характеризующие различные состояния загрузки струй материалом обозначены следующими интервалами: $t_1 t_2$ – загрузка материала массой m_1 и выход на рабочий режим измельчения; $t_2 t_3$ – оптимальный режим измельчения с наилучшей производительностью (в период $t_{3ф}$); $t_3 t_4$ – загрузка материала массой $m_2 > m_1$ с некоторой перегрузкой струй; $t_4 t_5$ – рабочий режим; $t_5 t_6$ – разгрузка струй.

Из рисунка видно, что максимальное значение A_{max} амплитуды и активности \dot{N} АС после загрузки возрастают. При этом A_{max} достигает наибольшего значения до выхода на рабочий режим, практически сразу после загрузки струи материалом. Величина $\dot{N} = N/\tau$, достигает максимального уровня только в рабочем режиме измельчения с максимальной производительностью (рис. 5 б, в).

Коэффициенты K_z и K_y (рис. 5 г, д) отражают разные аспекты (эффективность и кратность циркуляции) процесса измельчения. Эффективность струйного измельчения оценивалась условным коэффициентом $K_z = G/\lg \dot{N}$ (г/имп), характеризующим соотношение производительности G мельницы и акустической активности (в виде логарифма) АЭ зоны помола. Эксперименты показали, что величина K_z должна быть больше 0,4 для исключения неэффективной рабо-

Підготовчі процеси збагачення

ты мельницы. В оптимальном режиме измельчения показатель K_3 достигает 0,8-0,9 (для шамота, см. рис. 5 в, г).

Важным технологическим параметром работы струйной мельницы является также кратность циркуляции материала в системе, оцениваемая по соотношению текущего счета N_{AC} к начальному $N_{загр}$ в момент загрузки: $K_4 \approx N/N_{загр}$. Коэффициент циркуляции зависит от степени наполнения струй материалом. В условиях оптимальной работы мельницы этот коэффициент является величиной порядка единицы, тогда как в условиях переполнения струй составляет величину порядка 2-4, а при их чрезмерной разгрузке – меньше 1 (рис. 5 д).

Анализ графиков рис. 5 позволяет сделать следующие выводы:

- информативными показателями процесса струйного измельчения являются: производительность мельницы, акустическая активность и максимальная величина A_{max} амплитуды АС зоны помола;

- значения амплитуд и активности АС зависят от степени измельчаемости, плотности материала и преобладающего механизма разрушения частиц. В случае механизма разрушения частиц путем динамического истирания, а также при измельчении материалов с более легкой разрушаемостью и меньшей плотностью наблюдаются меньшие на порядок величины максимальной амплитуды и более высокие на порядок величины активности АС зоны помола.

- критериями приближения процесса измельчения к оптимальным условиям являются два показателя – коэффициент эффективности и циркуляции, которые характеризуют разные аспекты процесса измельчения: с одной стороны количество получаемого продукта, с другой стороны количество циркулирующей нагрузки. При этом для оптимального процесса измельчения величина эти две величины имеют прямо противоположный характер поведения: с уменьшением K_4 растет K_3 .

Результата проведенного исследования позволяют предложить информационную систему процесса струйного измельчения, показанную на рис. 6.

Информационная система включает следующие основные этапы анализа и использования информации, полученные мониторингом процесса измельчения:

- формирование базы данных о свойствах материалов (размер частиц, плотность вещества, грансостав измельчаемого материала, его прочность и измельчаемость), технологических характеристиках процесса (производительность, режим классификации, параметры энергоносителя, масса порций загрузки, требуемая дисперсность продукта) и акустических параметрах (счет сигналов, частота регистрации, максимальная величина A_{max} (доля – 10...15%), минимальная величина A_{min} (доля – более 90%), амплитудное распределение и активность \dot{N} АС);

- выбор режима измельчения с контролем загрузки и качеством получаемого продукта, выбор методики акустического мониторинга;
- проведение, расчеты и анализ результатов мониторинга;
- выдача рекомендаций по оптимизации процесса (дозагрузки материала, изменения режимов или остановки процесса).

Предлагаемая информационная система процесса рекомендуется для про-

Підготовчі процеси збагачення

верки в лабораторных и промышленных условиях струйного измельчения с целью отработки рекомендаций для оптимизации этого процесса.



Рис. 6. Информационная система процесса струйного измельчения на основе акустического мониторинга

Список литературы

1. **Горобец Л.Ж.** Микропорошки: технология и оборудование // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 1999. – Вип. 4(45). – С. 33-41.
2. **Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Верхоробина И.В.** Технологические возможности струйных измельчителей // ГИАБ. – 2007. – №3. – С. 359-367.
3. Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов / **В.С. Куксенко, Х.Ф. Махмудов, В.А. Мансуров и др.** // ФТПРПИ. – 2009. – №4. – С. 55-59.
4. Связь между параметрами акустических сигналов и размерами разрывов сплошности при разрушении гетерогенных материалов / **Д.И. Фролов, Р.Ш. Килькеев, В.С.Куксенко и др.** // Механика композитных материалов. – 1980. – № 5. – С. 907-911.
5. **Горобец Л.Ж.** Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореф. дис.... д-ра техн. наук / НГУ. – Д., 2004. – 35 с.
6. Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки / **П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко и др.** // Вестник Нац. техн. ун-та. – 2007. –

Збагачення корисних копалин, 2010. – Вип. 43(84)

Підготовчі процеси збагачення

Вип. № 27. – С. 33-41.

7. **P.I. Pilov, L.J. Gorobets, V.N. Bovenko, N.S. Pryadko** An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles// Науковий вісник НГУ. – 2008. – №6. – С. 23-26.

8. **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), №4. – P. 841-848.

9. **Пилов П.И., Горобец Л.Ж.** Анализ функционирования геотехнических систем с позиций закономерностей микроразрушения // Горный журнал. – 2009. – №5. – С. 29-34.

10. Акустические и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице / **П.И. Пилов, В.Н. Бовенко, Л.Ж. Горобец и др.** // Известия вузов. Горный журнал. – 2009. – № 4. – С. 115-121.

11. Характеристики дисперсности продуктов струйного измельчения / **Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, В.П. Краснопер и др.** // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 41(82)-42(83). – С. 111-121.

© Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., 2010

*Надійшла до редколегії 12.10.2010 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*