

**Л.Ж. ГОРОБЕЦ**, д-р техн. наук

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

**Н.С. ПРЯДКО**, канд. техн. наук

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

**В.П. КРАСНОПЕР**

(Україна, Днепропетровск, Вольногорский горнометаллургический комбинат),

**П.А. БАКУМ**

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

### **АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА СТРУЙНОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ**

*Постановка проблемы.* Процесс получения высокодисперсных порошков в струйных измельчительных установках сопровождается значительным расходом электрической энергии, особенно в практике использования в качестве энергоносителя холодного сжатого воздуха.

Решение проблемы снижения затрат энергии в процессе тонкого измельчения весьма актуально, поскольку согласно теории удельные энергозатраты растут с уменьшением размера частиц в соответствии с закономерностью динамического размерного эффекта  $W_v \cdot d \cong \text{const}$ , характеризующей произведение плотности энергии  $W_v$  при разрушении на размер  $d$  разрушения [1, 2].

С учетом новых представлений о КПД диспергирования строго определенная часть ( $10^{-2}$ - $10^{-3}$ ) энергии, накопленной частицами в актах нагружения (ударом, сжатием, истиранием), превращается в акустическую энергию. На этой физической основе с целью оптимизации процесса измельчения создается и реализуется текущий акустический контроль зоны помола струйной мельницы [3-5].

Оптимальный режим измельчения характеризует условие достижения минимальных значений энергозатрат с соблюдением требуемой тонины готового продукта [6]. Полагаем, что минимум энергозатрат в процессах тонкого измельчения на практике достигим в режимах, обеспечивающих минимальную величину  $S_{y0}$  удельной поверхности готового продукта при соблюдении требуемой величины остатка на контрольном сите.

В настоящее время текущий контроль дисперсности измельченного продукта не производится из-за отсутствия метода реальной или прогнозной оценки величины  $S_{y0}$  удельной поверхности в процессе струйного измельчения. Возможность своевременного мониторинга в измельчаемом материале количества наиболее тонких фракций (менее нескольких единиц микрометра) также отсутствует.

*Целью данной работы* обоснование метода оценки энергозатрат на струйное измельчение с применением акустического мониторинга работы струйной мельницы. Основу метода составили результаты исследований акустических параметров в связи с технологическими и энергетическими показателями мельницы в различной области дисперсности получаемого готового продукта.

## Підготовчі процеси збагачення

*Основные результаты исследований.* Анализировались результаты струйного измельчения цирконового концентрата в промышленной мельнице Вольногорского горнометаллургического комбината производительностью 1-1,4 т/ч. Энергоносителем служил сжатый воздух давлением до 0,6 МПа.

Процесс измельчения оценивали следующими показателями: производительностью мельницы  $G$  и дисперсностью измельченного продукта, характеризуемой удельной поверхностью  $S_{y\partial}$  (на приборе Т-3 В.В. Товарова). Кондиционная крупность ( $R_{63} \leq 3\%$ ) готового продукта контролировалась остатком на сите с размером отверстий 63 мкм. Дисперсность измельченного продукта регулировалась частотой  $n$  вращения ротора отбойно-вихревого классификатора в пределах  $n = 80-170 \text{ мин}^{-1}$ .

Практика струйного измельчения редкометалльных концентратов циркона и дистена показала, что важным фактором, определяющим производительность мельницы, является неоднозначное состояние загрузки струй материалом. При прочих равных условиях масса материала в струе может быть достаточной или недостаточной для достижения требуемой скорости и эффективного разрушения частиц в зоне помола. В зависимости от состояния загрузки струй режим измельчения называют рабочим, разгрузочным или перегрузкой. Последний не допустим, т.к. нарушается режим пневмотранспортирования материала в системе мельницы.

В этой связи в процессе анализа работы промышленной струйной мельницы изучалась взаимосвязь производительности и дисперсности продукта в различных режимах загрузки струй. На рис. 1 показаны зависимости производительности  $G$  мельницы ( $P = 0,6 \text{ МПа}$ ) от дисперсности  $S_{y\partial}$  измельченного циркона в рабочем режиме, при разгрузке струй и работе с максимальной производительностью.

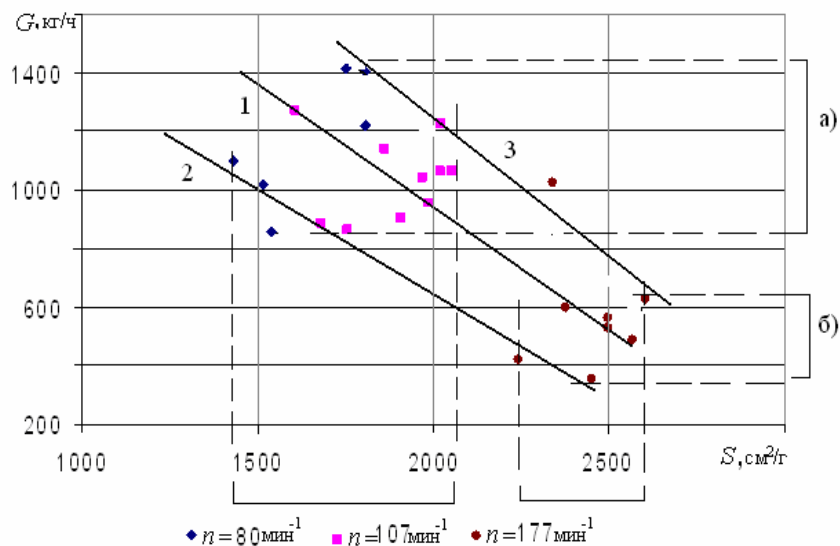


Рис. 1. Изменение производительности  $G$  струйной мельницы в различных диапазонах дисперсности  $S_{y\partial}$  измельченного циркона и режимах загрузки струй: рабочий режим (1), режим разгрузки струй (2), режим (3) максимальной производительности

## **Підготовчі процеси збагачення**

Графики показывают, что с ростом дисперсности продукта величина  $G$  закономерно уменьшается, в частности, с повышением  $S_{y\partial}$  от 1500 до 2600 см<sup>2</sup>/г производительность  $G$  уменьшается от 1400 до 400 кг/ч. Можно отметить, что степень изменения производительности мельницы при переходе на более высокую дисперсность кондиционного продукта ( $R_{63} = \leq 3\%$ ) зависит от уровня  $S_{y\partial}$ .

Зависимости  $G(S_{y\partial})$ , показанные на рис. 1, позволяют заключить, что график 1 характеризует оптимальные состояния струй в режимах максимальной производительности мельницы при кондиционной дисперсности измельченного циркона.

На рис. 1 пунктиром обозначены интервалы изменения удельной поверхности порошков при близких уровнях производительности, с одной стороны, и интервалы изменения производительности при равнозначной дисперсности продуктов, с другой стороны. Видно, что в диапазоне повышенной дисперсности ( $S_{y\partial} = 2500-2600$  см<sup>2</sup>/г) изменение производительности ( $G = 600-350$  кг/ч) не так велико, как при получении грубодисперсных порошков ( $G = 1400-800$  кг/ч при  $S_{y\partial} = 1700-1800$  см<sup>2</sup>/г).

Это означает, что в низкочастотных режимах классификации ( $n = 80-100$  мин<sup>-1</sup>) из-за малой кратности циркуляции материала в системе мельницы нельзя допускать чрезмерную разгрузку струй, из-за которой снижается производительность и вероятны повышенные удельные энергозатраты.

Во избежание избыточных энергозатрат в технологическом процессе струйного измельчения ( $R_{63} \leq 3\%$ ) целесообразно применить акустический мониторинг, во-первых, дисперсности ( $S_{y\partial}$ ) измельченного продукта, и, во-вторых, режима загрузки струй твердой фазой (разгрузка, недогрузка, перегрузка). Мониторинг второго фактора позволит своевременно предотвратить перемещение графика 3 в ситуации графиков 1 или 2 (рис. 1).

В данной работе снижение энергоемкости тонкого измельчения предлагается осуществить посредством применения акустического мониторинга двух рабочих зон мельницы: в помольной камере и в трубопроводе на выходе газозвеси из классификатора в пылеосадитель. Согласно принятой методике акустическую информацию (счет и спектры амплитуд акустических сигналов) получали с помощью пьезодатчика, соединенного с латунным волноводом, установленным в изучаемой зоне. Датчик акустических сигналов (АС) [3] далее соединяется с аналогово-цифровым преобразователем и компьютером. Период записи акустической информации (при частоте 400 кГц) для компьютерной обработки достаточен в диапазоне 0,1-1 с.

Исследования показали, что на различных стадиях технологии струйного измельчения, включая подачу в струю материала, изменение содержания в струях твердой фазы, размера частиц, происходят изменения счета акустических сигналов и распределений по величине их амплитуд. Применение акустического мониторинга зоны помола позволяет устанавливать суммарную активность  $\dot{N}_{\Sigma}$  сигналов в зоне помола и частный счет  $\dot{N}_{мин}$  сигналов с условно минимальными ( $A_{мин} \cong 2-5$  мВ) значениями амплитуды. За условно минимальную амплитуду  $A_{мин}$  принимали величину, превышающую амплитуду сигналов шума

## Підготовчі процеси збагачення

струи энергоносителя без подачи твердой фазы ("холостой струи"). Для исследуемых зон струйной мельницы эта величина изменяется от  $A_{мин} \cong 2$  мВ на выходе классификатора до  $A_{мин} \cong 5$  мВ – в помольной камере. На рис. 2 показаны записи акустических сигналов исследуемых зон при различных режимах классификации и, соответственно, при различной дисперсности продукта.

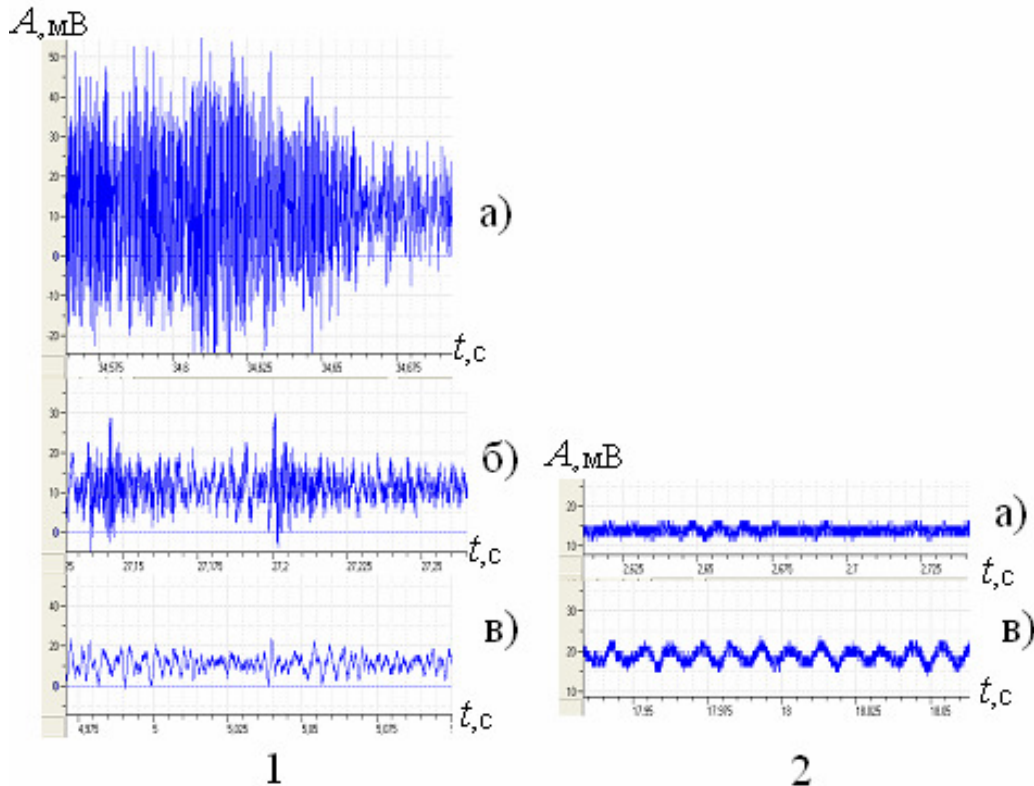


Рис. 2. Записи акустических сигналов зон измельчения (1) и транспортирования (2) продукта в различных режимах работы классификатора:  
а)  $n = 80$  мин<sup>-1</sup>; б)  $n = 107$  мин<sup>-1</sup>; в)  $n = 170$  мин<sup>-1</sup>

Проведем анализ изменений производительности мельницы и удельной поверхности измельченного цирконового концентрата в связи с характеристиками акустического излучения рабочих зон мельницы. На рис. 3 показано изменение максимальной амплитуды  $A_{max}$  с производительностью мельницы и дисперсностью продукта. При этом за максимальное значение  $A_{max}$  амплитуды принимали наибольшую величину, характеризующую не менее 1% от суммарного счета  $\dot{N}_{\Sigma}$  (с<sup>-1</sup>) сигналов.

Для оценки акустической энергоемкости измельчения выведены коэффициенты  $\mathcal{E}_{изм}$  (имп/г) и  $\mathcal{E}_{дисп}$  (имп/см<sup>2</sup>), значительно отличающиеся для оптимального и неоптимального режима измельчения:

1) акустический показатель  $\mathcal{E}_{изм}$  (имп/г) энергоемкости измельчения

$$\mathcal{E}_{изм} = \dot{N}_{\Sigma} / G;$$

## Підготовчі процеси збагачення

2) акустический показатель  $\mathcal{E}_{дисп}$  (имп/см<sup>2</sup>) энергоемкости диспергирования

$$\mathcal{E}_{дисп} = \dot{N}_{\Sigma} / G / S_{уд}, \text{ имп/см}^2.$$

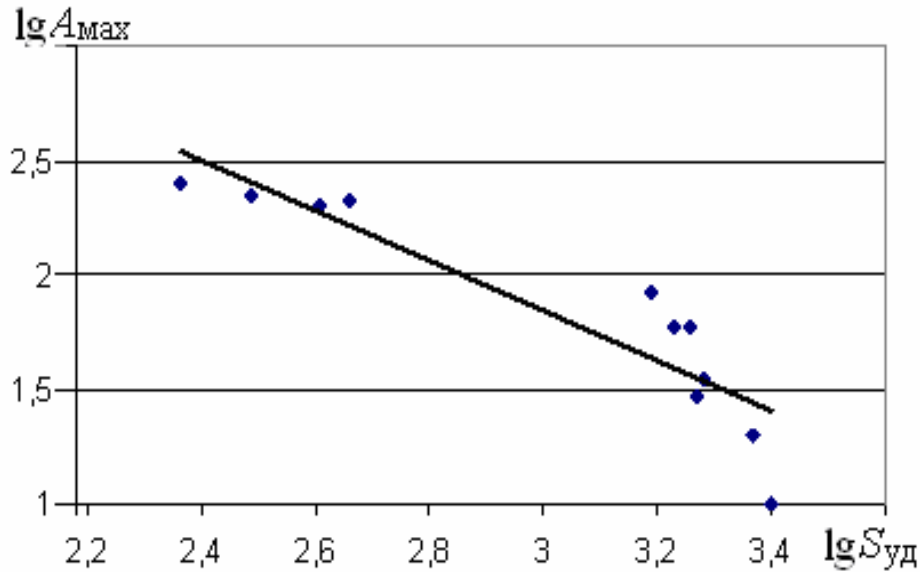


Рис. 3. Влияние уровня дисперсности ( $S_{уд} = 230-2500 \text{ см}^2/\text{г}$ ) на величину  $A_{max}$  (мВ) в диапазоне частот вращения ротора классификатора  $n = 80-177 \text{ мин}^{-1}$

На рис. 4, 5 иллюстрируются тенденции снижения удельных акустических энергозатрат  $\mathcal{E}_{изм}$  (имп/г) и  $\mathcal{E}_{дисп}$  (имп/см<sup>2</sup>) с повышением производительности мельницы. В таблице сведены эти технические результаты.

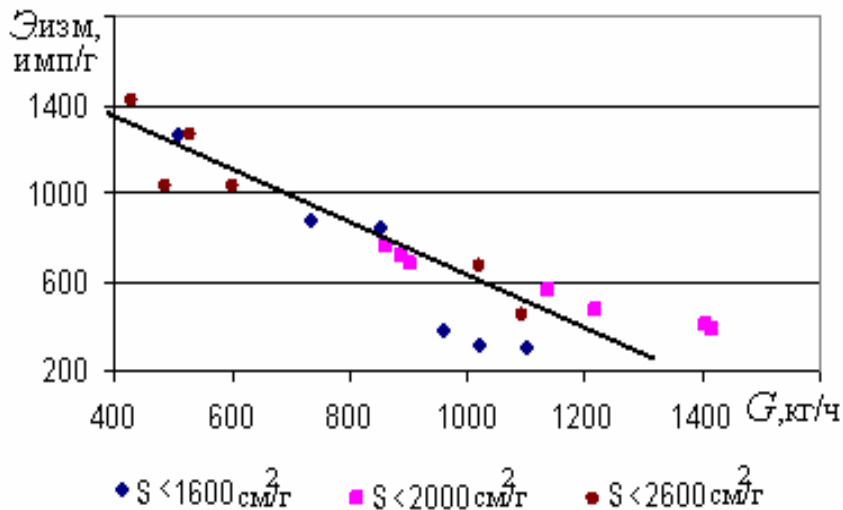


Рис. 4. Зависимости акустической энергоемкости измельчения от производительности мельницы при изменении дисперсности продукта в различных диапазонах

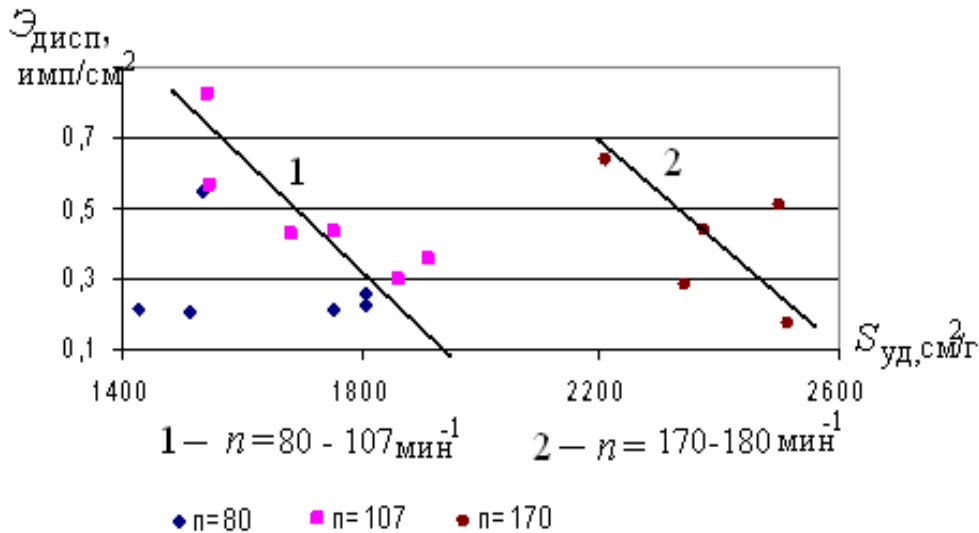


Рис. 5. Зависимости акустической энергоёмкости диспергирования от уровня дисперсности продукта в различных диапазонах частоты вращения классификатора

Показатели оценки акустической ( $\mathcal{E}_{изм}$ ,  $\mathcal{E}_{дисп}$ ) и технологической ( $E_{уд}$ ,  $E_s$ ) энергоёмкости измельчения и диспергирования циркона в различных режимах работы классификатора промышленной мельницы.

$G$ , кг/ч	$S_{уд}$ , см <sup>2</sup> /г	$\mathcal{E}_{изм}$ , имп/г	$\mathcal{E}_{дисп}$ , имп/см <sup>2</sup>	$E_{уд}$ , кВт-ч/т	$E_s$ , кВт-ч/ м <sup>2</sup>
Оптимальный режим, $n = 80 - 107 \text{ мин}^{-1}$					
1416	1753	381,3559	0,217545	201,2712	0,00115
1406	1809	409,6728	0,226464	202,7027	0,00112
1138	1861	556,7663	0,299176	250,4394	0,00135
902,4	1911	678,1915	0,354888	315,8245	0,00165
1020	1515	321,1765	0,211998	279,4118	0,0018
Оптимальный режим, $n = 170 - 180 \text{ мин}^{-1}$					
1094,4	2513	450,668	0,17933	260,4167	0,00104
1022,4	2342	669,0141	0,28566	278,7559	0,00119
624	2605	1038,462	0,39864	456,7308	0,00175
Неоптимальный режим, $n = 80 - 107 \text{ мин}^{-1}$					
512	1542	1265,625	0,820768	556,6406	0,0036
854	1536	843,0913	0,548888	333,7237	0,0022
734,4	1547	882,3529	0,570364	388,0719	0,0025
Неоптимальный режим, $n = 170 - 180 \text{ мин}^{-1}$					
432	2209	1416,667	0,641316	659,7222	0,00298
354	2451	1830,508	0,746841	805,0847	0,00328

Из таблицы видно, что значения акустической энергоёмкости измельчения  $\mathcal{E}_{изм}$  (имп/г) и диспергирования и  $\mathcal{E}_{дисп}$  (имп/см<sup>2</sup>) отличаются для оптимального и неоптимального режима измельчения. Так, при изменении производительности  $G$  от 800 до 1400 кг/ч ( $n = 80 - 107 \text{ мин}^{-1}$ ) разница  $\Delta \mathcal{E}_{изм}$  в энергозатратах составляет величину  $\Delta \mathcal{E}_{изм} = 843 - 381 = 462$  имп/г. Переход к оптимальным условиям диспергирования позволяет уменьшить удельные энергозатраты в  $\Delta \mathcal{E}_{дисп} = 0,549/0,217 = 2,5$  раза.

## Підготовчі процеси збагачення

Приводя к реальным энергозатратам (мощность привода компрессора составляет  $N = 285$  кВт, производительность  $G_{опт} = 1,02$  т/ч,  $G_{неопт} = 0,43$  т/ч), получим расчетную среднюю величину экономии удельных энергозатрат  $\Delta E_{уд} = 659,7 - 278,7 = 381$  кВт-ч/т при получении порошка с удельной поверхностью  $S_{уд} = 2200-2300$  см<sup>2</sup>/г.

На рис. 6 показана кинетика удельных показателей энергозатрат в технологической ( $E_{уд}$ ,  $E_s$ ) и акустической ( $\mathcal{E}_{изм}$ ,  $\mathcal{E}_{дисп}$ ) оценке эффектов измельчения и диспергирования при различной производительности промышленной струйной мельницы и получении продуктов различной дисперсности.

Графики иллюстрируют текущие колебания технологических и энергетических показателей мельницы в результате работы с недогрузкой материалом струй или избыточной их разгрузкой, а также в режимах классификации с повышенной величиной ( $n > 107$  мин<sup>-1</sup>). Анализ показывает возможность снижения удельных величин технологических энергозатрат в 2-2,5 раза с использованием опытных данных акустического мониторинга и расчетных значений  $\mathcal{E}_{изм}$  и  $\mathcal{E}_{дисп}$ .

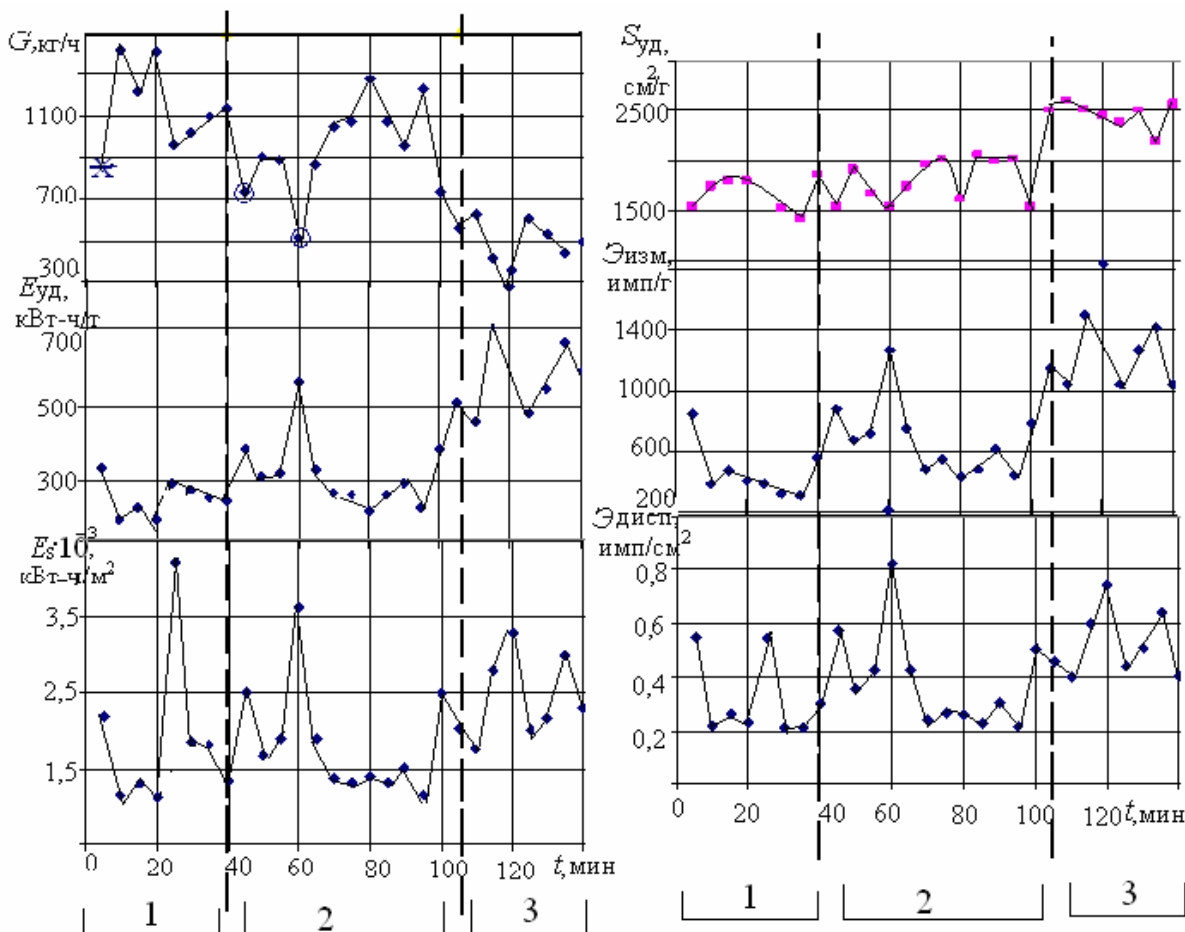


Рис. 6. Кинетика технологических и акустических значений энергозатрат на измельчение и диспергирование для промышленной струйной мельницы:

1 –  $n = 80$  мин<sup>-1</sup>; 2 –  $n = 107$  мин<sup>-1</sup>; 3 –  $n = 170$  мин<sup>-1</sup>.

✕, ⊙, ♦ – недогрузка, разгрузка, рабочий режим

## Підготовчі процеси збагачення

На рис. 7 показаны линейные зависимости удельных показателей энергозатрат на измельчение и диспергирование от соответствующих акустических показателей при получении кондиционного продукта ( $R_{63} \leq 3\%$ ) различной дисперсности. Вид используемого энергетического показателя ( $E_{y\partial}$ ,  $E_s$ ) зависит от предпочтительной технологической задачи: достижение максимальной производительности мельницы (вариант рис. 7а) или поддержание максимальной дисперсности получаемого продукта (вариант рис. 7б).

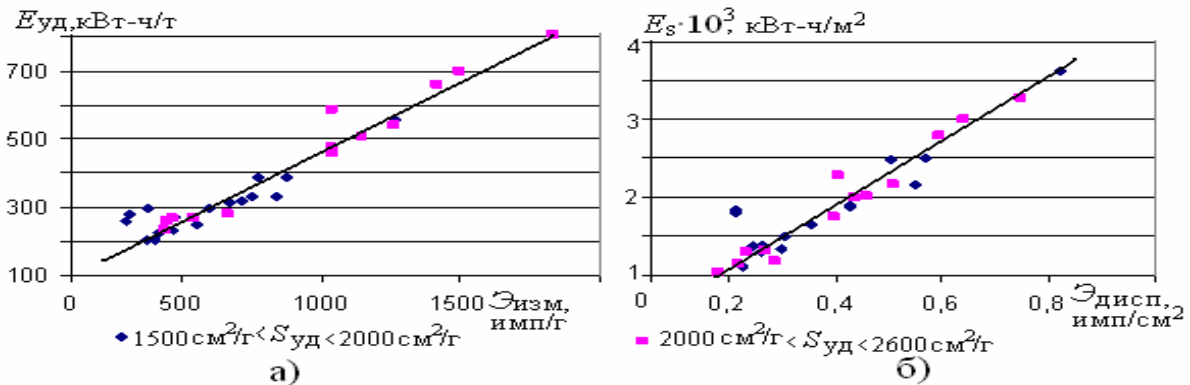


Рис. 7. Связи удельных технологических и акустических показателей энергозатрат на измельчение и диспергирование

**Выводы.** Основу метода оценки энергозатрат при струйном измельчении составляют связи технологических, акустических и энергетических показателей работы мельницы в различных областях дисперсности получаемого готового продукта. Акустический метод оценки энергозатрат на струйное измельчение включает установление акустических показателей энергоемкости измельчения  $\mathcal{E}_{изм}$  (имп/г) и диспергирования  $\mathcal{E}_{дисп}$  (имп/см<sup>2</sup>).

На примере работы промышленной струйной мельницы с получением измельченного цирконового концентрата крупностью 63 мкм установлена возможность снижения энергопотребления в 2-2,5 раза путем оптимизации загрузки струй энергоносителя, с одной стороны, и поддержания на минимальном уровне удельной поверхности готового продукта, с другой стороны. Работа мельницы в оптимальном режиме позволит уменьшить энергопотребление струйной мельницы производительностью 800-1400 кг/ч на 150-200 кВт·ч/т для тонкодисперсного продукта ( $2000 < S_{y\partial} < 2600$  см<sup>2</sup>/г) и на 70-130 кВт·ч/т при получении грубодисперсного продукта ( $S_{y\partial} < 2000$  см<sup>2</sup>/г).

### Список литературы

1. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – Днепр-ск: НГУ, 2004. – 35 с.
2. Акустические и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко и др. // Известия вузов. Горный журнал. – 2009. – № 4. – С. 115-121.
3. Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Прядко Н.С. Акустический метод исследования процес-



## **Підготовчі процеси збагачення**

са измельчения // Обогащение руд. – 2013.– № 3. – С. 18-24.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

© Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Краснопер В.П., Бакум П.А., 2014

*Надійшла до редколегії 21.02.2014 р.*

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