

Л.Ж. ГОРОБЕЦ, д-р техн. наук

(Україна, Днепропетровск, Национальний горний університет),

Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук

(Україна, Днепропетровск, Інститут технічної механіки НАНУ і ГКАУ),

В.П. КРАСНОПЕР

(Україна, Вольногорський горно-металургічний комбінат),

В.Н. БОВЕНКО, д-р техн. наук

(Росія, Москва, МВТУ ім. Баумана),

Л.А. ЦЫБУЛЬКО, канд. техн. наук

(Україна, Днепропетровск, Национальний горний університет)

ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОВЕРКА СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЦИРКОНОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Важной научной задачей является устранение противоречий между необходимостью увеличения производительности оборудования для высококачественного тонкого измельчения и требованиями ресурсосбережения энергетических и материальных затрат при производстве соответствующего продукта. Проведенные исследования применения системы акустического мониторинга работы лабораторной и промышленной струйных мельниц показали связь технологических и акустических параметров процесса. На этой основе разрабатывается система оптимизации работы струйных мельниц с целью повышения эффективности их работы.

Акустическую активность промышленной струйной мельницы измеряли с помощью широкополосных пьезокерамических датчиков, соединенных с латунными волноводами, установленными внутри двух зон (помольной камеры и классификатора на выходе из него газозвеси). Запись сигналов и дальнейшая обработка осуществлялась посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП), соединенного с персональным компьютером.

На рис. 1 показана установка акустической аппаратуры на промышленной струйной мельнице Вольногорского горно-металлургического комбината. Схема и методика акустического мониторинга приведена в работе [1].

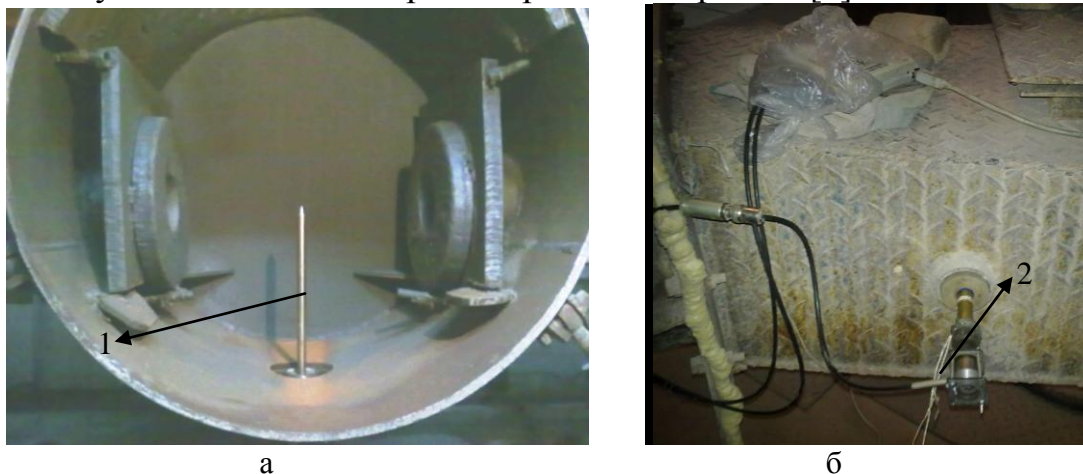


Рис. 1. Установка акустических датчиков в помольной камере (а) и на выходе классификатора (б): 1 – волновод; 2 – датчик

Підготовчі процеси збагачення

Целью исследования является поиск рационального местоположения волновода в помольной камере для получения максимально возможной акустической информации для анализа режима струйного измельчения. В задачи работы входило обоснование приемлемых акустических параметров и критериев для дальнейшей оптимизации процесса измельчения с позиции достижения максимальной производительности мельницы при заданном качестве конечного продукта. Анализ акустической информации проводился с использованием лабораторных и промышленных опытных данных по измельчению различных твердых материалов [2-4].

Методика регистрации опытных данных акустического мониторинга зоны измельчения состояла в следующем. На различных стадиях заполнения помольной камеры материалом измерялось общее число \dot{N}_Σ АС различных амплитуд. Для анализа из общего счета N_Σ АС исключалось число АС, характеризующих фоновый шум струи энергоносителя. При оценке амплитуд устанавливалась максимальная A_{max} АС, т.е. амплитуда сигналов с долевым участием более 1%. Число этих сигналов обозначалось, как \dot{N}_{max} . Производительность мельницы вычислялась по методике предприятия, величина удельной поверхности S_{y0} полученного продукта определялась на аппаратах Malvern и Товарова Т-3

В процессе промышленной проверки акустического метода оптимизации струйного измельчения исследовались режимы измельчения и акустической активности мельницы на различных стадиях загрузки струй материалом: в начальные моменты (первые минуты измельчения), в рабочем режиме (десятки минут) и при разгрузке струй. Изучалось влияние давления энергоносителя (в диапазоне $P = 0,6-0,3$ МПа) и частоты вращения ротора классификатора ($n = 107-177$ мин⁻¹), изменяющей дисперсность готового продукта, на акустические параметры в исследуемых зонах. Загрузка мельницы материалом проводилась непрерывно, однако ее уровень регулировался в ходе эксперимента. Условия и результаты испытаний приведены в таблице 1.

Рассматривались три положения волновода относительно центра помольной камеры: 1 – *центральное* (в центре рабочей зоны), 2 – *нижнее* (на уровне нижнего края разгонных трубок), 3 – *среднее* положение между 1 и 2.

На рис. 2 показаны характерные записи АС в зависимости от положения конца волновода в помольной камере.

Исследования показали, что акустические параметры \dot{N}_{max} , \dot{N}_Σ , A_{max} зоны помола изменяются под влиянием степени загрузки струй материалом (перегрузка, недогрузка, рабочий режим), частоты вращения ротора классификатора и давления энергоносителя.

Обработка результатов акустического мониторинга работы струйной мельницы позволила установить следующие параметры и зависимости:

- кинетику акустической активности \dot{N} и амплитуд максимальных значений (A_{max}) акустических сигналов в рабочем режиме измельчения;
- амплитудное распределение акустических сигналов на стадии разгрузки струй в зависимости от режима классификации;
- амплитудное распределение акустических сигналов в рабочем режиме при различных значениях давления энергоносителя;

Підготовчі процеси збагачення

– кинетику амплитуд сигналів в різних режимах измельчення загрузка, рабочий режим и разгрузка струй.

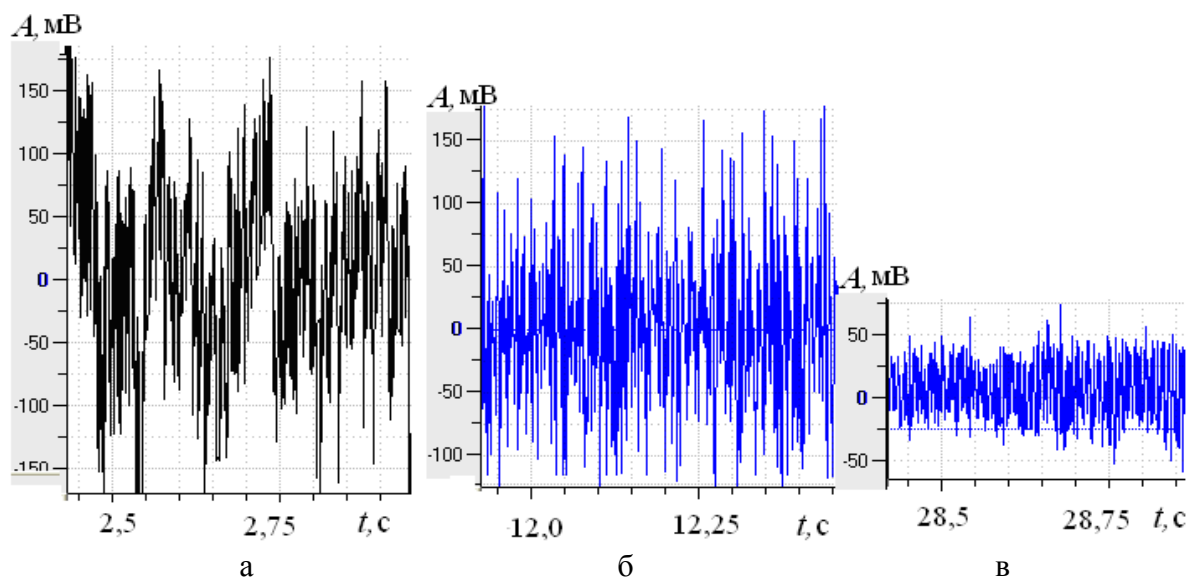


Рис. 2. Записи акустических сигналов в различных положениях волновода:
а – центральное; б – среднее; в – нижнее

Таблица 1

Условия и результаты опробования акустического мониторинга при струйном измельчении циркона в мельнице №7 Вольногорского ГМК

P , МПа	n , мин ⁻¹	G , кг/ч	$S_{уд}$, см ² /г	$\dot{N}_{\Sigma} * 10^{-5}$, с ⁻¹	$K_{онт}$, В/с	$K_{эфф} = G / \lg \dot{N}_{\Sigma}$	Режим
Позиция волновода 1							
0,6	84	960	708	0,67	32,0	55,26	2
0,6	84	1020	1515	0,87	16,5	57,36	1
0,6	84	1100	1430	0,9	31,5	61,68	1
0,61	180	600	2376	0,92	31,5	33,58	1
Позиция волновода 2							
0,52	177	528	2501	1,9	10,5	25,81	1
0,52	177	624	2605	1,7	61	23,11	1
0,52	177	354	2451	1,86	19,2	46,42	4
0,52	107	1044	1970	1,34	67,4	25,81	1
0,52	107	1062	2021	1,8	11,0	23,11	1
0,52	107	1272	1609	1,7	139,4	46,42	2
0,52	107	1062	2054	1,7	117,6	25,81	2
0,52	107	954	1987	1,5	132,8	23,11	2
0,3	107	336	1852	1,4	15,9	46,42	3
0,4	107	1224	2021	1,66	7,6	25,81	3
0,52	107	738	1550	1,68	50	23,11	4
Позиция волновода 3							
0,52	177	486	2570	1,7	19,8	25,81	2
0,52	177	432	2427	1,56	11,3	23,11	2
0,53	107	860	1756	1,4	6,3	46,42	1

Режимы: 1 – рабочий; 2 – перегрузка материалом; 3 – перегрузка давлением; 4 – разгрузка

Підготовчі процеси збагачення

По итогам мониторинга вычислялись следующие акустические коэффициенты и критерии:

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

– критерий эффективности диспергирования продукта $K_S = G \cdot S_{y\partial} / \dot{N}_{\Sigma}$, ($\text{см}^2/\text{имп}$);

– акустический показатель энергоемкости измельчения $\mathcal{E}_N^{изм} = \dot{N}_{\Sigma} / G$ (имп/г);

– акустический показатель $\mathcal{E}_N^{дисп} = \dot{N}_{\Sigma} / G / S_{y\partial}$ энергоемкости диспергирования (имп/см²);

– акустический критерий оптимальности процесса измельчения, равный произведению максимальной амплитуды A_{max} (В) (на уровне и больше 20мВ) на акустическую активность \dot{N}_{max} (с⁻¹) с максимальной амплитудой сигналов: $K_{опт} = A_{max} \dot{N}_{max}$ (В/с).

На рис. 3 показаны графики зависимостей $K_{эфф}(G) = G / \lg N$ для лабораторной (а) и промышленной (б) мельницы. Установлено, что величина критерия $K_{эфф}$ изменяется аналогично в условиях работы как лабораторной, так и промышленной мельницы при струйном измельчении различных материалов.

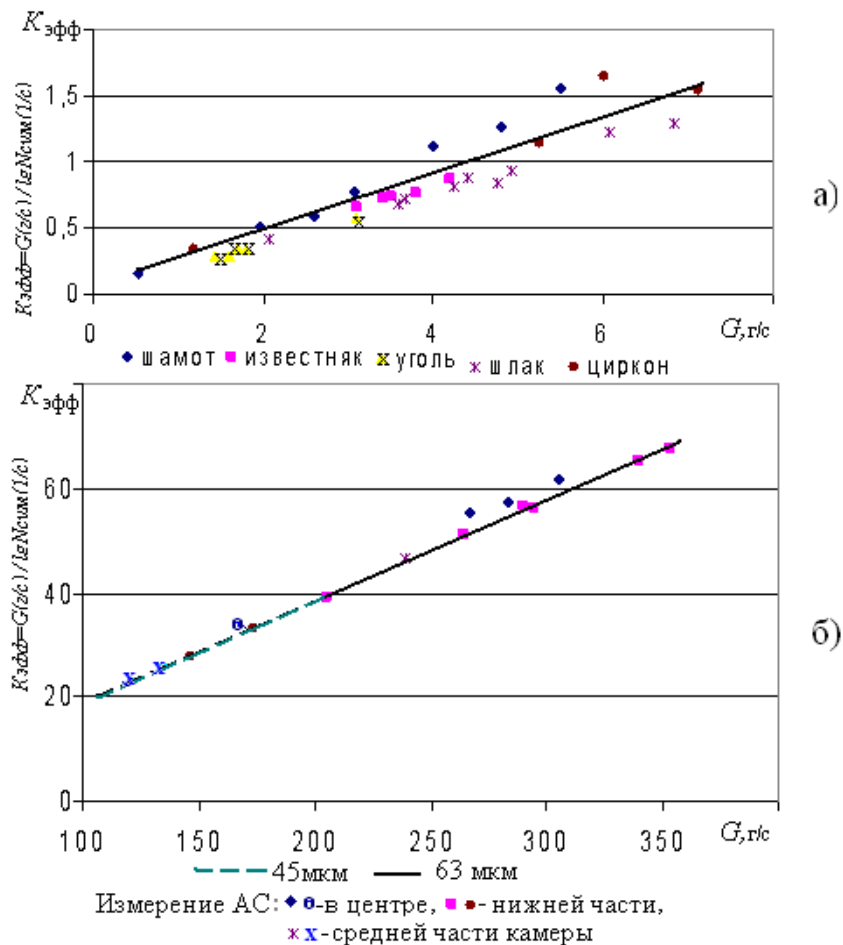


Рис. 3. Зависимости $K_{эфф}$ от производительности лабораторной (а) и промышленной (б) мельницы: $G_{УСИ-20} = 2-25$ кг/ч, $G_{пром} = 300-1300$ кг/ч

Підготовчі процеси збагачення

Зависимость $K_{эфф}=f(G)$ для лабораторной мельницы УСИ-20 имеет степенной характер, выраженный уравнением $K_{эфф}=0,2G^{0,96}$ с достоверностью аппроксимации $R^2=0,94$. Если анализировать экспериментальные данные по измельчению циркона, то уравнение имеет вид: $K_{эфф}=0,29G^{0,89}$ ($R^2=0,98$). Исследование работы промышленной мельницы показало аналогичный степенной характер зависимости $K_{эфф}=f(G)$, выражаемый уравнением $K_{эфф}=0,2G^{0,99}$ (с достоверностью аппроксимации $R^2=0,9997$). Установленную связь коэффициента эффективности и производительности мельницы можно характеризовать линейной зависимостью $K_{эфф}=0,2G+0,38$ с меньшим коэффициентом достоверности $R^2=0,9993$.

Вышеизложенное позволяет утверждать о существовании закономерной достоверной зависимости $K_{эфф}(G)$ от производительности струйных мельниц различного типоразмера при переработке твердых сыпучих материалов. Эту зависимость можно использовать при внедрении систем оптимизации процесса.

На рис. 4 представлена зависимость $K_{опт}(G)$, установленная при измельчении циркона в промышленной мельнице. Видно, что величина критерия оптимальности зависит от производительности мельницы, но имеет меньший уровень при более высокой дисперсности измельченного продукта: при $d = 45$ мкм $K_{опт} = 20 - 60$ В/с; при $d = 63$ мкм; $K_{опт} = - 120$ В/с. Общая зависимость $K_{опт}(G)$ при всех положениях волновода носит полиномиальный характер (второй степени) вида $K_{опт} = 0,0033G^2 - 1,03G + 89,57$ с коэффициентом достоверности $R^2 = 0,96$. Эта зависимость может быть использована для прогнозной оценки критерия оптимальности в пределах изменения производительности струйной мельницы G 300 – 1300 кг/ч.

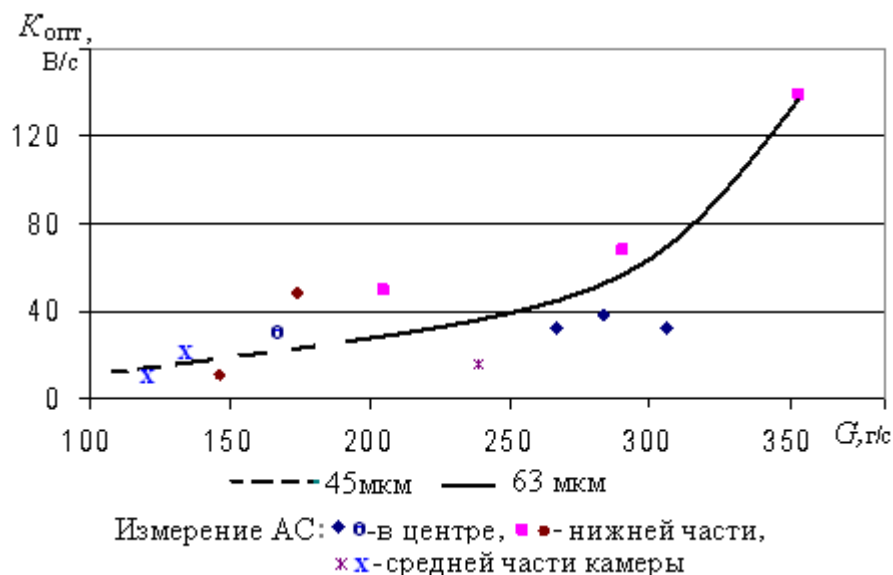


Рис. 4. Зависимость $K_{опт}$ от производительности мельницы ВГМК

Исследования показали целесообразность наблюдения акустического излучения при установке волновода в центре рабочей зоны (положение 1). Следует отметить, что оптимальным условиям измельчения соответствуют следующие

Підготовчі процеси збагачення

шие значения технологических показателей: при крупности продукта 63 мкм $G = 960 - 1270$ кг/ч, $S_{y\partial} = 1500 - 2000$ см²/г, при крупности продукта 45 мкм $G = 530 - 620$ кг/ч, $S_{y\partial} = 2400 - 2600$ см²/г. При этом наблюдаются оптимальные значения предложенных акустических показателей и параметров для оценки эффективности струйного измельчения: при крупности продукта 63 мкм $K_{opt} = 60 - 130$ В/с, $K_{эфф} = (25 - 60)$, $\mathcal{E}_{изм} = 480 - 580$ имп/г; при крупности продукта 45 мкм $K_{opt} = 10 - 60$ В/с, $K_{эфф} = (23 - 46)$, $\mathcal{E}_{изм} = 980 - 1300$ имп/г.

В процессе промышленного опробования системы оптимизации при измельчении циркона были установлены минимальные значения энергоемкости диспергирования порядка $\mathcal{E}_{дисп} = 0,3 - 0,5$ имп/см².

Промышленное опробование показало, что характеристики акустического излучения потока газозвеси в воздуховоде после классификатора изменяются в зависимости от режима классификации, т.е. от размера частиц измельченного продукта (см. рис. 5). При этом импульсы изменяющейся амплитуды характеризуют момент вариации гранулометрического состава продукта в ходе измельчения.

На рис. 5 иллюстрируется момент (а) появления частиц большего размера в результате крутого изменения амплитуд акустических сигналов на выходе из классификатора. Отбор проб измельченного продукта подтвердил факт его укрупнения, что потребовало повышения частоты вращения ротора классификатора с 88 до 107 мин⁻¹.

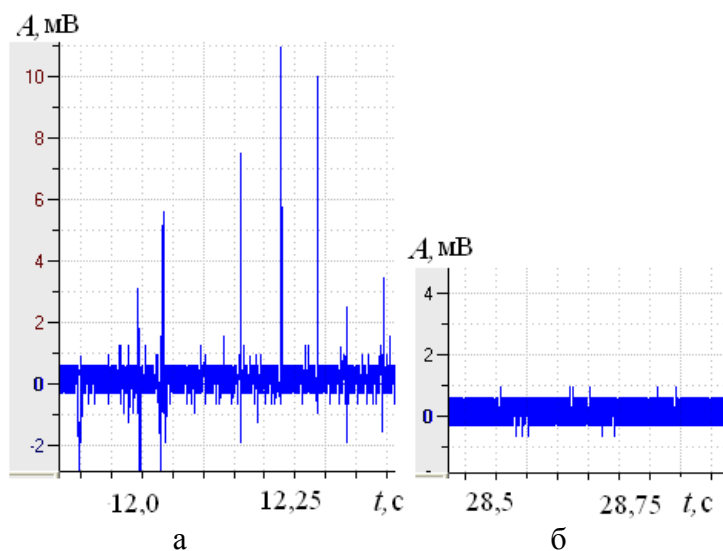


Рис. 5. Акустические сигналы за классификатором:
а – наличие отклонений размеров частиц от нормы;
б – кондиционное качество продукта

Таким образом, исследования показали перспективность применения акустического мониторинга для задачи оптимизации процесса измельчения. Для контроля качества продукта необходимо контролировать АС в зоне за классификатором и при отклонении величины амплитуды от заданной, уточнять режим классификации. Система оптимизации работы струйной мельницы должна

Підготовчі процеси збагачення

буть основана на непрерывном мониторинге акустических параметров: \dot{N}_{max} , \dot{N}_{Σ} , A_{max} за выбранный интервал (порядка 0,1-1 с) наблюдений. На основе этих параметров вычисляются акустические критерии оптимальности K_{opt} , эффективности $K_{эфф}$ и энергоемкости диспергирования $\mathcal{E}_{дисп}$ и измельчения $\mathcal{E}_{изм}$.

В ходе измельчения на основе анализа указанных критериев следует обеспечить регулирование загрузки струй и частоты вращения ротора классификатора с ориентацией на достижение их оптимальных значений, обеспечивающих ведение процесса с максимальной производительностью и минимальной энергоемкостью [5, 6].

Список литературы

1. Принципы оптимизации процесса струйного измельчения / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, К.А. Левченко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 51(92). – С. 82-91.
2. Интенсификация процесса струйного измельчения на основе анализа акустических параметров / Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, И.А. Шуляк, Ю.Г. Соболевская // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – №2(54). – С. 15-19.
3. Акустический мониторинг работы струйных мельниц различного типоразмера / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, и др. // Вестник НТУ "ХПИ". – 2011. – Вып. 50. – С. 3-10.
4. Горобец Л.Ж., Прядко Н.С. Акустические параметры оптимизации процесса струйного измельчения // Зб. наукових праць ПолНТУ. – 2012. – Вип. 2(32). – С. 128-136.
5. 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.
6. Патент № 98405 Спосіб регулювання газоструминного подрібнення / Пілов П.І., Горобець Л.Ж., Коваленко М.Д., Стрельников Г.А., Прядко Н.С. / опубл. 10.05.2012, Бюл. №9, заявка № 201100939, опубл. 28.01.2011.

© Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Краснопер В.П., Бовенко В.Н., Цыбулько Л.А., 2013

*Надійшла до редколегії 21.01.2013 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*