



Горобец Л. Ж.

Шуляк И. А.

*Национальный
горный университет*

Прядко Н. С.

*Институт
технической
механики
НАНУ и НКАУ*

Соболевская Ю. Г.

*Львовский филиал
Днепропетровского
университета
железнодорожного
транспорта*

УДК 621. 455

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

*Наведено результати струйного подрібнення
сипких матеріалів та акустичного випромінювання з метою
інтенсифікації процесу.*

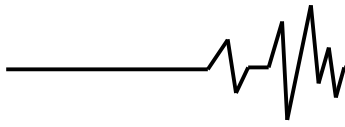
*Results of loose materials jet grinding and acoustic radiation
are shown with the purpose of process intensification.*

Проблема интенсификации струйного измельчения в области получения микропорошков из твердых сыпучих материалов решается на основе изучения закономерностей акустоэмиссионного (АЭ) мониторинга этого процесса [1, 2]. Предложена методика исследований, которая позволяет регистрировать акустическую эмиссию (АЭ) в зоне помола струйной мельницы. Акустическая эмиссия измеряется с помощью широкополосного апериодического датчика, установленного на свободном торце латунного волновода [3]. Другой конец волновода размещается внутри помольной камеры мельницы. Датчик соединен с аналого-цифровым преобразователем и далее с компьютером.

Целью данной работы является исследование и анализ амплитудно-частотных характеристик работы струйной мельницы на различных стадиях процесса измельчения: загрузка струй материалом; рабочий режим струй, когда скорость и концентрация в струе разгоняемых частиц соответствуют оптимальному уровню, интенсивного измельчения; разгрузка струй, содержащих циркулирующую нагрузку мельницы в количестве, недостаточном для эффективного измельчения. Таким образом, перечисленные стадии в различных состояниях загрузки струй

материалом, принципиально отличаются крупностью измельчаемых частиц, скоростью и механизмом их разрушения (удар, истирание) и соответственно производительностью мельницы по готовому продукту.

Начало загрузки струй материалом характеризует **режим 1**, в котором ускорение частиц и их взаимные соударения происходят в условиях высокой концентрации частиц твердой фазы в струе и, как следствие, при относительно низких скоростях разрушения (механизм динамичного истирания). По мере удаления частиц из газозвеси (через систему классификации в циклон и фильтр) уменьшается насыщенность струй твердой фазой, измельчение становится устойчивым и более эффективным за счет перехода к оптимальным концентрациям и более высокой скорости разрушения частиц (механизм высокоскоростного удара). Оптимальный режим обозначаем **режимом 2**. Далее, если не производится подача материала в струю, процесс переходит в **режим 3**, особенностью которого является продолжающаяся разгрузка струй с сохраняющейся достаточно высокой скоростью разрушения частиц ударами, но недостаточной концентрацией твердой фазы. В этом режиме измельчение происходит уже недостаточно эффективно из-за пониженной вероятности встречных ударов частиц в зоне



помола. В процессе измельчения возможен **режим 4** некоторой перегрузки струй материалом, за которым может наступить “завал” помольной камеры в результате уменьшения относительной скорости разгона и разрушения частиц. В **режиме 4** наблюдается резкое снижение эффективности измельчения и производительности мельницы.

Таким образом, проблема создания системы управления работой струйной измельчительной установки, включающей наблюдение за состоянием загрузки и разгрузки струй, своевременной подачи новой порции материала, является важной и актуальной. В данной работе решалась задача идентификации различных стадий процесса и состояний загрузки струй на основе анализа амплитудно-частотных характеристик акустического излучения зоны помола.

Исследования были проведены с материалами различной прочности и крупности: шамот (3-0 мм), уголь каменный и бурый (2-0 мм), известняк (2-0 мм). 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 составляла $m = 1$ кг, интервал их загрузки – 3-8 мин, длительность измельчения – 15-30 мин. Дисперсность продуктов струйного измельчения, измеренная по величине $S_{уд}$ удельной поверхности на приборе Т-3 Товарава, показала следующие результаты: шамот - $S_{уд} = 0,17-0,28$ м²/г; известняк - $S_{уд} = 0,3-0,68$ м²/г; газовый уголь - $S_{уд} = 0,97-1,88$ м²/г; бурый уголь - $S_{уд} = 1,11-1,32$ м²/г.

Наиболее информативными параметрами акустического мониторинга являются скорость счета (активность АЭ) \mathcal{N} акустических сигналов (АС), суммарный счет импульсов N за выбранный промежуток времени, максимальная амплитуда A АЭ и ее распределение по величине, а также некоторые другие закономерности, установленные по следующей методике [4].

Записи акустических сигналов (АС) анализировались в разные моменты технологического процесса измельчения, характерные для различных состояний струй: начало подачи материала в струю (t до 10 с), период интенсивного измельчения (рабочий режим, t - от нескольких десятков секунд) и заключительную стадию разгрузки струй, предваряющую режим фонового шума струи.

Определялись величины суммарного счета всех АС различных амплитуд и наиболее характерной (средневзвешенной) амплитуды A^{cp} за период регистрации. При этом, во-первых, в расчете A^{cp} учитывались сигналы с долевым участием более 1 % и, во-вторых, из общего количества N_{Σ} сигналов исключалось число N_x АС фонового шума (режим шума струи без твердой фазы). В этой связи полагаем, что найденная величина акустической активности $\mathcal{N} = (N_{\Sigma} - N_x) / t$ (имп/с) пропорциональна числу соударений частиц с волноводом.

На рис. 1 показаны записи амплитуд сигналов АЭ на изучаемых стадиях

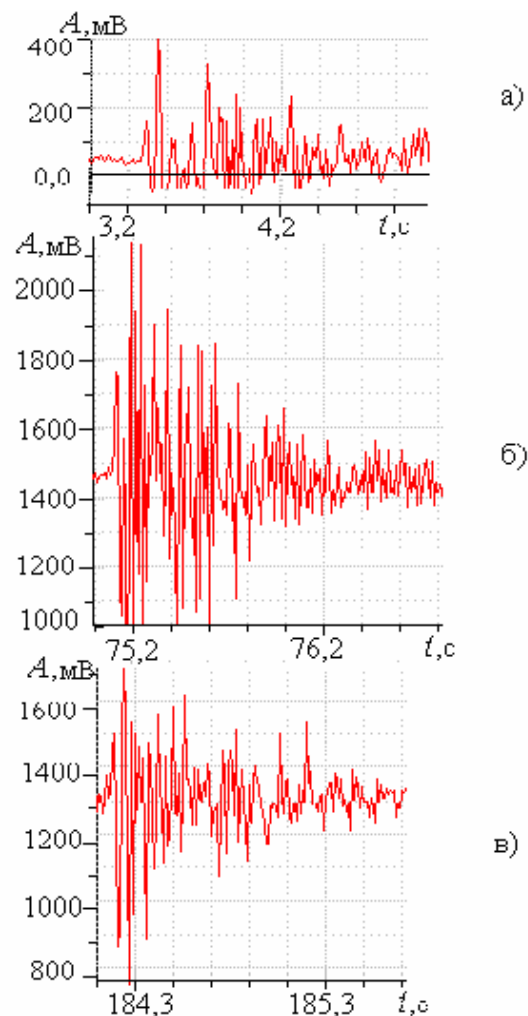
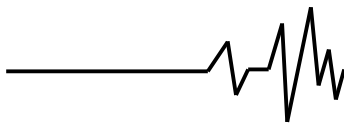


Рис. 1 Записи акустических сигналов зоны помола в различных состояниях струй при измельчении шамота ($d=3-0,5$ мм): а) загрузка струй материалом б) рабочий режим; в) разгрузка струй

измельчения (в режимах 1, 2, 3), начиная с подачи в струю исходного материала (шамота), заканчивая выносом готового продукта в



циклон из системы помола-классификации. Величины максимальных амплитуд АС в оптимальном режиме составляют 1800-2100 мВ, тогда как в режиме начинающейся разгрузки струй – 1500-1600 мВ, и тем более, в начале подачи и разгона большой массы частиц – 200-400 мВ.

На рис. 2 сопоставлены во времени изменения производительности G (г/с) мельницы, акустической активности N (имп/с) зоны помола (в логарифмических координатах) и характерной A_{cp} амплитуды (средневзвешенный для временного интервала в 1с полуразмах записанной амплитуды АС). Подача порций массой в 1 кг измельчаемого материала (шамот, исходная крупность 3-0,5 мм) обозначена стрелками.

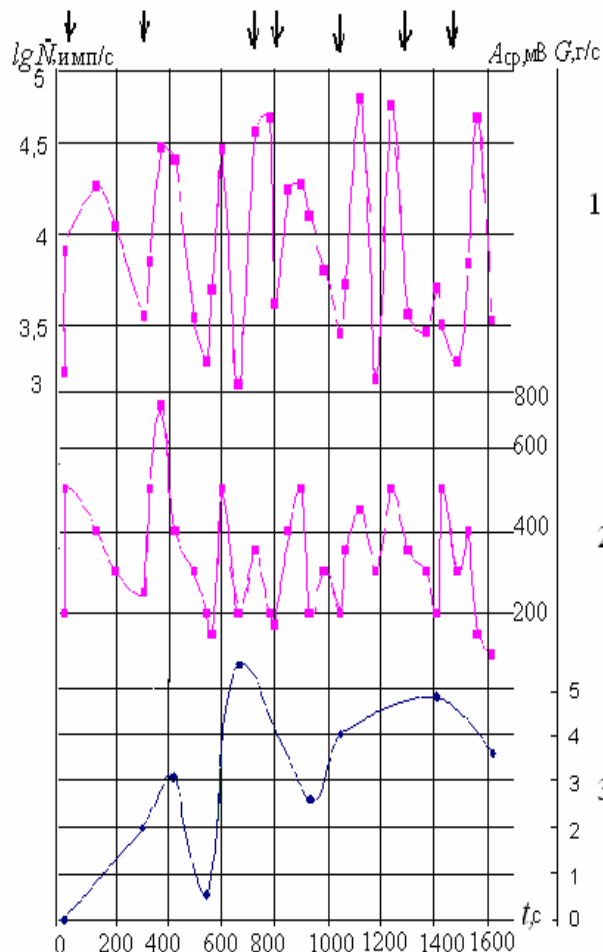


Рис.2 Кинетика активности lgN акустического излучения (1), амплитуд A_{cp} АС (2) и производительности G мельницы (3) при измельчении шамота

Анализ показал, что максимальные уровни производительности мельницы $G = 4-5,5$ г/с (3) соответствуют акустической

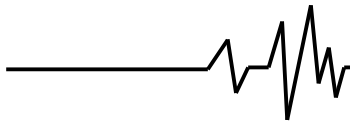
активности $lg N = 4,5-4,7$ (1), тогда как в других, менее эффективных режимах измельчения ($G = 2,5-3,5$ г/с) наблюдается ослабленное акустическое излучение: $lg N = 3,5-3,7$.

Проведенными ранее исследованиями промышленной газоструйной установки [5, 6] была установлена связь внутреннего и внешнего акустического излучения помольной камеры с загрузкой струй материалом. Отмечается, что внутренняя акустическая активность имеет ярко выраженный частотный диапазон выше 63 кГц. Изменения акустической активности в ходе измельчения преимущественно наблюдались в октавной полосе частот 125кГц, что было конечной полосой допуска для измерительной аппаратуры, используемой в описанных в [5] экспериментах. Высказано предположение о полезной информативности частот в более высоком диапазоне при использовании более чувствительной аппаратуры (до 1МГц).

В этой связи была применена методика построения амплитудно-частотных характеристик АС на различных частотах F их регистрации: $F = 400$ кГц, 300 кГц и 200 кГц с использованием программы "Power Graph" [7]. Эта программа дает возможность проводить спектральный анализ сигналов, а также осуществлять регистрацию данных с построением спектров в режиме реального времени. Производилась выборка характерной записи АС за интервал 1с для каждого исследуемого технологического режима на определенной частоте F регистрации АС с последующим выявлением диапазона эффективной частоты $w_{эф}$. За $w_{эф}$ принимали частоту, при которой наблюдаются максимальные значения амплитуд АС, ответственных за наиболее эффективные удары с максимальным выходом диспергированных частиц.

Эксперименты показали, что акустический показатель $w_{эф}$ потенциальной эффективности измельчения изменяется следующим образом в зависимости от частоты F регистрации АС: при $F = 400$ кГц $w_{эф} \approx 150 \div 170$ кГц, при $F = 300$ кГц $w_{эф} \approx 125 \div 135$ кГц, при $F = 200$ кГц $w_{эф} \approx 25 \div 30$ кГц. При частотах F меньшей величины характерной области эффективных частот $w_{эф}$ обнаружить не удалось.

На рис. 3, 4 приведены результаты обработки измерений амплитуд и частоты в различных условиях стадильности струйного измельчения. Проведенный анализ позволяет принять величину A_w амплитуды АС, соответствующую диапазону эффективной



частоты $\omega_{эф}$ акустического излучения зоны помола за качественный признак степени загрузки струй материалом. Полагаем, что этот акустический параметр A_w применим для поиска эффективной стадии процесса измельчения в системе управления работой мельницы.

$\approx 150 \div 170$ кГц (при $F=400$ кГц) следует считать наиболее информативной.

В процессе управления эффективностью струйного измельчения на основе использования амплитудно-частотных характеристик зоны помола и, в частности, амплитуды A_w АС частоту порядка $\omega_{эф} \approx 150 \div 170$ кГц (при $F=400$ кГц) следует считать наиболее информативной.

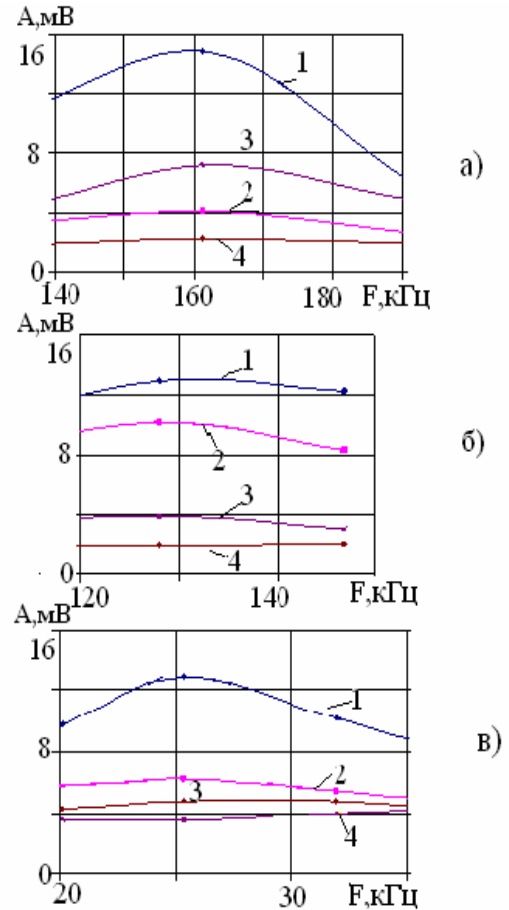


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики измельчения газового угля при частоте регистрации 400кГц (а), 300кГц (б) и 200кГц (в) для различных режимов измельчения: 1-загрузка (3с), 2-3 - рабочие режимы (1-2мин), 4-разгрузка (4мин)

Как видно из рис. 3а, величина параметра A_w возрастает в начале рабочего режима ($A_w=15$ мВ), затем уменьшается в ходе измельчения ($A_w=7-4$ мВ) и значительно уменьшается ($A_w=2$ мВ) на стадии разгрузки мельницы, работающей с низкой производительностью (см. рис. 2, G менее 3-2г/с).

В процессе управления эффективностью струйного измельчения на основе использования амплитудно-частотных характеристик зоны помола и, в частности, амплитуды A_w АС частоту порядка $\omega_{эф}$

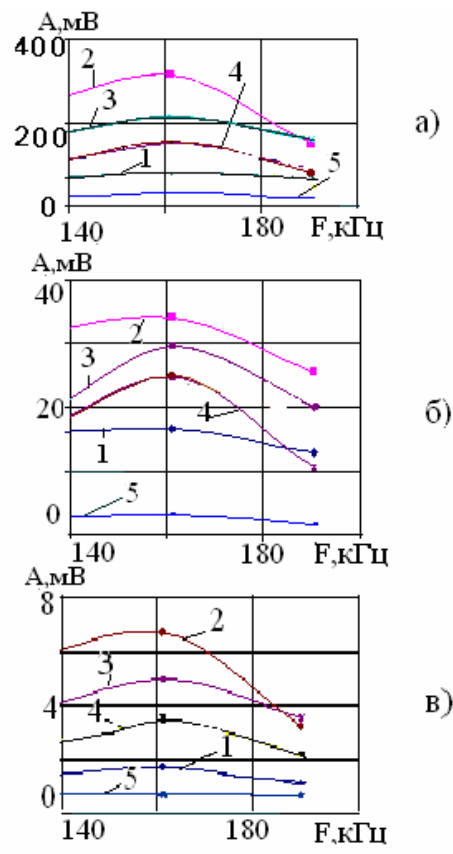
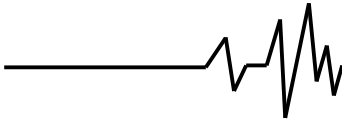


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики измельчения шамота (а), известняка (б), бурого угля (в) при частоте регистрации АС 400кГц: 1-загрузка (3с), 2-3 - рабочие режимы (1-3мин), 4-разгрузка (4мин).

Из рис. 4 видно, что с уменьшением плотности вещества (от 3,0 - для шамота до 1,4 г/см³ - для угля) измельчаемых частиц уменьшается величина регистрируемых амплитуд АС из-за прямо пропорциональной зависимости ударного импульса давления от плотности разрушаемого объекта.

С течением времени измельчения повышается дисперсность твердой фазы газовой взвеси, что естественно приводит к уменьшению давления при ударах частиц и в конечном счете к меньшим величинам характерных амплитуд АС: например, для



шамота амплитуда A_w уменьшается от 300 до 150 мВ (см. рис. 4а – графики 2, 4).

Обобщая экспериментальные результаты, сделаем следующие выводы.

1. Изменения технологического процесса (стадиальности) струйного измельчения, включая подачу в струю материала, различные состояния струй по содержанию твердой фазы и динамичности разрушения частиц, обуславливают изменения амплитудных распределений акустических сигналов в зоне помола.

2. Для разработки системы управления эффективностью струйного процесса предлагается использование амплитудно-частотных характеристик зоны помола, анализ которых позволяет установить акустический показатель потенциальной эффективности измельчения - эффективную частоту $w_{эф}$ акустического излучения при измельчении.

3. Поиск эффективной стадии процесса измельчения, реализующей наиболее эффективные удары с максимальным выходом диспергированных частиц, следует проводить на основе определения амплитуды A_w акустических сигналов в диапазоне установленной эффективной частоты $w_{эф}$.

4. При частоте регистрации АС $F=400$ кГц и эффективной частоте $w_{эф} \approx 150 \div 170$ кГц величина амплитуды A_w изменяется от 300 до 9 мВ в зависимости от степени загрузки струй материалом, плотности вещества и дисперсности измельчаемых частиц (шамот, известняк, уголь газовый и бурый).

5. Повышение уровня акустической активности зоны помола ($\lg A_w$ от 4 до 5,5) на любой стадии является фактором роста числа ударов частиц и, следовательно, интенсификации измельчения и увеличения производительности мельницы.

Литература

1. P.I. Pilov, L.J.Gorobets, V.N. Bovenko, N.S. Pryadko /An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles// Науковий вісник НГУ. – 2008. – №6. – С. 23-26.

2. Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Верхоробина И.В., Бевзенко Б.Ф., Кравченко В.П. Мониторинг изменений технологических и режимных параметров в процессе струйного измельчения строительных материалов // Матер. науч.-техн. конф. «Применение дисперсных и ультра-(нано-) дисперсных порошк. систем в пром. технолог. С.-П., 2008, С. 112-127.

3. Апериодический датчик для регистрации акустических сигналов: А.с. 512602 СССР /В.Н. Бовенко, В.И. Полуниин (СССР). – Оpubл. 30.08.76, Бюл. №16. - 2с.

4. Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Прядко Н.С. Акустическое исследование измельчаемости гетерогенных материалов струйным способом. ЗКК, №34(75), 2008, С. 67-74.

5. Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Щербаков А.Е., Прядко Н.С., Верхоробина И.В., Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки //Вісник нац. техн. університета «ХПИ». - Харьков, 2007. – Вип. № 27 - С.33-41.

6. Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Стрельников Г.О, Верхоробина И.В. Застосування акустоемісйного моніторингу щодо струменевого подрібнення // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні.–Львів.- 2006.–вип.40.–С.69-74.

7. Измайлов Д.Ю. Виртуальная измерительная лаборатория " Power Graph" //ПиКАД: Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. 2007, №3, С. 42-47.