

А.И. Михалев, Н.С. Прядко, Р.А. Сухомлин

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Статья посвящена исследованию акустических сигналов различных режимов работы газоструйной мельницы, при помощи вейвлет-анализа. Исследование проводилось для различных режимов работы мельницы, при изменении размеров частиц измельчаемого материала. В качестве оценок акустического сигнала выступали стандартные отклонения детализирующих вейвлет-коэффициентов.

Ключевые слова: газоструйная мельница, акустический сигнал, детализирующий вейвлет-коэффициент.

Газодинамический способ измельчения, реализуемый в струйных мельницах, является одним из наиболее перспективных для получения высокодисперсных (микронизированных) порошков с размерами частиц – доли, единицы и десятки микрон. Производительность струйных установок при неизменной конструкции зависит от ряда технологических факторов: параметров энергоносителя (давление, температура, скорость и расход энергоносителя), свойств и гранулометрического состава исходного и измельчаемого материала, содержания твердой фазы в струях, режима классификации и пневмотранспорта. Требуемые условия измельчения в определенном типе струйной мельницы достигаются путем варьирования скорости и температуры струй, режима классификации. При выбранных технологических параметрах оптимальный режим измельчения определяется наполненностью струй материалом. При избытке (перегрузке мельницы) и недостатке (разгрузке мельницы) материала производительность снижается, процесс измельчения может прекратиться. Поэтому крайне важно контролировать загрузку струй материалом и вовремя осуществлять дозагрузку необходимой порции материала.

Исследования [1,2] показали эффективность контроля процесса струйного измельчения (ПСИ) на основе акустического мониторинга. Установлена взаимосвязь технологических, режимных и акустиче-

ских параметров ПСИ [3-5], разрабатывается информационная технология процесса струйного измельчения [6], включающая базы данных: технологические параметры, режимные показатели и записи акустических сигналов (АС) зоны измельчения и сигналов, записываемых на выходе готового продукта измельчения различных сыпучих материалов.

Цель работы – разработать основы моделирования процесса струйного измельчения (ПСИ) на основе вейвлет-анализа его акустических сигналов.

Проведенный ранее анализ хаотичности акустических сигналов ПСИ [7] позволило сделать вывод, что переходные процессы - хаотичны, система – персистентна, устойчива и не переходит быстро в хаос. При определении степени заполнения мельницы были изучены значения показателя Ляпунова, коэффициента Херста и нормированной энтропии [8], в итоге можно сделать вывод о том, что для различных режимов измельчения они не являются информативными. В этой связи исследования продолжены на основе вейвлетного анализа, особого типа линейного преобразования сигналов и физических данных. Вейвлетные функции базиса позволяют сконцентрировать внимание на тех или иных локальных особенностях анализируемых процессов, которые не могут быть выявлены с помощью традиционного преобразования Фурье.

При вейвлет-анализе данных акустического мониторинга ПСИ использовался алгоритм Малла, с применением 4-го вейвлета Добеши [9].

$$C_{m+1,k} = \sum_n g_n C_{m,2k+n},$$

$$D_{m+1,k} = \sum_n h_n C_{m,2k+n}.$$

где $C_{0,k} = s(k)$ – исходный сигнал,

g_n – импульсная переходная характеристика для выделения низких частот, построенная на основе вейвлета Добеши,

h_n – импульсная переходная характеристика для выделения высоких частот, построенная на основе вейвлета Добеши.

Поскольку при анализе акустического сигнала необходимо было оценить его вариабельность, в работе использовался детализирующий вейвлет-коэффициент ($D1, D2, D3$), который показывает флюк-

туацию исходного сигнала относительно его аппроксимации. Вейвлет разложение производилось до 3-го уровня разложения, но поскольку результаты практически совпадают, в работе приведен только 1-й уровень. Для более явного численного выражения различия акустических сигналов были найдены стандартные отклонения вычисленных детализирующих коэффициентов ($cD1$, $cD2$, $cD3$).

$$cD_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_{i,j} - \bar{D}_j)^2},$$

где $j = \overline{1,3}$ – уровень вейвлет-разложения.

На рис.1 представлены стандартные отклонения детализирующих вейвлет - коэффициентов 1 уровня режима разгрузки (а) мельницы и рабочего режима (б) измельчения кварцевого песка, регистрировались сигналы в зоне измельчения, частота регистрации 400кГц, τ - номер промежутка времени длиной $\Delta t = 0,01$ с.

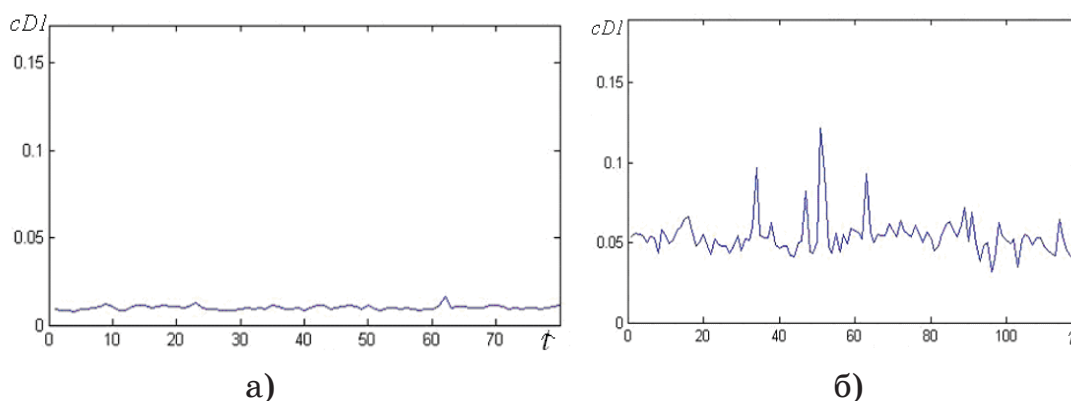


Рисунок 1 – Стандартное отклонение детализирующего вейвлет – коэффициента 1 уровня для разных режимов измельчения

Анализ полученных результатов показывает значительное отличие вейвлет-коэффициентов для данных рабочего режима и режима разгрузки мельницы. Этот факт дает основание говорить о возможности создания системы управления загрузкой мельницы по величине оценок детализирующего вейвлет – коэффициента, вычисляемого в ходе акустического мониторинга процесса измельчения.

Проведенный аналогичный вейвлет-анализ данных измельчения материалов различной плотности и размеров исходных частиц показал, что величина вейвлет-коэффициентов сигналов полупустой мельницы при их измельчении имеет одинаковое значение ($s \approx 0,01$). На рис. 2 представлены результаты анализа измельчения

газового угля с удельной поверхностью $S=0,99 \text{ м}^2/\text{г}$ (рис. 2а), кварцевого песка Вольногорского месторождения, измельченного при разных режимах классификации: $n=180 \text{ мин}^{-1}$, $S = 0,46 \text{ м}^2/\text{г}$ (рис.2.б); $n=180 \text{ мин}^{-1}$, $S = 0,67 \text{ м}^2/\text{г}$ (рис. 2.в).

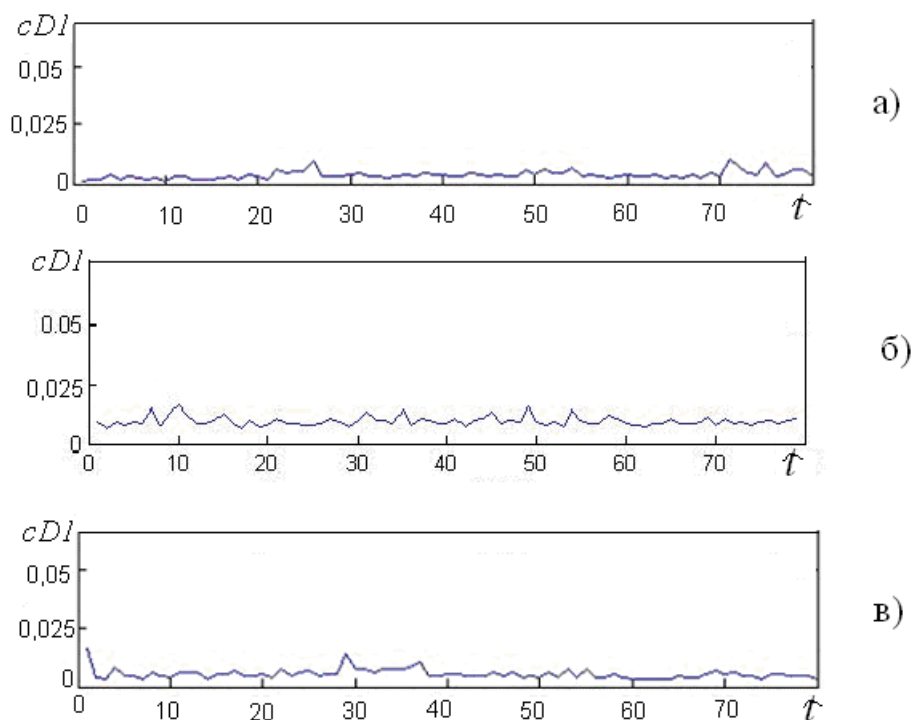


Рисунок 2 – Стандартное отклонение детализирующего вейвлет – коэффициента 1 уровня для полупустой мельницы

При вейвлет - анализе акустических сигналов рабочего режима измельчения материалов различных характеристик плотности (газовый уголь $\rho = 1,4 \text{ г/м}^3$ и кварцевый песок $\rho = 2,65 \text{ г/м}^3$) и разной дисперсности измельченного продукта при разных режимах классификации получены разные величины оценок детализирующего вейвлет - коэффициента 1 уровня. На рис. 3 показаны результаты вейвлет - анализа акустических сигналов рабочего режима измельчения газового угля (рис.3а), с параметрами аналогичными рис. 2а) и кварцевого песка (рис. 3 б) с параметрами классификации аналогичными рис. 2б).

Значения детализирующего вейвлет - коэффициента 1 уровня для рабочего режима мельницы при измельчении материалов различных свойств отличаются в 2-4 раза. В частности, величина вейвлет - коэффициентов зависят от дисперсности получаемого продукта и свойств измельчаемого материала. Так, при измельчении кварцевого

песка с разными режимами классификации и, соответственно, получении продуктов разной удельной поверхности (см. рис. 1б и рис. 3б) значения вейвлет - коэффициента отличаются в 1,5 раза. Для материалов разной плотности и исходной крупности (см. рис. 3) эти величины также отличаются на 50-100 %.

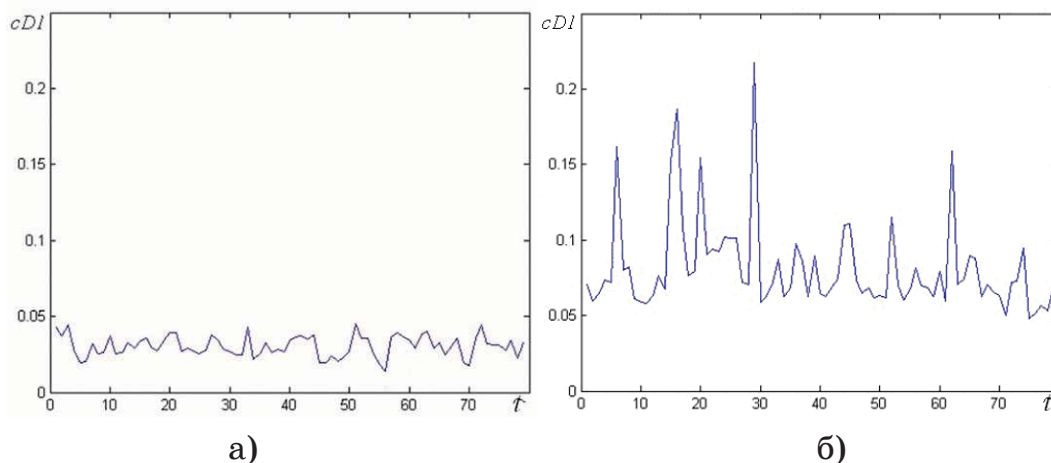


Рисунок 3 – Стандартное отклонение детализирующего вейвлет - коэффициента 1 уровня для рабочего режима мельницы

Выводы

1. Исследованиями данных акустического мониторинга процесса струйного измельчения установлено, что вейвлет-коэффициенты двух различных режимов (оптимальной и недостаточной загрузки струй материалом) различаются на порядок, поэтому они достаточно хорошо определяют степень заполнения мельницы.

2. Вейвлет-анализ сигналов струйной мельницы на стадии загрузки при измельчении материалов различных физических свойств показал, что стандартные отклонения детализирующего вейвлет - коэффициента 1 уровня практически не отличаются, что позволяет разработать алгоритм управления загрузкой мельницы при струйном измельчении сыпучих материалов различной крупности.

3. Изучение сигналов ПСИ при оптимальном режиме измельчения показало зависимость вейвлет коэффициентов от свойств измельчаемых материалов, что позволяет контролировать дисперсность получаемого продукта.

По результатам проведенных исследований можно утверждать о применимости разработанной методики вейвлет-анализа акустиче-

ских сигналов ПСИ для моделирования процесса газоструйного измельчения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прядко Н. С. Анализ качества продукта струйного измельчения на основе акустического мониторинга / Н. С. Прядко // Техническая механика. – 2010. – № 2. – С. 81 – 86.
2. Мониторинг процесса измельчения методом акустической эмиссии / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, Н.С. Прядко// Сб. матер. Междунар. конф. «Форум горняков - 2008». – Москва, 2008. – С. 1-8.
3. Мониторинг изменений технологических и режимных параметров в процессе струйного измельчения строительных материалов./ / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, И.В. Верхоробина, Б.Ф. Бевзенко, В.П. Кравченко// Матер. научно-техн. конф. «Применение дисперсных и ультра-(нано-) дисперсных порошковых систем в промышленных технологиях.». – С.-П.- Изд-во Политех. ун-та.-2008.- С. 112-127.
4. Research of acoustic monitoring regularities in a jet grinding process / P. I. Pilov, L. J. Gorobets, N. S. Pryadko // Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences. – 2009. – Vol. 54 (2009), № 4. – P. 841 –848.
5. Акустические и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице /П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, Н.С. Прядко //Известия вузов. Горный журнал, № 4, 2009. – С. 115-121.
6. Информационная технология получения тонкодисперсных материалов струйным измельчением / Н. С. Прядко, Т. М. Буланая, Л. Ж. Горобец, Ю. Г. Соболевская, Н. П. Сироткина // Системные технологии: региональный межвузовский сборник научных трудов. – Днепропетровск. – 2010. – Вып. 3(58). – С. 40 – 46.
7. Михалев А.И. Исследование хаотичности акустических ритм-сигналов газоструйной мельницы /А.И. Михалев, Н.С. Прядко, Р.А. Сухомлин // Материалы международной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта» (ISDMCI'2011). - Том 2. – Херсон: ХНТУ, 2011. – С. 233-234.
8. Михалёв А.И., Сухомлин Р.А. Оценивание хаотических ритм-сигналов в задачах диагностики динамических систем //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (74). - Днепропетровск, 2011. - С.145 - 151.
9. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с., ил.