

Л.Ж. ГОРОБЕЦ, д-р техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет"),

Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Институт технической механики НАНУ и ГКАУ),

П.А. БАКУМ

(Україна, Дніпропетровськ, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КИНЕТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫШЛЕННОГО СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Постановка проблемы. Актуальной задачей технологии струйного измельчения является изучение кинетики процесса с применением акустического мониторинга зоны помола, что позволит открыть возможности оптимизации этого процесса на основе установления связей энергетических и акустических параметров. Выявление эффектов измельчения (диспергирования) методом акустической эмиссии проводится на основе сопоставления акустических параметров с производительностью мельницы, размерами частиц и величиной удельной поверхности измельченного продукта.

В работах [1, 2] установлены взаимосвязи технологических и акустических параметров с показателями струйного измельчения цирконового концентрата в условиях работы промышленной струйной мельницы на Вольногорском горно-металлургическом комбинате (ВГМК). Показано, что на различных стадиях технологии струйного измельчения, включая подачу в струю материала, изменение содержания в струях твердой фазы, размера частиц, наблюдаются закономерные изменения счета акустических сигналов (АС) и распределений по величине амплитуд. Изменение плотности потока частиц в струях, от которой зависит вероятность столкновений частиц в зоне помола, сопровождается изменением активности \dot{N} акустического излучения этой зоны (\dot{N} – активность – число сигналов в единицу времени).

Целью данной работы является изучение кинетики производительности мельницы и удельных энергозатрат в связи с акустическими характеристиками зоны помола. Основная задача исследования состояла в разработке акустических и комплексных акустико-технологических критериев для качественно-количественной оценки струйного измельчения и выявления режимов с минимальными энергозатратами при соблюдении требуемой дисперсности готового продукта.

Процесс струйного измельчения оценивали следующими показателями: производительностью мельницы G и дисперсностью измельченного продукта, характеризуемой удельной поверхностью $S_{y\partial}$ (на приборе Т-3 В.В. Товарова). Изменение дисперсности измельченных материалов проводилось путем регулирования частоты n вращения ротора отбойно-вихревого классификатора, входящего в систему струйной измельчительной установки.

Практика струйного измельчения показывает, что в стабильном режиме **Збагачення корисних копалин, 2015. – Вип. 60(101)**

Підготовчі процеси збагачення

классификации недопустима чрезмерная разгрузка струй, приводящая к выходу процесса из оптимального режима и повышенным удельным энергозатратам. Во избежание избыточных энергозатрат в технологическом процессе струйного измельчения цирконового концентрата до 63 мкм (остаток на контрольном сите $R_{63} \leq 3\%$) следует контролировать степень загрузки струй твердой фазой (разгрузка, недогрузка, перегрузка). Реализацию такого текущего контроля обеспечивает акустический мониторинг рабочих зон мельницы путем регистрации счета и амплитуд АС. Согласно принятой методике акустическую информацию получали с помощью пьезодатчика, соединенного с латунным волноводом, установленным в изучаемой зоне. Датчик акустических сигналов [7] далее соединяется с аналогово-цифровым преобразователем и компьютером. Период записи акустической информации для компьютерной обработки достаточен в диапазоне 0,1-1 с.

При испытаниях промышленной мельницы суммарная акустическая активность зоны помола изменялась в диапазоне: $N_{\Sigma} = (1,3 \dots 2,3) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ [5]. При определении акустической активности \dot{N}_{Σ} из суммарного счета N_{Σ} АС за период τ исключался фоновый шум струй энергоносителя $\dot{N}_{\Sigma} = (N_{\Sigma} - Nx) / \tau$ с целью соответствия этого параметра реальному числу соударений частиц в зоне помола. Здесь Nx – число сигналов, имп/с, характеризующих режим истечения струй без подачи материала в мельницу, т.е. режим "холостого" хода, амплитуда АС менее 2 мВ.

Ранее проведенными исследованиями [3] была установлена связь размера \bar{d} (мкм) частиц и удельной поверхности $S_{y\partial}$ продукта с величиной A_{\max} (мВ) максимальной амплитуды в спектрах регистрируемых сигналов: $\lg A_{\max} = 1,47 \lg d + 0,05$; $\lg A_{\max} = -4,08 \lg S_{y\partial} + 14,93$. За максимальное значение A_{\max} амплитуды принимали наибольшую величину, характеризующую не менее 1% от суммарного счета сигналов.

Полученные в экспериментах акустические и технологические характеристики струйного измельчения предлагается использовать как основу для расчета технологической и акустической энергоемкости измельчения и диспергирования циркона.

На рис. 1 приведен алгоритм акустического мониторинга струйного измельчения, включающий накопление необходимой информации для обработки акустических и технологических опытных данных с получением расчетных значений технологической и акустической энергоемкости измельчения и диспергирования циркона по следующим показателям:

- $E_{y\partial}$ (Дж/г) – технологическая энергоемкость измельчения $E_{y\partial} = N/G$, N – потребляемая мощность измельчительной установки;
- E_s (Дж/см²) – технологическая энергоемкость диспергирования $E_s = E_{y\partial}/S_{y\partial}$;
- $\mathcal{E}_N^{изм}$ (имп/г) – акустическая энергоемкость измельчения $\mathcal{E}_N^{изм} = \dot{N}_{\Sigma}/G$;
- \mathcal{E}_N^{discn} (имп/см²) – акустическая энергоемкость диспергирования $\mathcal{E}_N^{discn} = \mathcal{E}_N^{изм}/S_{y\partial}$.

Підготовчі процеси збагачення

Предложенная методика оценки акустической энергоёмкости опробована при экспериментальных исследованиях струйного измельчения в условиях ВГМК. На рис. 2 показана зона помола струйная мельница ВГМК с волноводом и датчиком акустической системы мониторинга.

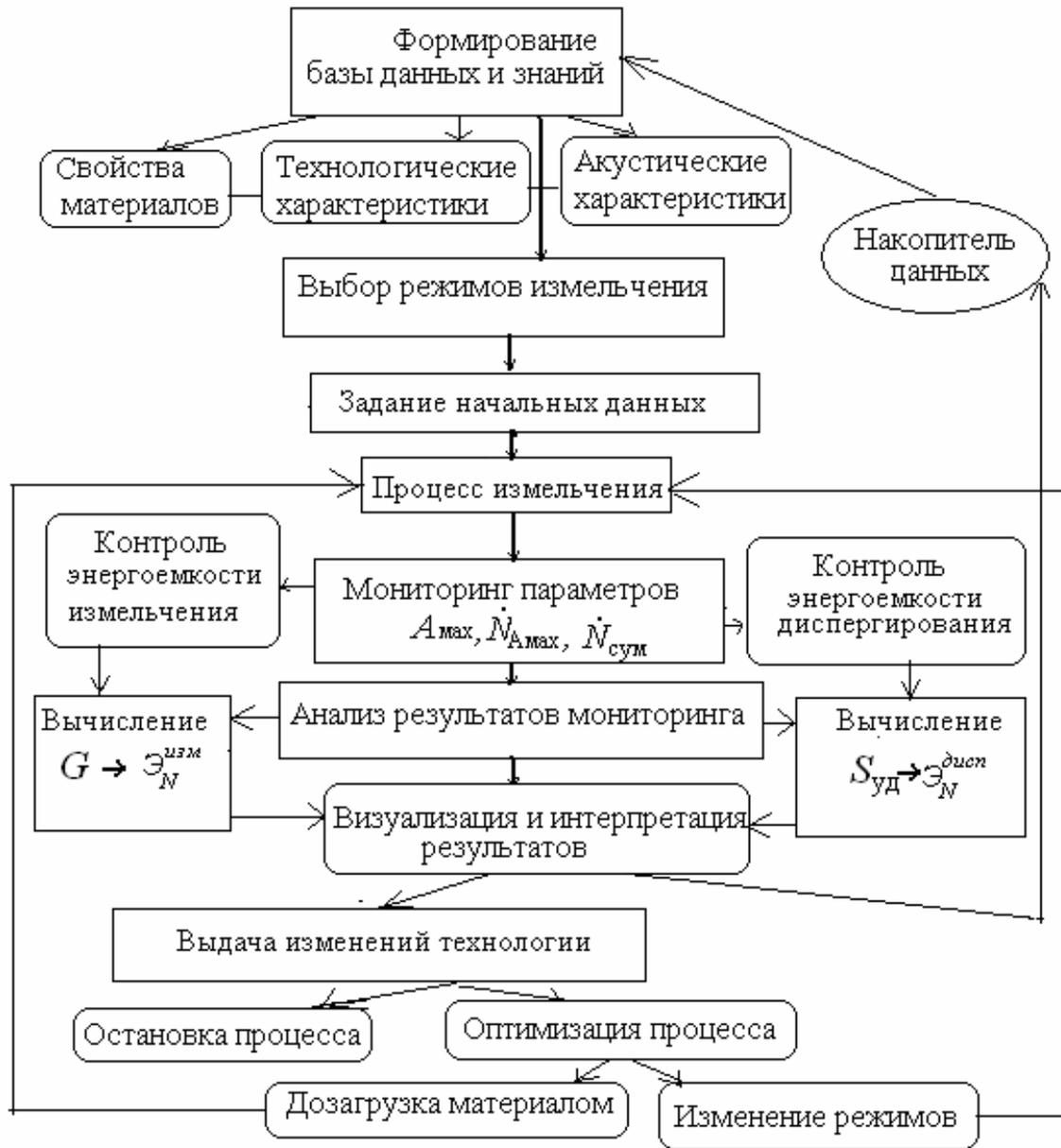


Рис. 1. Алгоритм определения акустической энергоёмкости измельчения и диспергирования

Підготовчі процеси збагачення

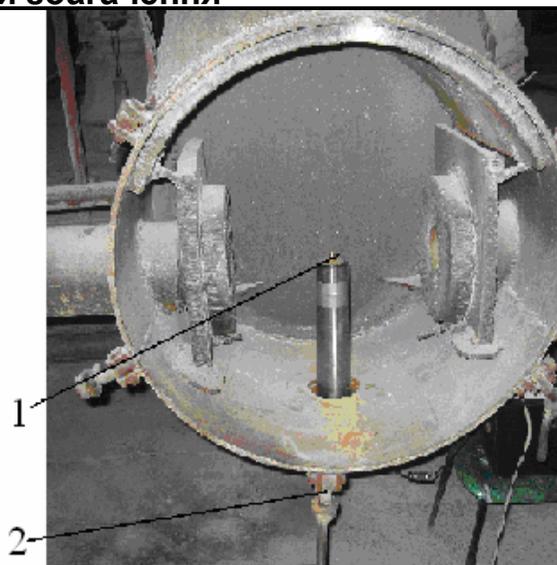


Рис. 2. Общий вид зоны помола промышленной мельницы с волноводом (1) и датчиком (2), фиксирующим акустическое излучение в ходе мониторинга процесса

В таблице приведены результаты контрольных промышленных испытаний струйного измельчения цирконового концентрата (2012-2015 гг.) в условиях Вольногорского горнометаллургического комбината с применением акустического мониторинга зоны помола. Крупность исходного цирконового концентрата составляла 40-160 мкм при содержании в нем класса 63...125 мкм порядка 90%. Крупность измельченного продукта марки КЦП-63 контролировалась величиной остатка на сите 63 мкм и составляла порядка $R_{63}=1...3,7\%$, при этом удельная поверхность изменялась в диапазоне $S_{y\partial} = 1500...2000 \text{ см}^2/\text{г}$. Производительность мельницы по готовому продукту изменялась в пределах $G = 700...1400 \text{ кг/ч}$. Оценивая реальные энергозатраты (мощность привода компрессора составляет $N = 285 \text{ кВт}$), рассчитываем показатели оценки технологической энергоемкости измельчения и диспергирования циркона.

Результаты промышленного акустического мониторинга с оценкой технологических и энергетических показателей измельчения и диспергирования цирконового концентрата

$G, \text{ кг/ч}$	$S_{y\partial}, \text{ см}^2/\text{г}$	$\mathcal{E}_N^{\text{дисп}} \text{ имп/см}^2$	$\mathcal{E}_N^{\text{изм}} \text{ имп/г}$	$E_s, \text{ Дж/см}^2$	$E_{y\partial}, \text{ Дж /г}$
1	2	3	4	5	6
Оптимальный режим					
1044	1970	0,39	759	0,49	983
1062	2021	0,39	779	0,48	966
1272	2054	0,32	651	0,39	807
1062	2021	0,37	739	0,48	966
1416	1753	0,22	381	0,41	725
1219	1809	0,26	473	0,47	842
1406	1809	0,23	410	0,4	730
1138	1861	0,3	557	0,49	902
990	1496	0,32	475	0,69	1036
1044	1599	0,41	653	0,61	983
1053	1668	0,36	594	0,58	974

Підготовчі процеси збагачення

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6
1026	1778	0,32	562	0,56	1000
Неоптимальный режим					
738	1815	0,62	1122	0,77	1390
734	1547	0,57	882	0,9	1397
711	1691	0,49	831	0,85	1443
711	1477	6	879	0,98	1443
711	1521	0,66	1003	0,95	1443
720	1699	0,39	660	0,84	1425

На рис. 3 отражена кинетика технологических показателей и удельных энергетических показателей измельчения и диспергирования.

На графике обозначены режимы измельчения (а) в различных состояниях загрузки струй твердой фазой (разгрузка, недогрузка, перегрузка, рабочий режим), при этом пунктирными линиями обозначены области энергетически оптимальных режимов загрузки струй, при которых достигаются максимумы производительности по готовому продукту. Установлено, что диапазон изменения в опытах значений минимальной технологической энергоемкости составляет $E_{y\partial} = 700 \dots 1000$ Дж/г, $E_s = 0,4 \dots 0,7$ Дж/см² ($G = 1000 \dots 1400$ кг/ч).

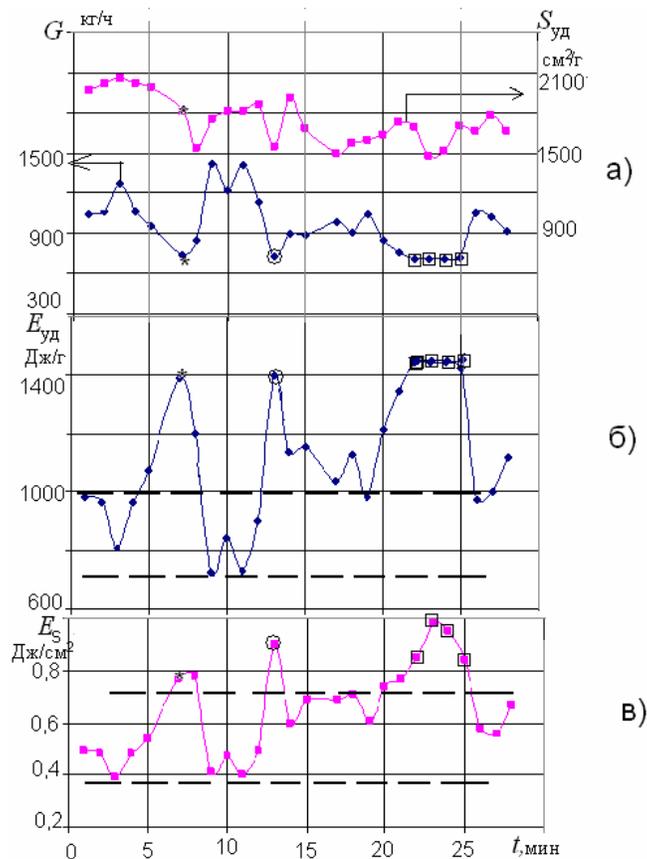


Рис. 3. Кинетика технологических (G , $S_{уд}$) и удельных энергетических показателей струйного измельчения $E_{уд}$ и диспергирования E_s :

* – перегрузка; O – разгрузка; • – рабочий режим; □ – недогрузка;
 – – – области оптимальной энергоемкости диспергирования и измельчения

Підготовчі процеси збагачення

На рис. 4 представлена кинетика удельной акустической энергоемкости измельчения ($\mathcal{E}_N^{изм}$, имп/г) и диспергирования ($\mathcal{E}_N^{дисп}$, имп/см²), Установлено, что диапазон минимальных значений акустической энергоемкости составляет $\mathcal{E}_N^{изм} = 400 \dots 700$ имп/г, $\mathcal{E}_N^{дисп} = 0,4 \dots 0,6$ имп/см².

Анализ полученных результатов позволяет считать реальным значительное снижение удельных энергозатрат на измельчение и диспергирование за счет поддержания оптимальной загрузки струй материалом.

Так максимальная экономия энергии на процесс измельчение может составить до 190 кВт·ч/т при $S_{уд}$ порядка 1600-1800 см²/г, а на процесс образование новой поверхности продукта ($\Delta S_{уд} = 800 \dots 1000$ см²/г) может составить до 140 кВт·ч/т.

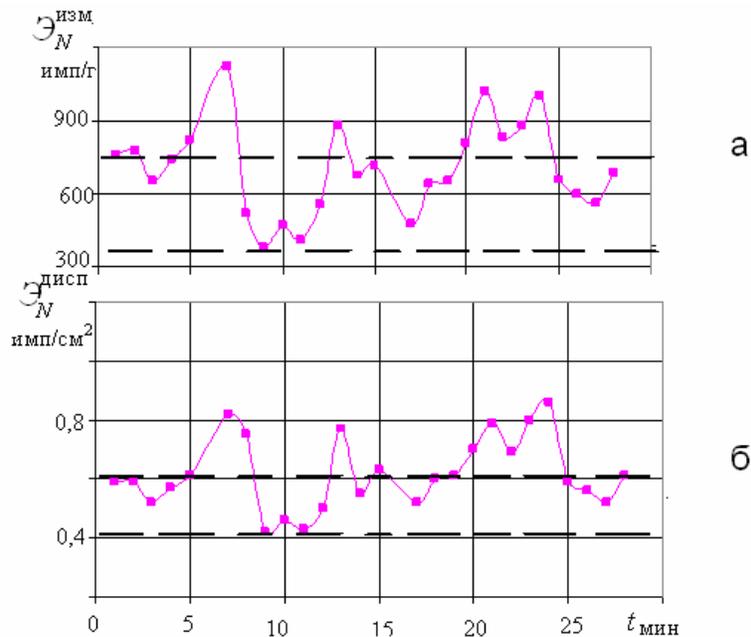


Рис. 4. Кинетика удельных показателей ($\mathcal{E}_N^{изм}$, $\mathcal{E}_N^{дисп}$) акустической энергоемкости струйного измельчения

На основе результатов исследований предложены способы акустического контроля и управления процессом струйного измельчения.

Сущность способа, оформленного патентом Украины [7], состоит в следующем. 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 изменение загрузки струй материалом.

Для реализации другого способа [8] 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 подача материала на измельчение и при необходимости режим работы классификатора. Промышленное опробование принципов регулирования загрузки струй материалом по предложенным способам показало возможность увеличения производительности струйной мельницы на 20-25%.

Выводы

Исследования кинетики технологических и энергетических параметров струйного измельчения циркона в условиях ВГМК показали перспективность применения акустического мониторинга для решения задачи снижения энергоемкости процесса тонкого измельчения. Установлено, что система оптимизации работы струйной мельницы должна быть основана на непрерывном мониторинге акустических параметров (\dot{N}_Σ , A_{\max}), используемых для расчета энергоемкости диспергирования $\mathcal{E}_N^{\text{дисп}}$ и измельчения $\mathcal{E}_N^{\text{изм}}$. Поддержание оптимальных параметров в процессе работы мельницы предлагается реализовать путем непрерывного контроля акустических параметров зоны помола и управления загрузкой измельчаемого материала на основе поиска оптимальной насыщенности струй твердой фазой.

Список литературы

1. Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Прядко Н.С. Акустический метод исследования процесса измельчения // Обогащение руд. – 2013. – № 3.– С. 18-24.
2. Результаты акустического мониторинга промышленной струйной установки / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др. // Техническая механика. – 2011. – № 2. – С. 93-100.
3. Принципы акустических основ тонкого измельчения / Н.С. Прядко, Л.Ж. Горобец, К.А. Левченко и др. // Вестник НТУ "ХПИ". – 2013. – Вып. 27 (1070). – С. 71-81.
4. Прядко Н.С. Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 6. – С. 46 – 52.
5. Возможности акустического прогнозирования гранулометрии частиц при струйном измельчении / Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, К.А. Левченко и др. // Вестник НТУ "ХПИ". – 2014. – Вып. 52(1094). – С. 10-18.
6. Акустический метод оценки энергозатрат на струйное измельчение / Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, В.П. Краснопер и др. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – № 56(97). – С. 94-102.
7. Патент на винахід № 104427 Україна, МПК В02С 25/00. Спосіб моніторингу струминного подрібнення і газоструминний млин / Пілов П.І., Горобець Л.Ж., Прядко Н.С.; заявник і патентоволодар Національний гірничий університет. – а 201016004; заявл. 31.12.2010; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. – 6 с.
8. 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., Бакум П.А., 2015

*Надійшла до редколегії 24.03.2015
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*