

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 ГКАУ)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ ДИСПЕРСНОСТИ ПРИ СТРУЙНОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ РУД

Постановка проблемы. Тонкое измельчение используется для раскрытия минералов тонковкрапленных руд. При этом необходимо избегать переизмельчения вкраплений, поскольку при этом расходуется лишняя энергия, а переизмельченный продукт не соответствует техническим требованиям производства. Установление оптимальных условий тонкого измельчения является актуальной задачей из-за значительной энергоемкости получения продуктов высокой дисперсности (фракции менее 60-40 мкм), с одной стороны, и необходимости исключения переизмельчения ценных минералов, с другой стороны.

При реализации замкнутого цикла струйного измельчения происходит извлечение из мельницы заведомо недоизмельченного продукта, который в классификаторе разделяется на готовый по дисперсности продукт и более крупный, некондиционный, направляемый в мельницу на доизмельчение. В условиях производства требуемая дисперсность определяется по остатку R на контрольном сите. Показателем эффективности тонкого измельчения называют производительность G мельницы, отнесенную к образованной поверхности S измельченного продукта. При этом в процессе управления тонким измельчением с целью снижения доли энергозатрат на избыточное переизмельчение материала важно установление минимально возможной величины S_{y0} удельной поверхности продукта при требуемом остатке R на контрольном сите. В условиях производства решение этой задачи не достижимо из-за отсутствия технологически возможного и своевременного метода контроля дисперсности получаемого продукта в измельчительных установках. По этой причине имеет место достаточно широкий диапазон изменения дисперсности при условии получения кондиционного остатка R для конечного продукта. Например, для тонкодисперсного цирконового концентрата пределы изменения S_{y0} составляют 1400-2500 см²/г при $R \leq 0,5-2,5\%$.

В данной работе поставлена задача применения акустического мониторинга на примере работы струйной мельницы для наблюдения дисперсности в течение технологического цикла измельчения и выявления комплексных акустических и технологических критериев оптимизации этого процесса.

В работах [1-3] апробирована методика акустического мониторинга рабочей зоны струйной мельницы для контроля загрузки мельницы материалом и крупности измельчаемых частиц. Акустическую активность зоны помола измеряли с помощью датчика, соединенного с латунным волноводом, установленным внутри помольной камеры мельницы. Определены акустические характеристики зоны помола в зависимости от производительности G струйной мель-

Збагачення корисних копалин, 2013. – Вип. 54(95)

Підготовчі процеси збагачення

ниці и степени дисперсности S_{y0} продукта. Исследованиями установлены зависимости акустических параметров (амплитуды сигналов и акустической активности) зоны измельчения от стадии и режима измельчения.

Разработанная система акустического мониторинга струйного измельчения позволяет установить контроль качества измельчаемого материала и получаемого продукта. Величина амплитуды акустических сигналов (АС) изменяется в зависимости от крупности частиц, содержащихся в струе. Причем, увеличение размера частиц на порядок (от 0,3 до 3 мм) увеличивает более, чем на порядок значение амплитуды на стадии загрузки струй и в рабочем режиме измельчения при прочих равных условиях [4, 5].

Для поддержания требуемой дисперсности продукта предложены способы контроля его качества на основе следующих закономерностей:

- изменения акустической активности сигналов с максимальной амплитудой на различных стадиях измельчения;
- изменения доли малоамплитудных сигналов от режима классификации и дисперсности продукта.

Исследования позволили установить логарифмическую зависимость максимальной амплитуды АС от размера частиц измельченного продукта. В таблице ниже и на рис. 1 далее показаны зависимости, установленные в процессе струйного измельчения различных материалов в мельнице УСИ-20.

Зависимости максимальной амплитуды A_{max} (мВ) от размера d (мкм) частиц измельченного продукта (ρ – плотность, г/см³)

№ п/п	Материал	Зависимость	Коэффициент корреляции, r
1	Шамот	$\lg A = 1,1 \lg d - 0,21$	0,91
2	Шлак	$\lg A = 1,55 \lg d - 1,3$	0,9
3	Кварц	$\lg A = 0,8 \lg d + 0,99$	0,88
4	Циркон	$\lg A = 2,1 \lg d + 0,76$	0,99
5	Технический углерод	$\lg A = 0,99 \lg d - 0,26$	0,95
6	Общая зависимость	$A_{max} = d \cdot 10^{0,4\rho+0,04}$	0,81

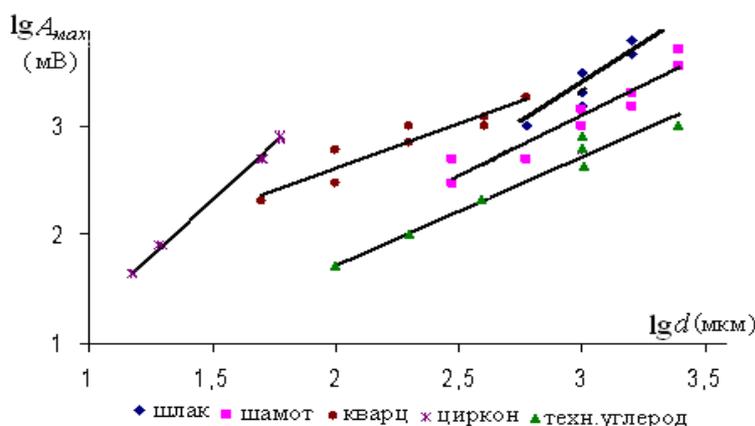


Рис. 1. Логарифмические зависимости максимальной амплитуды от размера измельчаемых частиц

На основани построенных графиков установлена трехпараметрическая зависимость величины A_{max} (мВ) максимальной амплитуды от размера d (мкм) частиц измельченного продукта и плотности ρ (г/см³) материала. Из таблицы следует, что между величиной максимальной амплитуды и размером частиц продукта существует прямо пропорциональная зависимость, тогда как между амплитудой и плотностью – экспоненциальная зависимость. Таким образом, зная две величины – характерные размеры d частиц измельченного продукта и плотность ρ материала, можно прогнозировать ожидаемую в зоне помола величину A_{max} амплитуды акустических сигналов по установленным зависимостям с указанным коэффициентом корреляции.

Эффект диспергирования оценивали на основе определения в измеряемом счете АС доли малоамплитудных сигналов. По опытным данным установлена [3, 4] зависимость доли $\dot{N}_{A_{40}}$ (%) малоамплитудных акустических сигналов (менее 40 мВ) в рабочей зоне от параметра дисперсности $S_{y\partial}$ (см²/г) продукта при струйном измельчении шамота, шлака и известняка в мельнице УСИ-20: $\dot{N}_{(A_{40})} = 16,06 \cdot S_{y\partial} + 87,5; R = 0,87$. Согласно оценке при $S_{y\partial}$ продукта в диапазоне 1500 – 6800 см²/г наблюдается изменение активности сигналов с амплитудой A_{40} в диапазоне $\dot{N}_{(A_{40})} = 6 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$ имп/с, что составляет 88-99% суммарной активности акустического излучения зоны помола.

Целью данной работы является разработка и исследование комплексных акустических критериев оценки качества измельченного продукта на основе анализа дисперсности материалов в процессе тонкого измельчения. В работе произведен анализ акустической и технологической информации о работе лабораторной мельницы на ряде сыпучих твердых материалов, а также результатов промышленного опробования акустического мониторинга в условиях Вольногорского ГМК при струйном измельчении цирконового концентрата.

Содержание исследований. Экспериментальные исследования проведены на лабораторной струйной мельнице УСИ-20 производительностью до 20 кг/ч и промышленной УСИ-2000 – соответственно до 2000 кг/ч. Производительность лабораторной мельницы по готовому продукту при измельчении кварцевого песка составила $G = 3-5$ кг/ч при давлении сжатого воздуха $P = 0,3$ МПа, частоте вращения ротора классификатора $n = 2000$ мин⁻¹. Производительность промышленной мельницы при измельчении цирконового концентрата составляла 0,6-1,1 т/ч при $P = 0,5-0,6$ МПа, $n = 84-180$ мин⁻¹.

Особенности методики анализа акустических сигналов состояли в следующем. Рассматривались АС в зоне измельчения при частоте регистрации 400 кГц. За выбранный интервал времени (порядка 1-100 мс) вычислялись значения максимальной A_{max} , суммарной \dot{N}_{Σ} и частной $\dot{N}_{A_{max}}$ активности (имп/с) акустического излучения зоны помола. При этом в определении A_{max} учитывались сигналы с долевым участием более 1 % (более 10 АС). При оценке \dot{N}_{Σ} исключались сигналы "шума" струи (с амплитудой порядка 1-2 мВ). Определя-

Підготовчі процеси збагачення

лась доля сигналів с малою амплитудою ($A_{40} - A_{10}$).

Опыт исследований струйного измельчения материалов различной исходной крупности (единицы и доли мм) показывает, что акустические сигналы с амплитудами более высоких значений характеризуют содержание в струе более крупнозернистых фракций.

На рис. 2 показана связь максимальной амплитуды A_{max} с показателем дисперсности $S_{y\delta}$ измельченного продукта в условиях работы мельницы УСИ-20 на различных материалах (исходная крупность менее 2-3 мм, плотность в диапазоне 1,4-4,7 г/см³). Анализу подвергались участки спектров амплитуд на стадии разгрузки струй, поскольку на этой стадии величина A_{max} может характеризовать размеры частиц циркулирующей нагрузки.

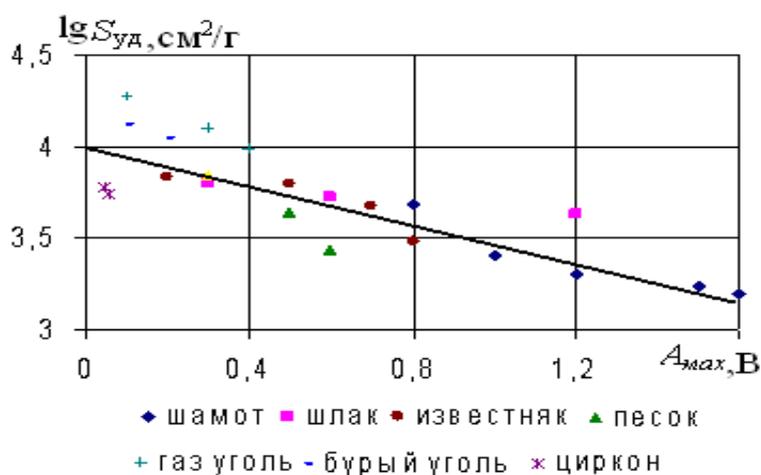


Рис. 2. Значения максимальных A_{max} амплитуд АС при изменениях дисперсности $S_{y\delta}$ измельчаемых частиц (на стадии разгрузки струй)

Дисперсность продуктов струйного измельчения, измеренная по величине $S_{y\delta}$ удельной поверхности на приборе Т-3 Товарова, показала следующие результаты: шамот – $S_{y\delta} = (0,17-0,28)$ м²/г; известняк – $S_{y\delta} = (0,3-0,68)$ м²/г; газовый уголь – $S_{y\delta} = (0,97-1,88)$ м²/г; бурый уголь – $S_{y\delta} = (1,11-1,32)$ м²/г, циркон – $S_{y\delta} = (0,55-0,59)$ м²/г.

Результаты исследований показали, что процесс накопления в спектрах акустических сигналов с малыми значениями амплитуд (порядка 5-20 мВ) характеризует преимущественное содержание в струе частиц малых размеров, т.е. на преобладающие в кинетике измельчения эффекты диспергирования материала. По опытным данным работы струйной установки УСИ-20 установлены связи акустических параметров с удельной поверхностью $S_{y\delta}$ измельченных продуктов.

На рис. 3 показаны амплитудные распределения акустических сигналов на стадии разгрузки рабочей зоны измельчения циркона в лабораторных (кривые 1-3) и промышленных условиях ВГМК (кривые 4-6).

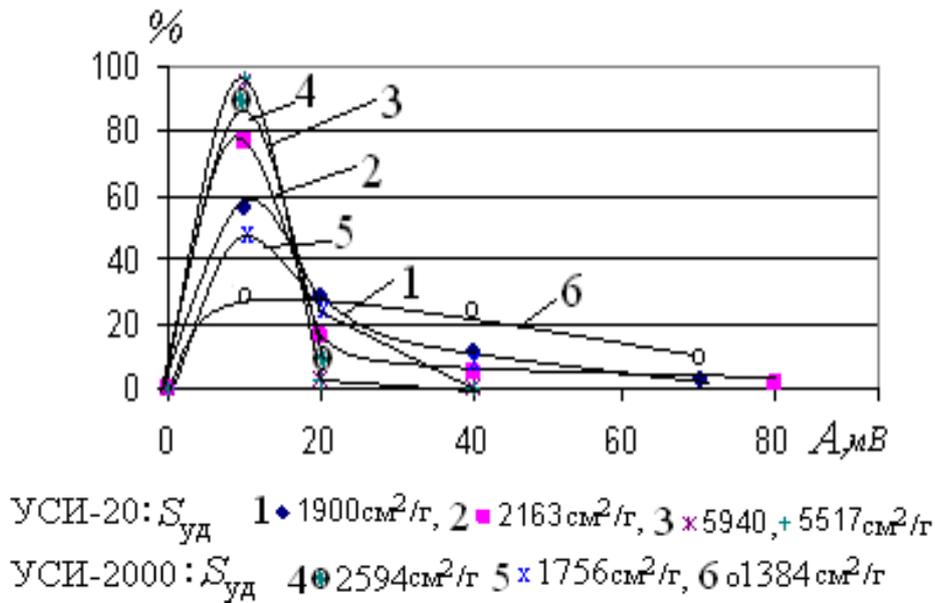


Рис. 3. Амплитудные распределения акустических сигналов рабочей зоны измельчения циркона для различных значений дисперсности продукта

Сравнительные графики указывают, что повышение дисперсности порошка сопровождается ростом долевого участия малоамплитудных сигналов (менее 10-20 мВ) в амплитудных распределениях АС. Так, в условиях установки УСИ-20 рост дисперсности продукта от 1900 $см^2/г$ до 5900 $см^2/г$ сопровождается увеличением доли сигналов с амплитудой $A = 10-20$ мВ от 60% до 98%. В промышленных условиях измельчения этот диапазон изменения доли малоамплитудных сигналов составляет – 28-85% при $S_{уд}$ соответственно равном 1300-2600 $см^2/г$.

На рис. 4 показаны связи с дисперсностью $S_{уд}$ относительной доли \dot{N}_{A-40} и \dot{N}_{A-10} малоамплитудных сигналов.

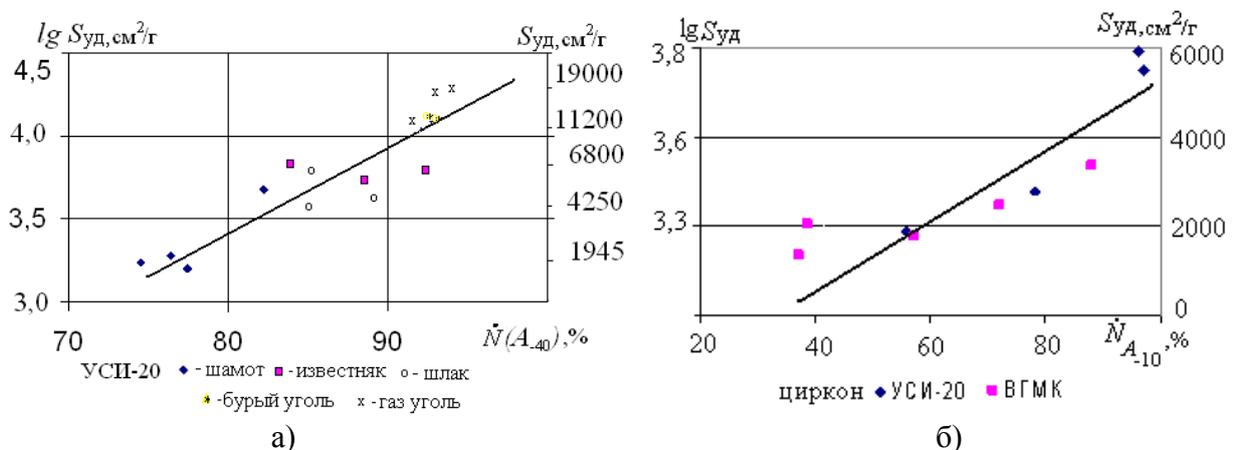


Рис. 4. Связь параметра дисперсности $S_{уд}$ продукта и доли малоамплитудных сигналов акустическом излучении (\dot{N}_{A-40} , \dot{N}_{A-10}) рабочей зоны струйных мельниц: УСИ-20 (а, б); УСИ-2000 (б)

Підготовчі процеси збагачення

При плотности 2,8-3,0 г/см³ связи показателя дисперсности $S_{y\partial}$ (см²/г) с акустическим параметром $\dot{N}(A_{40})$ (%) доли малоамплитудных сигналов в суммарной акустической активности \dot{N}_{Σ} зоны помола описываются уравнениями: $\lg S_{y\partial} = 0,057 \cdot \dot{N}(A_{40}) - 1,12$, коэффициент корреляции $R = 0,87$.

Результаты анализа данных акустического мониторинга струйной мельницы позволяют предложить критерий оптимальности процесса, как произведение максимальной амплитуды A_{max} на суммарную акустическую активность \dot{N}_{Σ} зоны помола: $K_{ont} = A_{max} \cdot \dot{N}_{\Sigma}$; (В/с). В таком виде этот критерий K_{ont} характеризует акустический эффект трансформации кинетической энергии ускоренных струями частиц в акустическую энергию при соударениях частиц, так как в акустическом мониторинге A_{max} и \dot{N}_{Σ} – это параметры, пропорциональные скорости и численности фиксируемых соударений частиц о волновод, принимаемых датчиком. Таким образом, величина предложенного критерия пропорциональна "условной энергонапряженности" разрушения (числу и силе ударов) частиц в актах струйного измельчения и может составить основу оптимизации этого процесса.

В согласии с вышеизложенными результатами основу оптимизации режима и качества продукта струйного измельчения могут составить следующие комплексные акустико-технологические показатели:

– критерий эффективности измельчения $K_{эфф} = G / \dot{N}_{\Sigma}$, (г/имп),
(G , г/с, \dot{N}_{Σ} , имп/с);

– критерий эффективности диспергирования $K_S = G \cdot S_{y\partial} / \dot{N}_{\Sigma}$, (см²/имп);
 $K_S = K_{эфф} S_{уд}$;

– акустический показатель энергоемкости измельчения $\mathcal{E}_N^{изм}$ (имп/г) – величина, обратная $K_{эфф}$;

– акустический показатель энергоемкости диспергирования $\mathcal{E}_N^{дисп}$ (имп/см²) – величина, обратная K_S .

Стабильность высоких значений критериев $K_{эфф}$ и K_{ont} характеризует условие достижения максимальной эффективности процесса струйного измельчения. Рекомендательный уровень акустических критериев для оценки работы промышленной струйной мельницы составил при измельчении циркона до 45 мкм ($S_{y\partial} = 2300-2600$ см²/г) $K_{эфф} = (1-2,3) \cdot 10^{-3}$ г/имп, $K_{ont} = 19-61$ В/с; при измельчении до 63 мкм ($S_{y\partial} = 1500-2050$ см²/г) $K_{эфф} = (2-4) \cdot 10^{-3}$ г/имп, $K_{ont} = 32-139$ В/с.

Применение акустического мониторинга для контроля качества измельченного продукта показало следующие результаты. Датчик, установленный в зоне выхода газозвеси из классификатора, регистрировал сигналы, по которым можно судить о качестве и количестве готового продукта, поступающего в циклон. В процессе контроля качества продукта выявлен интервал допустимого изменения акустической активности сигналов с предельно допустимыми значениями амплитуд (не более 2 мВ): $A \geq A_{контр} = 2$ мВ.

В частности, для измельченного циркона (-63 мкм) в условиях ВГМК оп-

тимальное качество (рис. 5 в) достигается при практически полном отсутствии случаев появления АС с амплитудой выше $A_{2\text{мВ}}$, допустимое качество соблюдается при активности не выше $\dot{N}_{\text{контр}} = 80\text{с}^{-1}$, а недопустимое качество (рис. 5а) – в случаях систематического превышения активности сигналов контрольной амплитуды более $\dot{N} = 100\text{с}^{-1}$, либо появления в спектрах значений амплитуд, составляющих (5-10) $A_{\text{контр}}$.

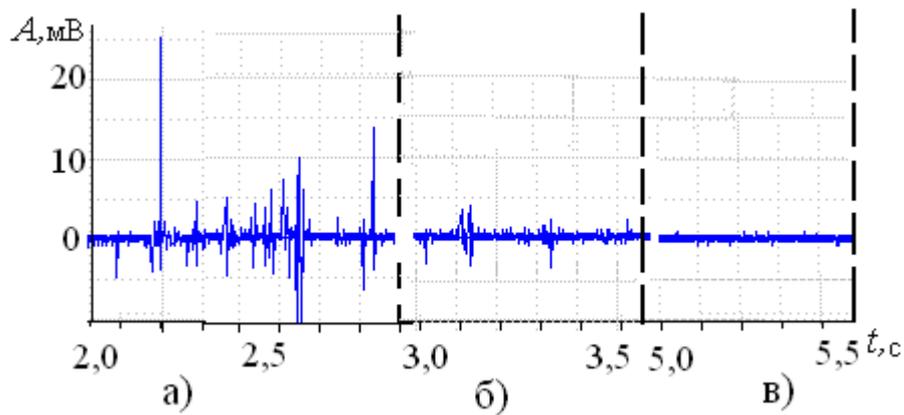


Рис. 5. Записи АС в случаях изменения качества измельченного продукта:

- а) некондиционное качество: $R_{63} > 3\%$;
- б) допустимое качество: $R_{63} = 1,5\%$;
- в) оптимальное качество: $R_{63} = 0-0,5\%$

В результате акустического исследования предлагается блок-схема алгоритма контроля качества продукта струйного измельчения (рис. 6), которая включает расчет акустических критериев для оптимизации дисперсности продукта.

Підготовчі процеси збагачення



Рис. 6. Блок-схема мониторинга и расчета акустических критериев для оптимизации дисперсности продукта струйного измельчения

Предварительно согласно техническому заданию устанавливаются необходимые технологические параметры (P, n, t) и на основании имеющихся опытных данных по измельчению конкретного материала из базы данных задаются допустимые акустические критерии работы струйной мельницы.

В процессе мониторинга измельчения измеряются спектры акустической активности и амплитуд АС, определяются максимальные A_{max} значения амплитуд, общее число сигналов \dot{N}_Σ и число сигналов с малыми амплитудами ($N_{(A-40)}, N_{(A-10)}$) за выбранные интервалы ($\Delta t, c, ms$) времени. При наличии операции взвешивания готового продукта и контроля производительности мельницы вычисляются значения предложенных критериев и показателей: $K_{эфф}, \mathcal{E}_N^{дисп}, \mathcal{E}_N^{изм}$. На основе сопоставления расчетных текущих величин критериев с заданными значениями делается вывод о состоянии струй, эффективности и энергоемкости процесса, о качестве получаемого продукта и о дальнейших действиях по регулированию технологии.

Если текущая расчетная величина критериев, выбранных для контроля загрузки струй материалом, выходит за рамки допустимых значений, подается сигнал либо на остановку мельницы (по окончании опыта), либо на дополнительную, очередную загрузку порции исходного материала (в случае продолжения опыта). При недопустимом изменении критериев, контролирующих качество продукта, подается сигнал на изменение режима классификации, и далее (при необходимости) производится корректировка параметров энергоносителя.

Выводы

Акустический мониторинг процессе струйного измельчения в условиях работы лабораторной и промышленной измельчительных установок позволил выявить следующие закономерности связей акустических и технологических показателей, контролирующей дисперсность продукта и эффективность измельчения.

– Существует корреляционная, логарифмически линейная, прямо пропорциональная связь величины A_{max} максимальной амплитуды и размера d частиц продукта при прочих равных условиях: вид и плотность материала, параметры энергоносителя.

– Показатель дисперсности S_{y0} измельченного продукта связан логарифмически линейной, обратно пропорциональной зависимостью с характерной (представительной) величиной A_{max} . В условиях анализа спектров амплитуд на стадии разгрузки струй величина A_{max} может характеризовать размеры частиц циркулирующей нагрузки.

– Дисперсность продукта S_{y0} связана с долей $\dot{N}_{(A-40)}$ малоамплитудных акустических сигналов (менее 40 мВ) рабочей зоны струйной мельницы логарифмически линейной прямо пропорциональной зависимостью при измельчении шамота, шлака, кварцевого песка и угля. При измельчении циркона установлена аналогичная связь S_{y0} с долей \dot{N}_{A-10} сигналов меньшей амплитуды (менее 10 мВ).

– Максимальная эффективность процесса струйного измельчения реализуется при условии достижения стабильно высоких значений критериев $K_{эфф}$ и $K_{опт}$.

– Условием достижения оптимального качества измельченного циркона (-63 мкм) в условиях ВГМК является исключение случаев появления акустических сигналов с амплитудой выше некоторой контрольной величины (порядка 2 мВ) на выходе газозвеси из классификатора.

Установленные акустические закономерности составят основу системы управления работой струйных измельчительных установок с использованием предложенной в данной работе блок-схемы мониторинга и расчета акустических критериев для оптимизации дисперсности продукта струйного измельчения.

Список литературы

1. Акустические и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, Н.С. Прядко // Известия вузов. Горный журнал. – 2009. – № 4. – С. 115-121.
2. Закономерности акустического мониторинга струйного измельчения полезных ископаемых / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 44(84). – С. 25-32.
3. Горобец Л.Ж., Прядко Н.С. Акустические характеристики гранулометрических распределений частиц в процессе измельчения кварцевых песков // Автоматизация виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2011. – №45. – С. 336-340.

Підготовчі процеси збагачення

4. Горобець Л.Ж., Бовенко В.Н., Прядко Н.С. Акустический метод исследования процесса измельчения // Обогащение руд. – 2013.– № 3. – С. 18-24.

5. Пилов П.И., Прядко Н.С. Описание удельной поверхности продуктов измельчения на основе функции распределения дисперсности // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 53(94). – С. 57-64.

© Пилов П.И., Горобець Л.Ж., Прядко Н.С., 2013

*Надійшла до редколегії 03.09.2013 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*