

П.И. ПИЛОВ, докт. техн. наук, проректор, НГУ, г. Днепропетровск,
Л.Ж. ГОРОБЕЦ, докт. техн. наук, проф., НГУ, г. Днепропетровск,
Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудн., ИТМ НАН Украины,
В.В. ГАЕВОЙ, канд. техн. наук, доц., НГУ, г. Днепропетровск,
Л.А. ЦЫБУЛЬКО, канд. техн. наук, доц., НГУ, г. Днепропетровск,
И.В. ВЕРХОРОБИНА, инж., ИГТМ НАН Украины, г. Днепропетровск

АКУСТИЧЕСКИЕ «ОБРАЗЫ» РЕЖИМОВ СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Встановлено акустичні параметри і критерії, які характеризують режими і ефективність струменевого подрібнення, з метою регулювання процесу.

Acoustic parameters and the criteria describing jet grinding modes and efficiency are established with the purpose of process regulation

Введение. При получении высокодисперсных порошков (более 0,6 – 1 м²/г) струйным способом весьма актуальна проблема поиска и поддержания оптимального режима измельчения в различных режимах загрузки струй измельчаемым материалом [1, 2].

Для исследования процесса измельчения применяется метод акустической эмиссии (АЭ) [3, 4].

Прогнозная оценка удельных энергозатрат на измельчение в условиях объемного сжатия модельных образцов горных пород осуществляется с использованием ряда параметров АЭ: скорости счета \dot{N} акустических сигналов (АС) на запредельной стадии деформирования и акустоэмиссионной эффективности разрушения N_ε ($N_\varepsilon = N/\varepsilon$, ε – деформация за пределом прочности).

Акустоэмиссионными признаками интенсивного измельчения называют увеличение средней \dot{N}_{cp} или максимальной \dot{N}_{max} скорости счета акустических сигналов за пределом прочности нагруженного образца.

Высокоинформативными акустическими параметрами являются: суммарный счет АС и активность АЭ в очагах разрушения (диспергирования), амплитудные распределения АС, косвенно характеризующие размеры частиц разрушенного продукта.

Установлена связь количества образованных мелких и тонких фракций

(менее 100 – 400 мкм) при разрушении сжатием пород от удельного N_V (на единицу объема) числа АС.

Целью работы является поиск акустических критериев оценки эффективности струйного измельчения. В процессе акустического мониторинга струйной мельницы решалась задача установления связей производительности и дисперсности готового продукта с акустическими параметрами при измельчении твердых сыпучих материалов.

Изложение результатов. Важными факторами струйного измельчения с равнозначными параметрами подаваемого энергоносителя (расход, давление, температура, скорость струй) являются количество загружаемой твердой фазы (загрузка мельницы) и крупность измельчающихся частиц.

В зависимости от этих факторов изменяется скорость и частота соударений частиц, влияющих на производительность мельницы.

В сущности, концентрация твердой фазы в струе при прочих равных условиях задает эффективность струйного измельчения, поскольку с увеличением количества материала в струе выше оптимальной концентрации уменьшается скорость разгона частиц в инжекторе и в результате меньшей скорости встречных ударов частиц снижается производительность мельницы.

Ранее проведенные исследования [3 – 7] показали целесообразность использования некоторых характеристик акустического излучения зоны помола (числа АС в единицу времени, амплитуды сигналов и их распределения по величине) для получения информации о преимущественных размерах частиц в струе, их гранулометрическом составе и количестве загрузки струй материалом.

В данной работе для измельчения использовалась противоточная струйная установка лабораторного типоразмера производительностью 2 – 30 кг/ч, энергоноситель – сжатый воздух среднего давления.

Производительность мельницы рассчитывалась на основе взвешивания готового продукта, осажденного в циклоне.

Масса порций загружаемого материала крупностью менее 2,5 мм составляла $m = 1$ кг, интервал их загрузки – 3 – 8 мин, длительность измельчения – 15 – 30 мин.

Акустическая активность измельчения измерялась с применением специального пьезодатчика, соединенного с латунным волноводом, установлен-

ным внутри помольной камеры мельницы.

Датчик АС сигналов, разработанный в МГТУ им. Баумана [4, 5], был соединен с аналогово-цифровым преобразователем и компьютером.

Методика обработки опытных данных акустического мониторинга состояла в следующем.

На различных стадиях заполнения помольной камеры материалом измерялось общее число N_{Σ} акустических сигналов различных амплитуд (период измерения АС – $\tau = 1$ с, период регистрации – 0,1 с).

Далее определялось число N_x сигналов, характеризующих режим истечения струй без подачи материала в мельницу (фоновый шум, режим «холостого» хода, амплитуда АС – менее 0,05 – 0,1В).

Разница ($N_{\Sigma} - N_x$) характеризует искомое число АС для исследуемого режима загрузки и производительности мельницы.

Полагаем, что величина активности \dot{N} (имп/с) акустического излучения пропорциональна реальному числу ударов частиц о волновод, поскольку из общего счета АС в расчетах исключается фоновый шум струй энергоносителя: $\dot{N} = (N_{\Sigma} - N_x) / \tau$.

При различных режимах работы струйной мельницы, отличающихся степенью загрузки струй твердой фазой, устанавливались различия амплитуд акустических сигналов (АС), измеряемых в зоне помола.

Акустическими «образами» измельчения будем называть далее комплекс акустических параметров и критериев, взаимодействие или соотношение которых характеризует режимы измельчения.

Применение акустического мониторинга позволило установить взаимосвязь производительности G (г/с) мельницы, акустической активности \dot{N} (имп/с) зоны помола и акустического показателя K_e (г/имп) эффективности измельчения.

Эффективность струйного измельчения оценивалась условным коэффициентом $K_{\varepsilon} = G / g \dot{N}$ (г/имп), характеризующим соотношение производительности G мельницы и акустической активности (в виде логарифма) АЭ зоны помола.

При неизменном режиме классификации (частота вращения ротора классификатора $n = const$, мин⁻¹) изменение G для одного и того же материала может быть обусловлено степенью отклонения насыщенности струй твердой фазой от оптимального уровня.

На рис. 1 иллюстрируется изменение во времени производительности мельницы по готовому продукту и акустического излучения зоны помола.

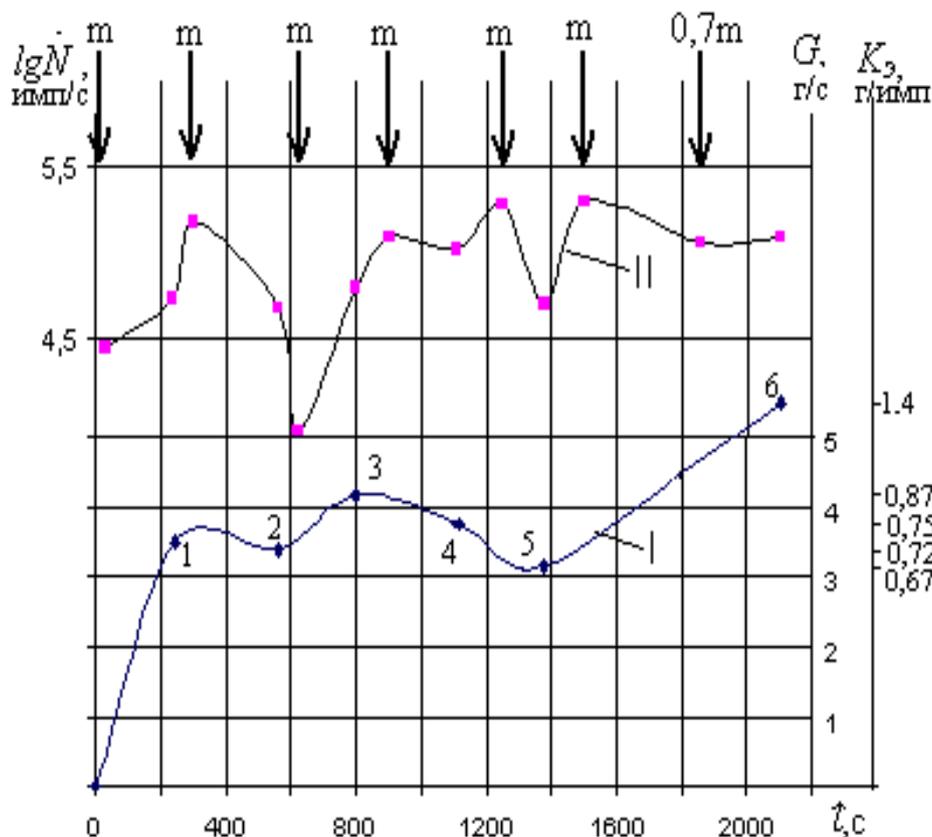


Рис. 1. Изменение производительности (I) и акустической активности (II) при струйном измельчении известняка

Стрелками обозначены моменты подачи порции материала.

Видно, что на этапе загрузки струй твердой фазой величина $lg \dot{N}$ увеличивается, затем в процессе измельчения уменьшается до поступления новой порции в струю.

Связь коэффициента $Kэ$ с производительностью мельницы при обработке различных материалов (циркон, шамот, известняк, бурый и газовый уголь) в аналогичных режимах измельчения ($n = 600 - 2000 \text{ мин}^{-1}$, давление воздуха $P = 0,3 \text{ МПа}$, активность АЭ $\dot{N} = 10^3 - 10^5 \text{ с}^{-1}$) показана на рис. 2, где $y = 0,26x - 0,03$ ($y - Kэ = G/lg \dot{N}$, г/имп, $x - G$, г/с).

Как показали исследования, в рабочих режимах струйной мельницы ($G = 1,6 - 5,5 \text{ г/с}$) величина $Kэ$ для различных материалов изменяется в пределах $0,3 - 1,5$.

Поиск оптимального уровня загрузки струй материалом, обеспечивающего максимальную производительность мельницы (и соответственно минимальные

энергозатраты), проводился по диапазону активности \dot{N} акустического излучения зоны помола.

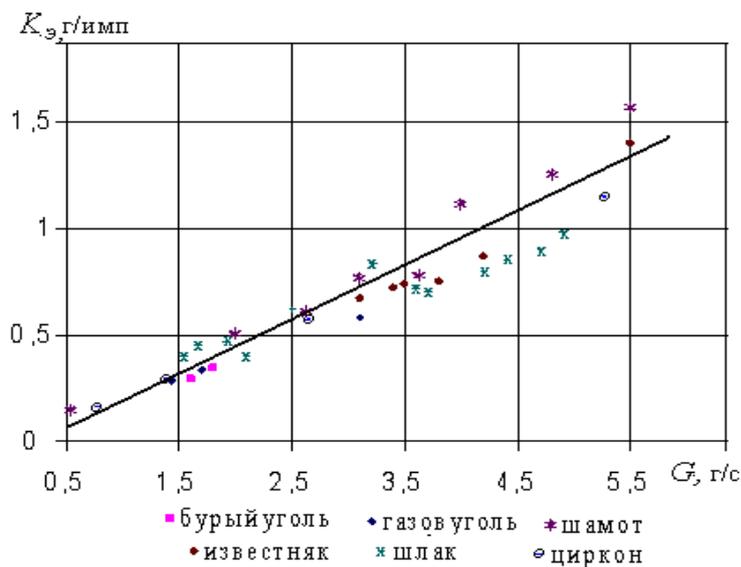


Рис. 2. Зависимость показателя акустической эффективности $Kэ$ струйного измельчения от производительности G мельницы

Установлено, что для материалов с различными свойствами и измельчаемостью оптимальная величина $\dot{N}^{опт}$ изменяется.

Поиск оптимального уровня загрузки струй материалом, обеспечивающего максимальную производительность мельницы (и соответственно минимальные энергозатраты), проводился по диапазону активности \dot{N} акустического излучения зоны помола.

Установлено, что для материалов с различными свойствами и измельчаемостью оптимальная величина $\dot{N}^{опт}$ изменяется.

В таблице представлены акустические и технологические показатели струйного измельчения ряда материалов.

На рис. 3 показана зависимость показателя $Kэ$ от степени акустической активности $lg \dot{N}$ зоны струйного измельчения.

Анализ опытных данных, приведенных на рис. 2, 3 и в таблице, позволил установить следующие оптимальные уровни акустической активности \dot{N} (c^{-1}) зоны помола струйной мельницы, при которых достигается эффективность процесса $Kэ$ не менее 0,4 г/имп:

шамот:	$Kэ = 1,6 - 0,7;$	$\dot{N} = 10^{3,5-3,8};$
известняк:	$Kэ = 1,4 - 0,8;$	$\dot{N} = 10^{3,9-4,8};$

газовый уголь: $Kэ = 0,4 - 0,6$; $\dot{N} = 10^{5,0-5,3}$;

бурый уголь: $Kэ = 0,4$; $\dot{N} = 10^{5,3}$.

Проводилась оценка дисперсности продуктов струйного измельчения по величине $S_{y\partial}$ удельной поверхности на приборе Т-3 (В.В. Товарова) [8].

Получены следующие результаты: шамот: $S_{y\partial} = 0,17 - 0,28$ м²/г; известняк: $S_{y\partial} = 0,3 - 0,68$ м²/г; газовый уголь: $S_{y\partial} = 0,97 - 1,88$ м²/г; бурый уголь: $S_{y\partial} = 1,11 - 1,32$ м²/г.

Таблица

Изменение показателей производительности, акустической активности и эффективности струйного измельчения для шамота, известняка и угля

№	Материал	G , г/с	\dot{N} , имп/с	$\lg \dot{N}$	$Kэ$, г/имп
1	шамот	1,97	7207	3,86	0,5
2		3,08	9982	4,0	0,77
3		0,54	3660	3,56	0,15
4		5,5	3374	3,5	1,57
5		2,6	22484	4,35	0,6
6		4	3764	3,57	1,12
7		4,8	6292	3,8	1,26
8		3,6	41943	4,6	0,78
1	известняк	3,5	54759	4,74	0,74
2		3,4	48383	4,7	0,72
3		4,2	63788	4,8	0,87
4		3,8	104590	5,02	0,75
5		3,1	50926	4,7	0,67
6		5,5	7510	3,88	1,4
1	газовый уголь	1,7	114813	5,06	0,34
2		1,4	198239	5,3	0,27
3		3,1	200754	5,3	0,58
1	бурый уголь	1,8	181690	5,26	0,34
2		1,6	303852	5,5	0,29
1	циркон	7,11	41174	4,62	1,54
2		5,25	38436	4,59	1,15

Сопоставление показателей дисперсности и акустической активности измельчения ($S_{y\partial}$, $Kэ$ и \dot{N}) выявило закономерность роста уровня акустической активности АЭ при получении более тонкого продукта. Процесс измельчения частиц до дисперсности порядка $S_{y\partial} = 0,2 - 0,3$ м²/г (шамот) со-

проводится активностью порядка $\dot{N} = 10^{3,5}$; при $S_{y\partial} = 0,3 - 0,6 \text{ м}^2/\text{Г}$ (известняк) $\dot{N} = 10^4$; при $S_{y\partial} = 1,0 - 1,8 \text{ м}^2/\text{Г}$ (уголь) $\dot{N} = 10^{5,3}$.

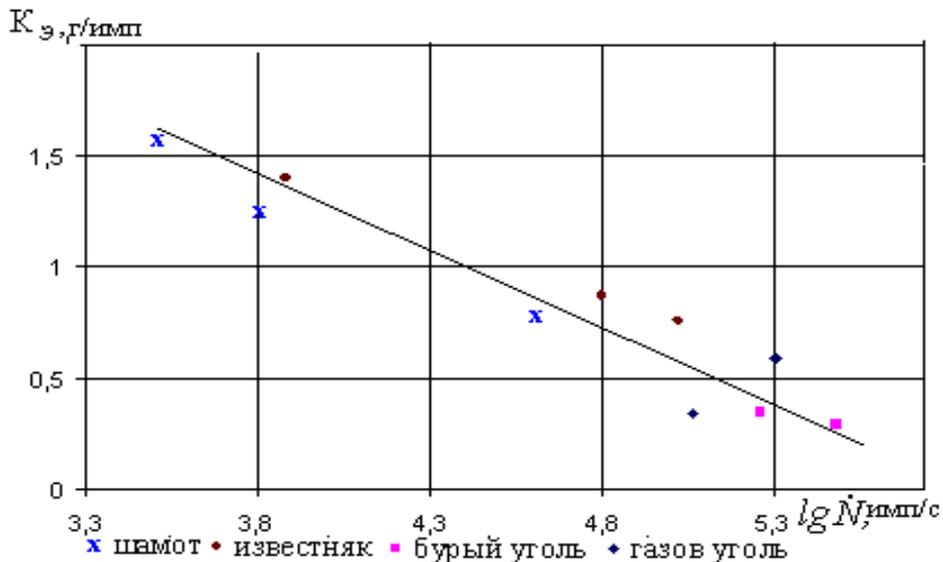


Рис. 3. Изменение акустической эффективности $Kэ$ измельчения в различных диапазонах $lg \dot{N}$ зоны помола материалов

Сопоставление показателей дисперсности и акустической активности измельчения ($S_{y\partial}$, $Kэ$ и \dot{N}) выявило закономерность роста уровня акустической активности АЭ при получении более тонкого продукта. Процесс измельчения частиц до дисперсности порядка $S_{y\partial} = 0,2 - 0,3 \text{ м}^2/\text{Г}$ (шамот) сопровождается активностью порядка $\dot{N} = 10^{3,5}$; при $S_{y\partial} = 0,3 - 0,6 \text{ м}^2/\text{Г}$ (известняк) $\dot{N} = 10^4$; при $S_{y\partial} = 1,0 - 1,8 \text{ м}^2/\text{Г}$ (уголь) $\dot{N} = 10^{5,3}$.

При этом наблюдается естественная тенденция снижения показателя эффективности струйного измельчения в области более высокой дисперсности получаемого продукта: при $S_{y\partial} = 0,2 - 0,3 \text{ м}^2/\text{Г}$, $Kэ^{макс} = 1,6$, тогда как при $S_{y\partial} = 1,1 - 1,3 \text{ м}^2/\text{Г}$, $Kэ^{макс} = 0,6$.

Важным технологическим параметром работы струйной мельницы является кратность циркуляции K_u материала в системе, т.е. величина циркулирующей нагрузки.

Полагаем, что соотношение счета акустических сигналов в конкретный момент N и в начале загрузки $N_{загр}$ может характеризовать величину $K_u \approx N/N_{загр}$. Определение числа сигналов проводилось за 1с.

На рис. 4 дан пример такого акустического наблюдения при измельчении шамота ($n = 600 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,3 \text{ МПа}$).

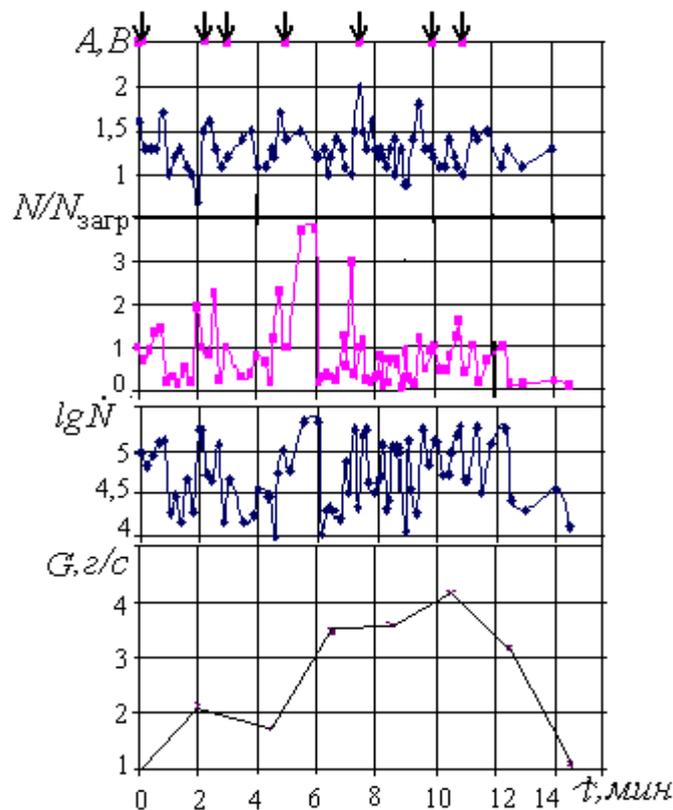


Рис. 4. Кинетика производительности G и параметров акустического «образа» струйного измельчения шамота: $N/N_{загр}$, $lg \dot{N}$, A .

Сопоставление графиков кинетики $N/N_{загр}$ и G позволяет сделать вывод о том, что максимальная производительность мельницы обеспечивается в условиях приближения величины акустического показателя $K_{ц} \approx N/N_{загр}$ циркуляции материала к единице.

В состоянии разгрузки струй величина $N/N_{загр}$ становится значительно меньше 1, а в режимах далеко не оптимальных по содержанию твердой фазы в струе $N/N_{загр}$ составляет порядка 2 – 4.

В работе уделялось внимание также изменению амплитудных распределений АС на различных стадиях измельчения и в различном диапазоне амплитуд, поскольку эти изменения могут быть связаны с повышением дисперсности измельчаемых частиц и использованы в акустическом мониторинге для контроля размеров частиц циркулирующей нагрузки и готового продукта.

На рис. 5 показаны результаты этого исследования на примере струйного измельчения металлургического граншлака.

Видно, что изменение степени загрузки струй (графики 1, 2, 3) сопровождается трансформацией распределений амплитуд по величине в диапазоне как малых ($< 0,5$ В), так и больших ($> 0,7$ В) значений A .

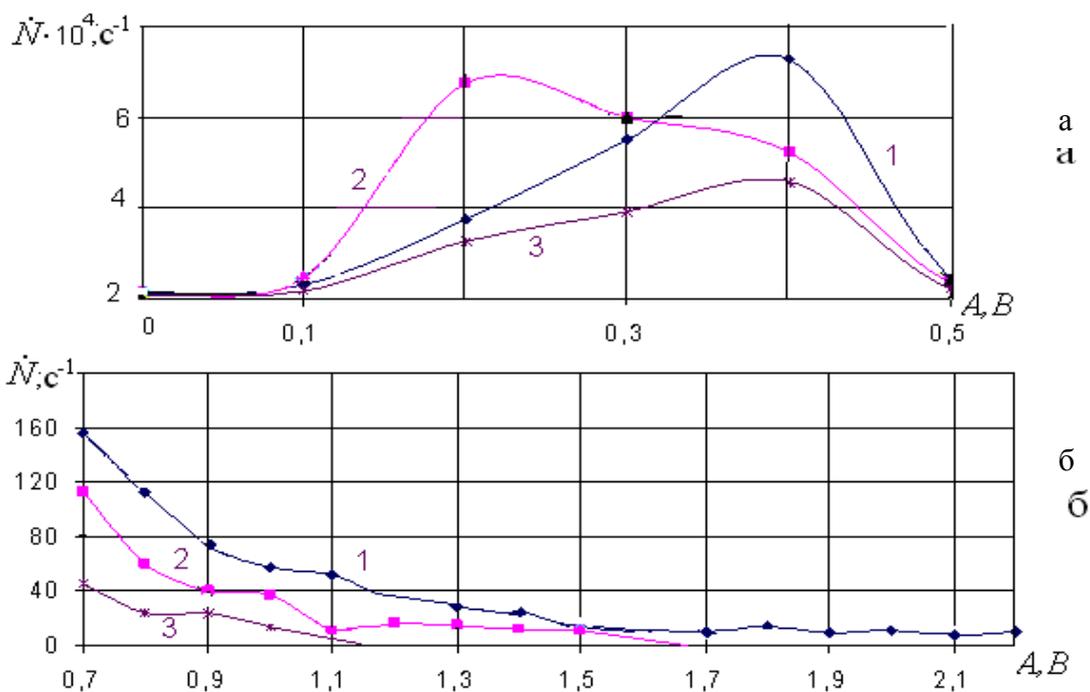


Рис. 5. Изменение акустической активности зоны помола в различных диапазонах амплитуд АС и на различных стадиях измельчения (1 – загрузка струй, 2 – рабочий режим, 3 – разгрузка струй): а) $A < 0,5 \text{ В}$; б) $A > 0,7 \text{ В}$

Переход от состояния загрузки (или рабочего режима) к разгрузке струй можно контролировать:

во-первых, счетом АС, уменьшающимся в 3 – 4 раза (от 160 – 120 до 40 c^{-1} , $A = 0,7 \text{ В}$),

во-вторых, закономерностью исчезновения.

Кроме того, в условиях наиболее эффективного режима рабочего измельчения наблюдается тенденция накопления в распределениях $N = f(A)$ амплитуд некоторой (характерной) величины, обусловленной преимущественным размером измельчаемых частиц: для шлака – это $A = 0,2 \text{ В}$ (рис. 5а, график 2).

Следует отметить, что такие параметры акустических «образов» струйного измельчения, как активность и амплитуда, взаимосвязаны между собой, и характер этой взаимосвязи дает основание прогнозировать дисперсность измельченного материала.

На рис. 6 иллюстрируется этот вывод: с повышением удельной поверхности готового продукта от $S_{y\partial} = 0,17 \text{ м}^2/\text{г}$ до $S_{y\partial} = 1,88 \text{ м}^2/\text{г}$ доля миллиамплитудных сигналов ($A = 20 \text{ мВ}$) значительно возрастает, составляя бо-

лее 90 %.

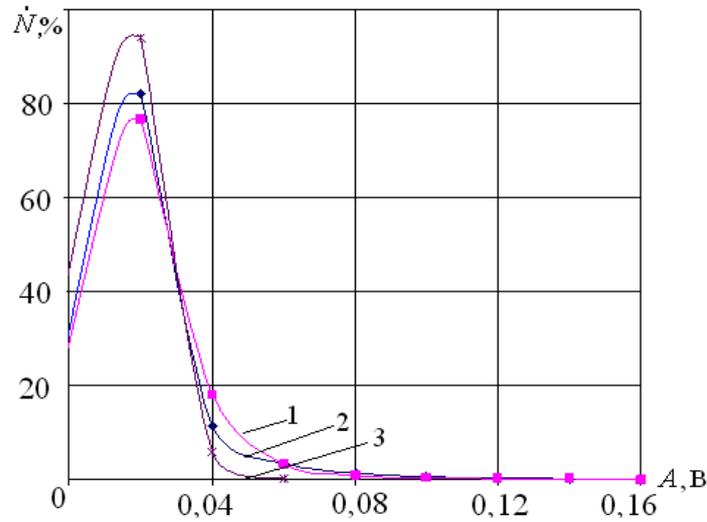


Рис. 6. Акустические параметры (активность \dot{N} и амплитуда A) рабочей зоны струйной мельницы при получении порошков различной удельной поверхности:
 1, 2 – шамот (1 – $S_{y\partial} = 1724 \text{ см}^2/\text{г}$, 2 – $S_{y\partial} = 4850 \text{ см}^2/\text{г}$);
 3 – газовый уголь ($S_{y\partial} = 18827 \text{ см}^2/\text{г}$)

Из рис. 7 следует, что процесс повышения дисперсности измельчаемых частиц в диапазоне $S_{y\partial} = 0,1 - 2,1 \text{ м}^2/\text{г}$ характеризуется уменьшением значений амплитуд $A_{\text{макс}}$ на стадии разгрузки струй, т.е. по завершении цикла измельчения поступившей в струю порции.

В число $A_{\text{макс}}$ вошли АС наибольших значений амплитуд с долей 10 – 15 %.

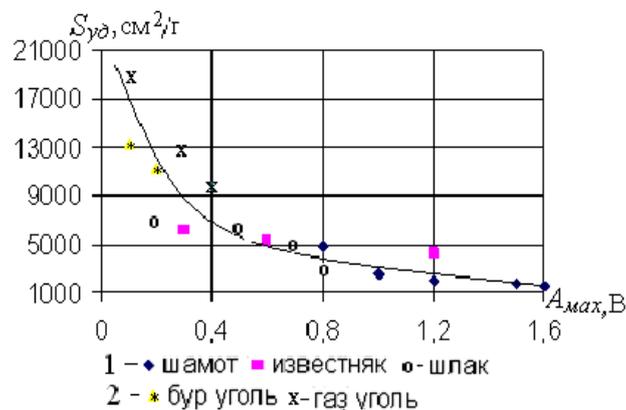


Рис. 7. Изменения максимальных значений $A_{\text{макс}}$ амплитуд АС с повышением дисперсности $S_{y\partial}$ измельчаемых частиц (стадия разгрузки струй)

Выводы:

1. Проведение акустического мониторинга рекомендуется с использованием следующих характеристик акустического «образа» режима струйного измельчения. В предлагаемый комплекс определяющих процесс измельчения акустических параметров входят:

- активность \dot{N} АЭ в зоне помола на любой стадии загрузки струй при условии исключения из числа измеряемых АС фонового шума струй энергоносителя $\dot{N} = (N_{\Sigma} - N_x) / \tau$;

- условный коэффициент эффективности струйного измельчения $K_{\text{Э}} = G / \lg \dot{N}$ (г/имп), рассчитываемый по соотношению производительности G мельницы и акустической активности (в виде логарифма) зоны помола за исследуемый период;

- соотношение счета АС в начале загрузки $N_{\text{загр}}$ и в конкретный исследуемый момент N , которое может характеризовать величину кратности циркуляции материала в системе, т.е. величину циркулирующей нагрузки: $K_{\text{ц}} \approx N / N_{\text{загр}}$;

- счет АС со значениями амплитуд порядка минимальных ($A \approx 20$ мВ) с долей выше 70 % и максимальных ($A > 0,7$ В) с долей 10 – 15 %, позволяющий контролировать процесс роста дисперсности измельчаемых частиц в диапазоне удельной поверхности $S_{\text{уд}} = 0,1 - 2,1$ м²/г;

2. Поддержание эффективной работы мельницы следует реализовать путем непрерывного контроля установленных параметров акустического «образа» зоны помола и управления загрузкой материала с позиций поиска оптимальной насыщенности струй твердой фазой и скорости ударов частиц.

3. При проведении акустического мониторинга с учетом изложенного опыта струйного измельчения ряда твердых сыпучих материалов крупностью менее 2,5 мм необходимо принять во внимание следующие закономерности взаимосвязи акустических параметров режима измельчения с эффективностью измельчения и дисперсностью готового продукта:

- критерием оценки соответствия процесса оптимальным условиям измельчения может служить величина отношения $K_{\text{Э}}$ производительности мельницы к акустической активности зоны помола $\lg \dot{N}$: $K_{\text{Э}} = G / \lg \dot{N}$ (г/имп), причем, в рабочих режимах измельчения исследованных материалов величина $K_{\text{Э}}$ должна быть не менее 0,4 г/имп.

- для материалов с различными свойствами и измельчаемостью оптимальная величина активности АЭ зоны помола $\dot{N}^{\text{опт}}$, соответствующая мак-

симальной производительности, изменяется в пределах двух порядков: от $\dot{N} = 10^{3,5}$ до $\dot{N} = 10^{5,3}$, причем, наиболее высокие значения $\dot{N}^{\text{опт}}$ сопровождаются получением более тонкодисперсного продукта.

- определение величины акустического показателя $K_{\text{ц}} \approx N/N_{\text{загр}}$ циркуляции материала позволяет прогнозировать уровень производительности мельницы таким образом, что в начальных условиях переполнения струй этот показатель составляет порядка 2 – 4, а при их чрезмерной разгрузке – меньше 1, тогда как эффективное измельчение с максимальной производительностью обеспечивается при приближении $K_{\text{ц}}$ к единице.

- процесс повышения дисперсности измельчаемых частиц при удельной поверхности до $S_{\text{уд}} = 2,1 \text{ м}^2/\text{г}$ характеризуется закономерным уменьшением максимальных значений амплитуд в амплитудных распределениях АС на стадии разгрузки струй.

Список литературы: 1. *Пилов П.И.* Технологические возможности струйных измельчителей / *П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, И.В. Верхоробина* // ГИАБ. – 2007. – № 3. – С. 359 – 367. 2. *Пилов П.И.* Развитие и совершенствование конструкций струйных измельчительных установок / [*П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.И. Мальченко и др.*] // ЗКК. – 2009. – № 38(79). – С. 59 – 68. 3. *Горобец Л.Ж.* Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: автореф. дис. на соискание научн. степени доктора техн. наук / *Л.Ж. Горобец*. – Днепропетровск, 2004. – 35 с. 4. *Пилов П.И.* Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки / [*П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко и др.*] // Вестник НТУ «ХПИ». – 2007. – № 27. – С. 33 – 41. 5. *Pilov P.I.* An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles / [*P.I. Pilov, L.J. Gorobets, V.N. Bovenko et al.*] // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 6. – С. 23 – 26. 6. *Пилов П.И.* Акустическое исследование измельчаемости гетерогенных материалов струйным способом / [*П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко и др.*] // ЗКК. – 2008. – № 34(75). – С. 67 – 74. 7. *Pilov P.I.* Research of acoustic monitoring regularities in a jet grinding process / *P.I. Pilov, L.ZH. Gorobets, N.S. Pryadko* // Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences. – 2009. – Vol. 54, №. 4. – P. 841 – 848. 8. *Горобец Л.Ж.* Характеристики дисперсности продуктов струйного измельчения / [*Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, В.П. Краснопер и др.*] // ЗКК. – 2010. – № 41 – 42. – С. 111 – 121.

Поступила в редколлегию 30.08.10