

П.И. ПИЛОВ, Л.Ж. ГОРОБЕЦ, д-ра техн. наук,

К.А. ЛЕВЧЕНКО, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),

Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Институт технической механики НАНУ и НКАУ)

ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Постановка проблемы. Повышенная энергоемкость процесса струйного измельчения при получении тонких порошков (с удельной поверхностью порядка 0,5-1,0 м²/г) обуславливает целесообразность установления и поддержания наиболее эффективного режима измельчения твердых сыпучих материалов.

Известные способы [1, 2] автоматической оптимизации процесса измельчения путем контроля температуры и разрежения по тракту струйной мельницы обладают значительной погрешностью и запаздыванием при оценке производительности и энергопотребления струйной мельницы.

В данной работе изучались принципы поддержания оптимальной работы струйной мельницы путем контроля акустического излучения зоны помола и управления загрузкой измельчаемого материала на основе применения информативных акустических параметров процесса измельчения.

Знание физических закономерностей диспергирования и накопленный опыт экспериментальных исследований работы струйных мельниц [3-5] позволяет использовать акустоэмиссионную информацию о зоне помола для разработки принципов оптимизации этого процесса. В число важных акустических параметров включена скорость счета \dot{N} акустических сигналов (АС) преимущественно малых амплитуд, поскольку экспериментально показано, что при накоплении таких сигналов ожидается повышенное количество тонких фракций микронных размеров в измельченном продукте. Проведенное исследование позволяет считать перспективным для контроля производительности струйной мельницы и оптимизации ее работы применить анализ текущих значений акустической активности и амплитуды АС с последующим расчетом акустических критериев энергонапряженности этого процесса.

Анализ исследований. Производительность струйной мельницы значительно изменяется в зависимости от степени загрузки струй материалом. Избыточное или недостаточное количество твердой фазы в струе приводит к отклонению от оптимального уровня ведущих параметров измельчения: скорости и частоты соударений частиц, что обуславливает уменьшение производительности мельницы при прочих равных условиях (параметры энергоносителя, режим работы классификатора и пневмотранспортной системы).

В работах [6, 7] предложены оценки степени оптимизации процесса измельчения с применением условного коэффициента $K_{\text{э}}$ (г/имп) эффективности измельчения. Последний определяется как отношение производительности

Збагачення корисних копалин, 2012. – Вип. 51(92)

Підготовчі процеси збагачення

мельницы Q к логарифму акустической активности зоны помола: $K_{\Sigma} = Q / \lg \dot{N}$.

На рис.1 показана схема принципиальных взаимосвязей акустических и технологических параметров струйного измельчения (A_{\max} – максимальное значение амплитуды АС, K_{Σ} – акустический коэффициент циркуляции материала, K_a – акустический критерий оптимизации процесса); при этом численные значения параметров приведены для технологии измельчения шлака, шамота и кварцевого песка.

Процесс рассматривался при постоянных параметрах энергоносителя (начальном давлении сжатого воздуха $P = 0,3$ МПа) и режима классификации (частоты вращения ротора классификатора $n=600$ мин⁻¹). Режимы, характеризующие различное состояние 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 со сравнительно высокой производительностью (в период $\tau_{\Sigma\Phi}$);
- (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.

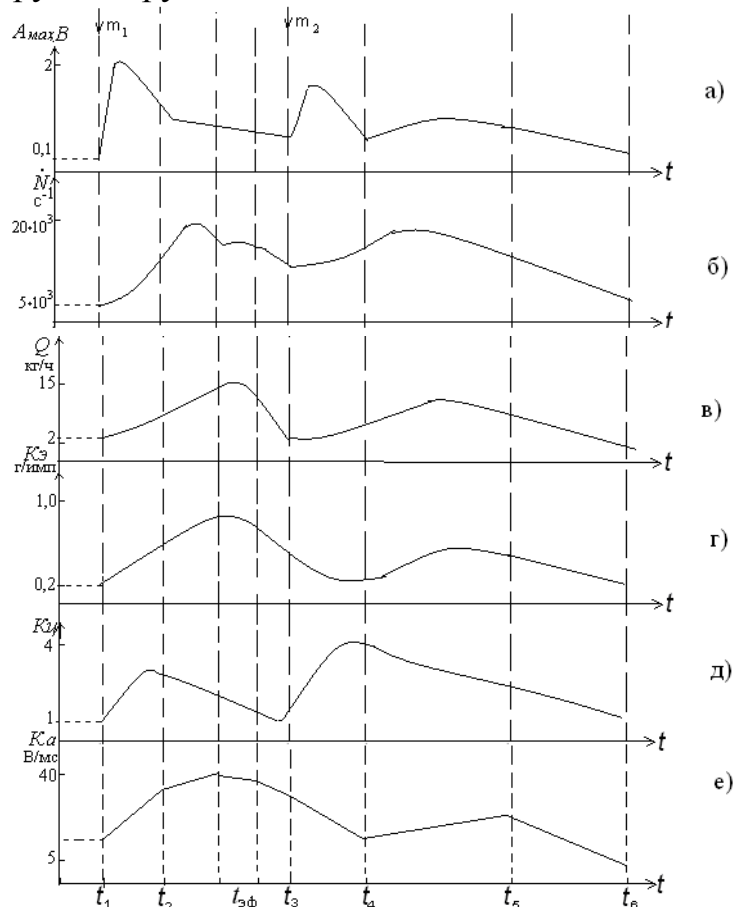


Рис. 1. Схема принципиальных взаимосвязей акустических и технологических параметров струйного измельчения на примерах шлака, шамота и кварцевого песка

Підготовчі процеси збагачення

Експерименти показали, что для исключения неэффективной работы мельницы величина K_{Σ} должна быть больше 0,4. В оптимальном режиме измельчения показатель K_{Σ} достигает (0,8-0,9) г/имп (для шамота см. рис. 1 в, г).

Важным технологическим параметром работы струйной мельницы является кратность циркуляции материала в системе, т.е. величина циркулирующей нагрузки мельницы. Полагаем, что соотношение $K_{\Sigma} \approx N/N_{загр}$ счета акустических сигналов в конкретный момент N и в начальный момент загрузки материала в струю $N_{загр}$ может характеризовать величину акустического коэффициента циркуляции. В условиях оптимальной работы мельницы этот коэффициент близок к единице; в условиях излишнего переполнения струй составляет величину в диапазоне 2-4, а при их чрезмерной разгрузке становится меньше 1 (рис. 1 д).

Постановка задачи. Целью данной работы является обоснование принципов оптимизации процесса струйного измельчения на основе акустического мониторинга работы струйной мельницы. Для этой цели проводится анализ связей технологических показателей работы лабораторной и промышленной мельниц с опытными данными акустического мониторинга зон помола сыпучих твердых материалов.

Изложение основного материала и результаты исследования

Экспериментальные исследования по установлению величины акустического критерия проведены при измельчении сыпучих материалов в лабораторной и промышленной струйной установках соответственно для типоразмеров УСИ-20 производительностью 20 кг/ч и УСИ-2000 – 2000 кг/ч.

Акустическую активность зоны помола измеряли с помощью датчика, соединенного с латунным волноводом, установленным внутри помольной камеры мельницы. Анализ акустических сигналов проводился по следующей методике. Рассматривались АС с величиной амплитуды более 20 мВ при частоте регистрации 400 кГц.

В связи с тем, что амплитуда АС при соударениях частиц с волноводом в зоне помола пропорциональна скорости удара, усиливающей эффект разрушения, полагаем, что акустические сигналы максимальной амплитуды характеризуют наиболее эффективные соударения частиц с максимальными эффектами измельчения. Другим важным фактором струйного измельчения является частота эффективных соударений частиц, характеризуемая акустической активностью.

Согласно принятой методике периодически, за выбранный интервал времени (порядка нескольких секунд или миллисекунд), вычислялись значения максимальной амплитуды A_{max} , общей \dot{N}_{Σ} и частной \dot{N}_{Amax} активности акустического излучения зоны помола, рассчитываемой соответственно по суммарному счету N_{Σ} АС и выборке числа АС с максимальной амплитудой за период τ . За максимальную величину амплитуды принималась амплитуда сигналов, число которых в общей сумме сигналов составляло величину $\dot{N}_{Amax} \geq m$ ($m = \dot{N}_{\Sigma} \cdot (5-7)\%$).

Акустический критерий K_a оптимальной работы мельницы определяем как

Підготовчі процеси збагачення

произведение величины максимальной амплитуды A_{max} на общую \dot{N}_{Σ} или частную \dot{N}_{Amax} величину акустической активности:

$$K_a(\dot{N}_{\Sigma}) = A_{max} \cdot \dot{N}_{\Sigma}; K_a(\dot{N}_{Amax}) = A_{max} \cdot \dot{N}_{Amax}. \quad (1)$$

С позиций физики разрушения предложенный критерий характеризует акустический эффект трансформации кинетической энергии ускоренных струями частиц в акустическую энергию трещинообразования при разрушении частиц ударами и, таким образом, величина предложенного критерия (В/с) теоретически пропорциональна энергонапряженности разрушения частиц в процессе струйного измельчения.

По результатам исследований струйного измельчения ряда сыпучих материалов (кварцевый песок, шлак, шамот, циркон, уголь) установлены следующие границы (допустимые и недопустимые с позиций оптимальности процесса) изменения K_a за один технологический цикл измельчения (загрузка одной порции, измельчение, разгрузка струи, выгрузка продукта). Оптимальная величина K_a соответствует диапазону $(19-35) \cdot 10^3$ В/с, допустимая $K_a^{don} = (10-17) \cdot 10^3$ В/с и недопустимая $K_a^{nedon} = (2-6) \cdot 10^3$ В/с. Для недопустимого, т.е. крайне неэффективного режима измельчения, величина критерия K_a практически одинакова при близкой дисперсности измельченных продуктов: $K_a = (2-3) \cdot 10^3$ при $S_{y\partial} = 0,59-0,61$ м²/г.

Исследование показало, что рекомендуемый уровень значений K_a находится в зависимости от требуемой дисперсности (удельной поверхности $S_{y\partial}$) готового продукта:

- при $S_{y\partial} = 0,6-0,7$ м²/г (песок, шамот, шлак) $K_a = (23-35) \cdot 10^3$ В/с;
- при $S_{y\partial}$ до $0,98$ м²/г (газовый уголь) $K_a = (12-15) \cdot 10^3$ В/с.

Проведенные испытания и расчеты показали, что величина критерия оптимальности струйного измельчения изменяется в зависимости от свойств исходного материала (плотности, размера частиц) и его измельчаемости, а также дисперсности $S_{y\partial}$ (удельной поверхности) измельченного продукта.

Например, повышение плотности материала приводит к некоторому снижению производительности мельницы. Величина критерия оптимальности также уменьшается при измельчении материалов повышенной плотности, что можно наблюдать при сравнении циркона и кварцевого песка: для циркона $K_a = 16,1 \cdot 10^3$, для кварцевого песка $K_a = 35,5 \cdot 10^3$.

На рис. 2 приведены записи изменения амплитуд АС в рабочей зоне лабораторной и промышленной установок при струйном измельчении цирконового концентрата.

Підготовчі процеси збагачення

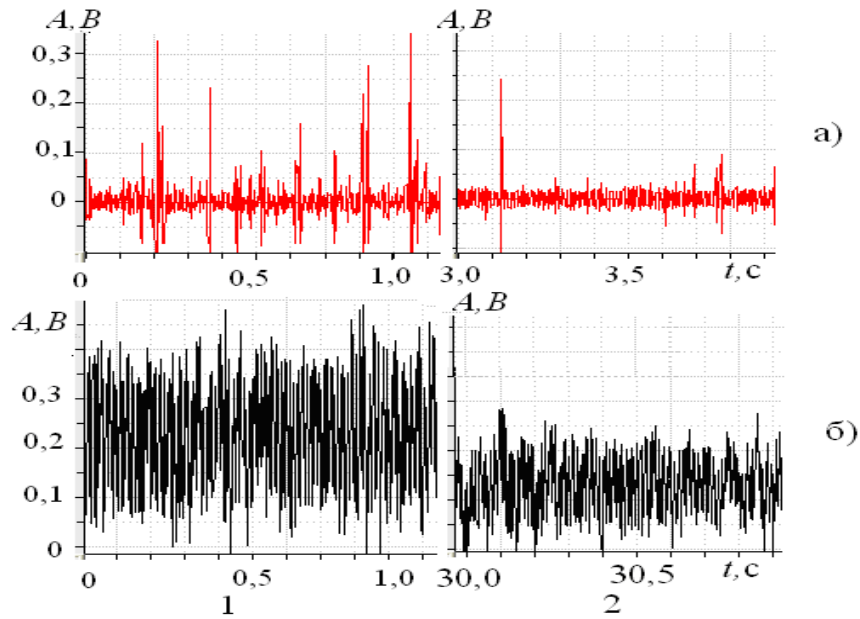


Рис. 2. Записи амплитуд акустических сигналов при измельчении цирконового концентрата в лабораторной (а) и промышленной установках (б):
1 – оптимальный режим, 2 – недопустимый режим

На рис. 3 показана акустическая активность \dot{N} струйного измельчения цирконового концентрата в оптимальном (1) и недопустимом (2) режиме работы лабораторной (а) и промышленной (б) мельниц.

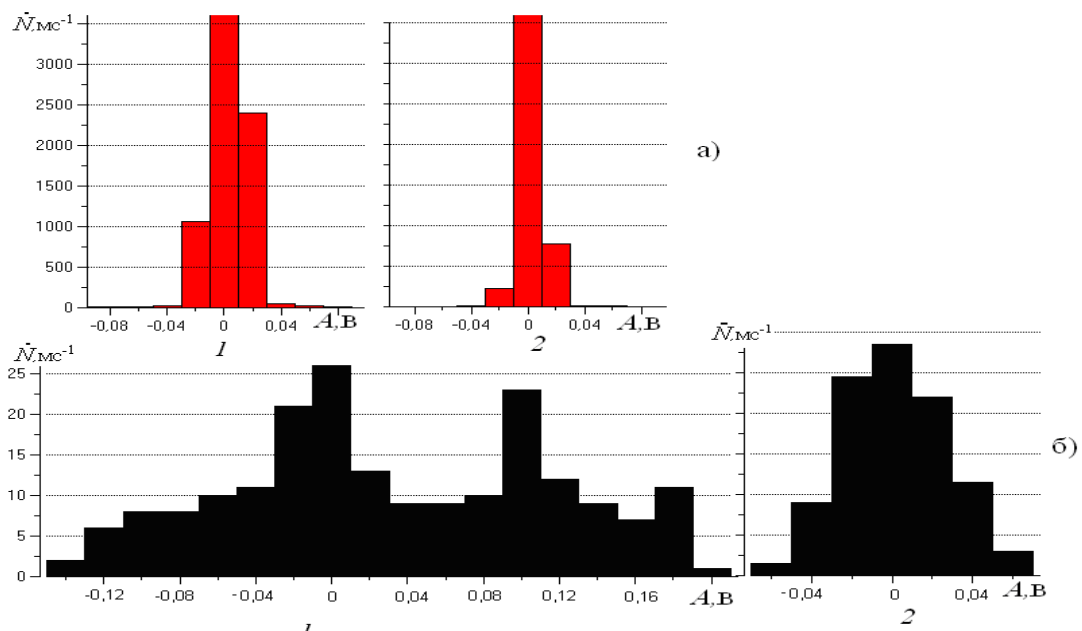


Рис. 3. Анализ акустической активности \dot{N} струйного измельчения цирконового концентрата в оптимальном (1) и недопустимом (2) режимах в лабораторной (а) и промышленной (б) мельницах.

Из рисунков видно, что сужение распределений активности АС по амплитудам может служить акустическим признаком выхода мельницы из оптималь-

Підготовчі процеси збагачення

ного режима в недопустимий (неефективний) режим, а двукратне зменшення переважних амплитуд АС підтверджує перехід в недопустиму область измельчення.

На рис. 4 сопоставлена кинетика акустического критерия оптимальности работы лабораторной и промышленной мельниц, показывающая более высокую эффективность процесса измельчения циркона в образце струйной мельницы большего типоразмера.

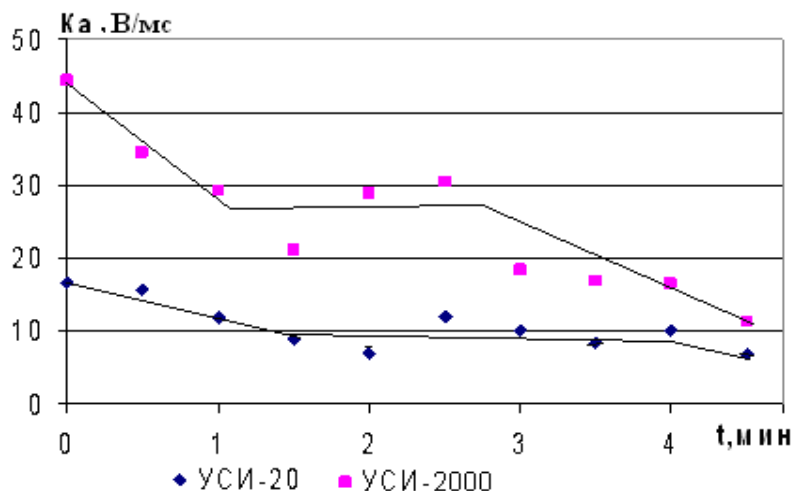


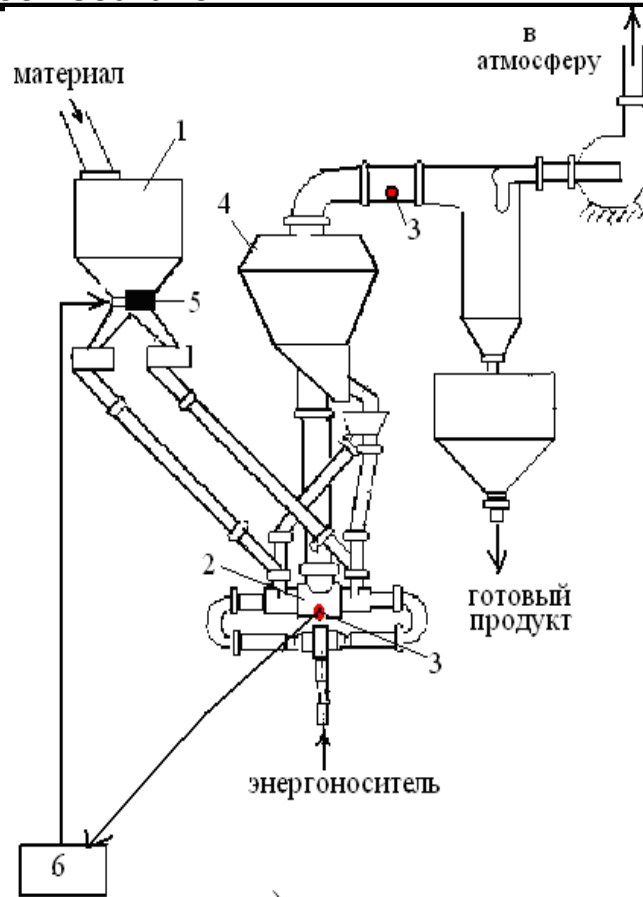
Рис. 4. Кинетика акустического критерия оптимальности работы лабораторной и промышленной мельниц при измельчении циркона

Из рис. 4 следует вывод о важности своевременной подачи порций исходного материала для оптимизации процесса измельчения на уровне выше K_a^{don} , поскольку в каждом цикле измельчения наблюдается тенденция уменьшения величины K_a из-за разгрузки струй от твердой фазы в процессе удаления готового продукта в циклон. При этом граница допустимости критерия должна соответствовать переходу оптимального режима измельчения в неоптимальный режим, так чтобы исключить появление недопустимых режимов работы мельницы со значительным падением ее производительности.

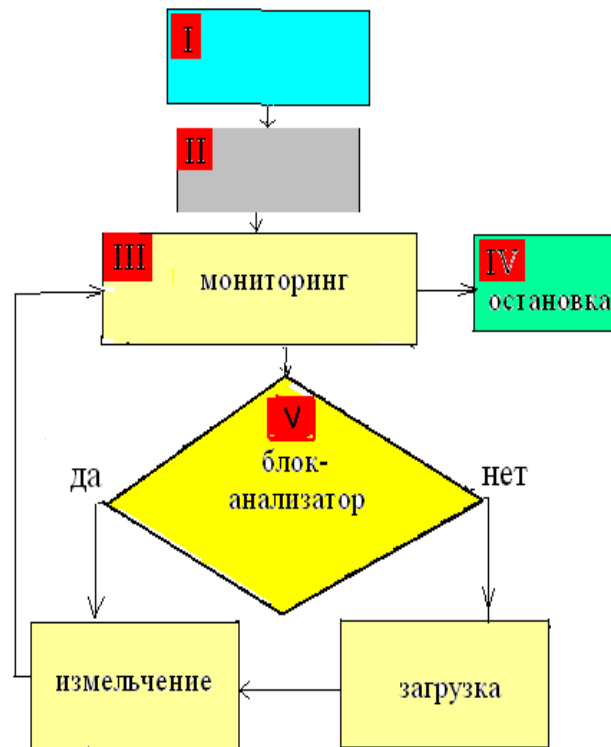
Проведенное акустическое исследование послужило основой для разработки алгоритма оптимизации работы струйной мельницы. Блок-схема алгоритма, включающего расчет критерия оптимальности K_a в течение акустического мониторинга, представлена на рис. 5. На схеме указаны: 1 – бункер загрузки, 2 – помольная камера, 3 – датчики, 4 – классификатор, 5 – дозатор подачи материала, 6 – АЦП и компьютер.

На основе предложенного алгоритма разработан способ регулирования газоструйного измельчения, включающий предварительное задание контрольных величин параметров АС (блок I) и технологических параметров измельчения (блок II), акустический мониторинг зоны помола (блок III) и обработку данных мониторинга (блок-анализатор V) (рис. 5 б).

Підготовчі процеси збагачення



а)



б)

Рис. 5. Схема струйной измельчительной установки (а) и блок-схема (б) оптимизации ее работы

Підготовчі процеси збагачення

Авторами разработаны также рациональные способы оптимизации работы струйной мельницы на основе акустического мониторинга процесса. Для записи акустических сигналов в зоне измельчения устанавливается пьезокерамический датчик, связанный с системой записи сигналов, которая фиксирует и передает данные через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на компьютер. Согласно одному способу [8] для каждого материала и технологических параметров измельчения задают контрольные значения амплитуд акустических сигналов, а в ходе мониторинга фиксируют текущие значения амплитуд АС, которые сравнивают с контрольными величинами. При значительном отклонении фиксируемых и контрольных параметров подается сигнал на дозатор загрузочного бункера, и производится дозагрузка струй материалом.

Для реализации другого способа [9] контроль осуществлялся на основе мониторинга активности акустических сигналов в рабочей зоне измельчения. Предварительно задается величина и допустимая полоса отклонений значений активности сигналов. При выходе текущих значений активности сигналов за пределы допустимой полосы регулируется режим классификации и подача материала на измельчение. Опробование принципов регулирования загрузки струй материалом по предложенным способам показало возможность увеличения производительности мельниц на 20-25%.

Применение акустического мониторинга позволяет регулировать работу классификатора и, соответственно, осуществлять контроль качества измельченного продукта. Для этого устанавливался дополнительный датчик в трубопроводе газозвеси за классификатором. Исследование вероятности распределения амплитуд АС порожней мельницы, заполненной материалом в рабочем режиме и при разгрузке струй газозвеси, позволило установить влияние состояния загрузки струй материалом [10]. В ходе мониторинга вычислялась функция плотности вероятности распределения амплитуд сигналов, записанных двумя датчиками системы измерения акустической активности. По отклонению этих величин от контрольных значений устанавливалась целесообразность изменения загрузки струй материалом [11] для поддержания оптимальной работы струйной мельницы.

Выводы

1. Оптимизацию работы струйной мельницы целесообразно реализовать путем непрерывного контроля акустической активности зоны помола с последующим управлением загрузкой измельчаемого материала на основе учета информативных акустических параметров.

2. Оценку энергонапряженности процесса струйного измельчения следует проводить с применением акустического критерия K_a оптимальности работы мельницы. В условиях струйного измельчения различных материалов установлены оптимальные и предельно допустимые значения предложенного критерия.

3. Разработаны способы и алгоритмы акустического контроля рабочей зоны струйного измельчения. Суть способа оптимизации заключается в постоянном мониторинге значений амплитуды и активности акустических сигналов зоны измельчения и зоны классификатора, их обработки и сравнении с контрольными

Підготовчі процеси збагачення

значеннями. При відхиленні текущих параметрів від заданих здійснюють додаткову завантажку матеріалу або зміну режиму класифікації.

4. Основний принцип регулювання процесу складає в наступному. Поки значення акустических критеріїв $K_a^{общ}$ і $K_a^{част}$ знаходяться на заданому рівні, процес дроблення продовжується без змін. Якщо величина критерію зменшується і відхилення складає більше 50% від контрольної величини, це означає перехід процесу в неоптимальний режим роботи млиниці (режим розвантажки струї). В цьому випадку передається сигнал на регулююче пристрій завантажувального бункера, і при цьому відкривається подача наступної порції матеріалу на дроблення.

5. Перевірка способу при лабораторному і промисловому опробуванні показала задовільне співпадіння результатів, що підтвердило правильність встановлених принципів оптимізації процесу струйного дроблення.

Список літератури

- 1 А.с. № 324069 Спосіб автоматического регулювання процесу дроблення в противоточной газоструйной млиниці / Иванов А.А., Горобец В.И., Горобец Л.Ж. МПК В02С19/06 // Опубл. 15.10.1974, бюл. № 38, заявка № 1876232/29-33, опубл. 24.01.1974
2. А.с. № 249920 Спосіб автоматического регулювання процесу дроблення в противоточной струйной млиниці / Горобец В.И., Горобец Л.Ж., Гудима В.И., Иванов А.А. МПК В02С // Опубл. 05.08.1969, бюл. № 25, заявка № 126165429-33, опубл. 22.07.1968)
3. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ дробления твердых полезных ископаемых: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – 35 с.
4. Результаты акустического мониторинга промышленной струйной установки / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др. // Техническая механика. – 2011. – № 2. – С. 93-100.
5. Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С. Параметры мониторинга и показатели струйного дробления полезных ископаемых // Вісник КТУ. – 2010. – Вип. 27. – С. 59-64.
6. Исследование амплитудных распределений акустических сигналов процесса струйного дробления / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др. // Разработка рудных месторождений. – 2011. – Вип. 94. – С. 266-268.
7. Акустические "образы" режимов струйного дробления / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др. // Вестник нац. техн. ун-та "ХПИ". – 2010. – Вип. № 65. – С. 127-138.
8. Патент на корисну модель № 62229 Спосіб моніторингу процесу струминного подрібнення Пілов П. І., Горобець Л. Ж., Прядко Н.С., Краснопер В.П, Лазніков О.М. МПК В02С19/06 // Опубл. 25.08.2011, бюл. № 16, заявка № 201100081, опубл. 04.01.2011.
9. Патент № 98405 Спосіб регулювання газоструминного подрібнення / Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Коваленко М.Д., Стрельников Г.А., Прядко Н.С. / Опубл. 10.05.2012, Бюл. №9, заявка № 201100939. опубл. 28.01.2011.
10. Патент на корисну модель № Спосіб моніторингу струминного подрібнення / Прядко Н.С., Булана Т.М. // Опубл. 10.05.2012, Бюл. № 4, заявка № 20114725, опубл. 12.12.2011.
11. Прядко Н.С., Буланая Т.М., Шегеда К.А. Графическое представление данных акустического мониторинга процесса струйного дробления // Вісник ДНУЗТ ім. Лазаряна.– 2012. – Вип. 40. – С. 212-215.

© Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Левченко К.А., Прядко Н.С., 2012

Надійшла до редколегії 13.09.2012 р.

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