

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Приведены результаты разработки модели струйного измельчения на основе акустического мониторинга процесса. Созданная модель опробована на примере измельчения кварцевого песка на лабораторной струйной измельчительной установке.

Наведено результати розробки моделі струминного подрібнення на основі акустичного моніторингу процесу. Створену модель опробовано на прикладі подрібнення кварцевого піску на лабораторній струминній подрібнюючій установці.

The results of development of the jet grinding model are presented using acoustic monitoring the process. The created model is tested by the example of grinding quartz sand with the laboratory jet mill.

Введение. Случайные марковские процессы по своей физической сущности максимально приспособлены для построения математических моделей кинетики диспергирования и механической активации дисперсных материалов. Существующее многообразие видов марковских процессов позволяет конструировать разнообразные по сложности и физической сущности модели кинетики диспергирования и механической активации многофазных сред, адекватно отражающие специфический характер нагружения и изменения состояния частиц дисперсной фазы в машинах разного конструктивного оформления. В работах В. Е. Мизонова, С. Ф. Смирнова и других авторов [1, 2] предложена методология применения цепей Маркова к моделированию технологии обработки дисперсных материалов, которая базируется на следующем положении: непрерывное описание эволюции во времени некоторой исследуемой функции представляется через некоторые интервалы времени конечным числом дискретных значений функции, которые называются состоянием системы. В качестве функции могут быть характеристики объекта любой природы. В частности, применительно в сыпучим материалам плотность распределения частиц заменяется вероятностями состояния. Все возможные состояния системы образуют пространство состояний, а их вероятность – вектор состояния. Это дает основание применить цепи Маркова для моделирования процесса струйного измельчения.

Целью исследования была разработка математической модели процесса струйного измельчения с использованием результатов акустического мониторинга.

Моделирование осуществляется на основе системного подхода с применением ячеечной модели. При моделировании процесса измельчения в струйной мельнице, работающей в периодическом режиме (периодическая загрузка материала), в качестве элементарного объема моделирования принимается вся мельница. Для описания состояния материала и режима измельчения используются сигналы, записываемые датчиком в зоне измельчения при непрерывном акустическом мониторинге.

Ранее проведенные исследования позволили установить связь характеристик акустических сигналов (АС), записываемых в процессе струйного измельчения сыпучих материалов, с технологическими параметрами и режимами измельчения, свойствами исходного материала и получаемого продукта [3, 4]. Это дает возможность говорить о том, что режим процесса измельчения и состояние измельчаемого материала определяется величиной амплитуды

© Н.С. Прядко, 2012

ды АС и их числом в наблюдаемый период времени. Поэтому математическая модель основана на анализе амплитуды акустических сигналов, записанных в каждый дискретный момент времени Δt процесса измельчения.

Основные результаты исследований. Для создания ячеечной модели весь диапазон акустических сигналов разбивается на поддиапазоны сигналов со средними размерами амплитуды $A_i, i=1,2,..m$, где $i=1$ соответствует A_{\max} . Таким образом, все акустические сигналы, записываемые в ходе мониторинга, разбиваются на m ячеек по размерам их амплитуд. Число сигналов с соответствующими амплитудами определяет состояние элементарной ячейки. Количество АС может быть представлено вектором столбцом $N = (n_i), i=1,..m$, где n_i – число АС ячейки i , т.е. число сигналов, имеющих амплитуду A_i .

Каждое состояние характеризуется определенной вероятностью, которая может рассматриваться как доля сигналов соответствующей амплитуды A_i , а также рассматриваться как число сигналов. Переход к нормированному распределению числа АС в каждой ячейке при любом разбиении на классы реализуется по формуле:

$$n_i^k = \frac{n_i}{\sum_1^m n_i} = \frac{n_i}{N}, \quad (1)$$

где N – число зарегистрированных АС за интервал наблюдения, i – номер ячейки, k – дискретный момент времени наблюдения.

При моделировании кинетики струйного измельчения процесс рассматривается как последовательность малых промежутков времени Δt – времени перехода. В этом случае текущие моменты времени процесса и записи акустического мониторинга будут определяться как $t_k = k\Delta t$, где целое число $k = 1,2,..$ – номер перехода. Его можно рассматривать как дискретный текущий момент времени.

За k -й переход вектор состояния N^k перейдет в N^{k+1} . Этот переход обусловлен различными событиями, которые происходят внутри каждой ячейки: прямое столкновение частиц и их касание, разрушение крупных частиц на более мелкие и отламывание осколков, появление трещин в крупных частицах и т.д. В результате измельчения частицы становятся меньше и, соответственно, амплитуды измеряемых АС – меньше. Таким образом, $(k+1)$ – состояние первых двух ячеек (с наибольшими амплитудами) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} n_1^{k+1} &= g_{11}n_1^k + 0 \cdot n_2^k + \dots + 0 \\ n_2^{k+1} &= g_{21}n_1^k + g_{22}n_2^k + \dots + 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где g_{11} – доля сигналов ячейки 1, оставшихся в ней; g_{21} – доля сигналов ячейки 1, перешедших в ячейку 2, g_{22} – доля сигналов ячейки 2, оставшихся в ней. При этом значения g_{ij} трактуются как вероятности перехода в другие ячейки. Эти коэффициенты образуют треугольную матрицу вероятностей перехода при измельчении, или матрицу измельчения [2]

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ g_{21} & g_{22} & 0 & \dots & 0 \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & \dots & 0 \\ \dots & & & & \\ g_{m1} & g_{m2} & g_{m3} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Из условия нормировки (1) следует, что вне зависимости от степени изменения сигналов должно выполняться условие $\sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^m g_{ik} = 1$.

Основной математической модели процесса измельчения является определение матрицы измельчения G . В теории измельчения для этого используют селективную и распределительную функции измельчения [5].

Селективная функция измельчения описывает скорость измельчения. В нашем случае селективная функция $S(A)$ описывает скорость уменьшения в единицу времени количества сигналов с величиной амплитуды, попадающей в ячейку (поддиапазон) A_i . Таким образом, $\Delta n_i^- = n_i S_i \Delta t$.

Сигналы с пониженным уровнем амплитуды переходят в соседние ячейки, где находятся записанные сигналы с меньшими амплитудами. Этот процесс описывается распределительной функцией b_{ij} , которая показывает вероятность перехода сигналов из j -ой ячейки в i -ую. Тогда процесс измельчения приводит к увеличению числа сигналов, записанных в дискретный момент времени и помещенных в ячейке с меньшими амплитудами, на величину $\Delta n_i^+ = \sum_j b_{ij} n_j S_j \Delta t$.

Таким образом, при периодической загрузке материала в мельницу матрица измельчения, основанная на записанных сигналах акустического мониторинга процесса, имеет вид

$$G = \begin{bmatrix} 1 - S_1 \Delta t & 0 & \dots & 0 \\ S_1 b_{21} \Delta t & 1 - S_2 \Delta t & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_1 b_{m1} \Delta t & S_2 b_{m2} \Delta t & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ g_{21} & g_{22} & 0 & \dots & 0 \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & \dots & 0 \\ \dots & & & & \\ g_{m1} & g_{m2} & g_{m3} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Система работает следующим образом. Загрузка материала на начальном этапе дает сигналы с относительно повышенной амплитудой. Пусть начальные значения классов амплитуд были выражены вектором столбцом: $A_n^0 = (A_{n1}^0 \ A_{n2}^0 \ \dots \ A_{nm}^0)^T$, где индекс T обозначает транспонирование. В начальном момент $k = 0$ считаем

$$A^0 = A_n^0. \quad (5)$$

Тогда изменение амплитуды записанных сигналов в ходе измельчения за шаг времени перехода по ячейочной модели вычисляется из матричного равенства

$$A^{k+1} = GA^k. \quad (6)$$

Число переходов k вычисляется из выражения $k = t / \Delta t$, где t – дискретное время пребывания материала в мельнице.

Таким образом, задача определения кинетики периодического измельчения решена на основе ячеечной модели акустического мониторинга процесса. Осталось определить матрицу измельчения.

Возможны два пути решения этой проблемы: определение селективной и разделительной функции через величину энергии, поступающей к материалу и связанной с энергией АС, или проведение экспериментального восстановления матрицы измельчения по результатам акустического мониторинга.

В данной работе рассмотрен первый вариант. В теории сигналов [6] используется определение удельной энергии и средней удельной мощности сигналов, записанных за данный промежуток времени t , в виде:

$$E_A = \int_0^t s^2(t) dt, \quad P_A = \frac{1}{t} \int_0^t s^2 dt, \quad (7)$$

где удельная мощность записываемых сигналов P_A имеет размерность B^2 .

В дискретном представлении энергия акустической эмиссии при разрушении частиц определяется формулой $E_A = \sum_{i=1}^m n_i A_i^2$, где n_i, A_i – соответственно число сигналов и средняя амплитуда ячейки i . Разрушение частиц, при котором появляются сигналы с амплитудой A_i , происходит при обладании

сигналами удельной мощностью энергии $P_A = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^m n_i A_i^2$. Тогда для описа-

ния струйного измельчения на основе записанных в ходе мониторинга акустических сигналов матрица измельчения имеет вид

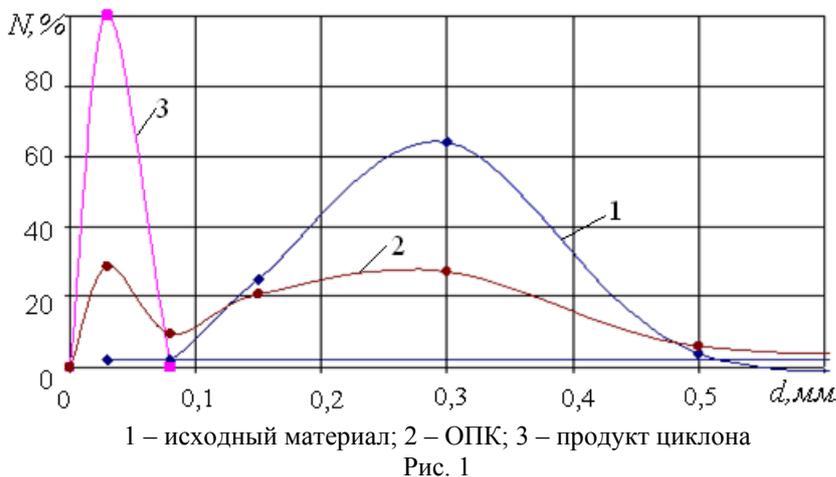
$$G = \begin{bmatrix} P_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 & \dots & 0 \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \dots & 0 \\ \dots & & & & \\ P_{m1} & P_{m2} & P_{m3} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где P_{ij} – величина удельной мощности сигнала в каждой ячейке i (т.е. поддиапазоне сигналов с величиной амплитуды A_i на переходе) j .

Сравнивая (4) и (8), получаем выражение для определения селективной и распределительной функции измельчения

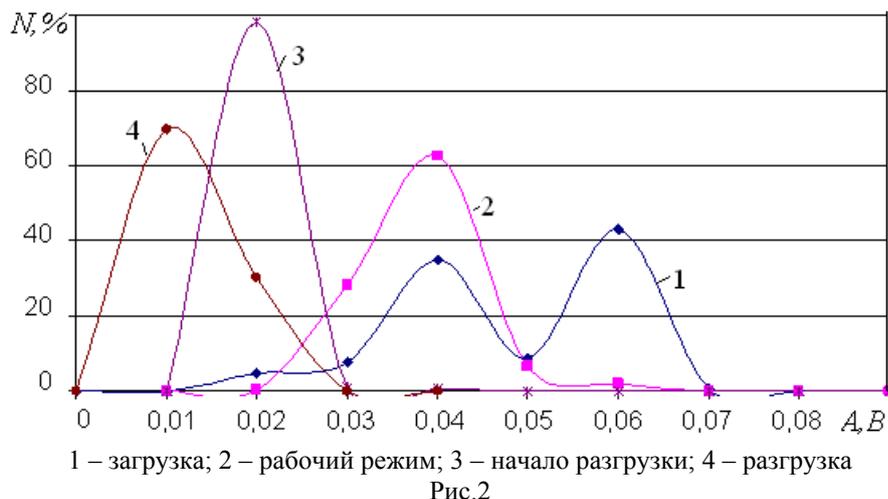
$$S_i = \frac{1 - P_{i,j}}{\Delta t}, \quad b_{k,i} = \frac{P_{k,i}}{S_i \Delta t}. \quad (9)$$

Для проведения апробации математической модели использовались результаты акустического мониторинга процесса измельчения кварцевого песка Вольногорского горнометаллургического завода (ВГМК). На рис. 1 представлен гранулометрический состав исходного материала (1), недоизмельченного материала, оставшегося в помольной камере (2 – ОПК), и измельченного продукта (3 – продукт циклона).



Установлено [7], что распределение амплитуд АС на стадии загрузки может служить характеристикой крупности исходного материала, тогда как максимальная величина амплитуды на стадии разгрузки струй может служить оценкой характерных размеров частиц циркулирующей нагрузки мельницы (возврата некондиционных частиц из классификатора в инжекторы).

Струйное измельчение кварцевого песка реализовано при давлении $P = 0,3$ МПа, режиме классификации (числе оборотов ротора классификатора) $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$. Частота регистрации сигналов – 400 кГц. Для анализа сигналов выбирался временной интервал $t = 0,01$ с, рассматривались сигналы с амплитудой более 10 мВ. На рис. 2 представлено распределение амплитуд акустических сигналов на различных режимах измельчения кварцевого песка, полученное расчетным путем на основании математической модели по формулам (6) – (8). За начальные значения амплитуд сигналов принимались амплитуды и общее число сигналов, записанных на начальном этапе загрузки струй материалом ($t = 3$ с).



Выводы. Полученные результаты апробации математической модели согласуются с установленными ранее связями между распределениями амплитуды акустических сигналов и дисперсностью получаемого продукта при струйном измельчении. Так, показано [7, 8], что повышение дисперсности

измельчаемого порошка сопровождается уменьшением характерной величины амплитуды АС и ростом долевого участия малоамплитудных сигналов. Исследованиями установлено, что для получения информации о характерных размерах частиц в струе, их гранулометрическом составе, степени загрузки струй материалом целесообразно использовать характеристики акустического излучения при струйном измельчении: активность \dot{N} АС, амплитуды сигналов и их распределение по величине. Это возможно успешно реализовать на основе созданной ячеечной модели акустического мониторинга процесса струйного измельчения.

1. Применение теории марковских цепей к моделированию механических процессов химической технологии // В. Е. Мизонов, Е. А. Баранцева, Н. Berthiaux, К. Marikh // V Межд. Научн. конф. Технологических процессов и оборудования; сб. трудов. 26 – 28 июня. – Иваново, 2001. – С. 92 – 94.
2. Обобщенная ячеечная модель совмещенного процесса измельчения-классификации в технологических системах измельчения / С. Ф. Смирнов, В. П. Жуков, С. В. Федосов, В. Е. Мизонов // Строительные материалы. – 2008. – №8. – С. 74 – 76.
3. Мониторинг изменений технологических и режимных параметров в процессе струйного измельчения строительных материалов / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко и др. // Применение дисперсных и ультра-дисперсных порошковых систем в промышленных технологиях : научно-техническая конференция, июль 2008 г., Санкт-Петербург : сб. материалов. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 112 – 127.
4. Закономерности акустического мониторинга струйного измельчения полезных ископаемых / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, Б. Ф. Бевзенко, В. П. Краснопер // Збагачення корисних копалин. – 2011. – №44 (84) – С. 25 – 32.
5. Кармазин В. В. Расчеты технологических показателей обогащения полезных ископаемых / В. В. Кармазин, И. К. Младецкий, П. И. Пилов. – М. : Изд-во МГГУ. – 2006. – 221 с.
6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2003. – 604 с.
7. Исследование амплитудных распределений акустических сигналов процесса струйного измельчения / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, Л. А. Цыбулько, Ю. И. Тюря // Разработка рудных месторождений. – 2011. – Вып. 94. – С. 266 – 268.
8. Акустические образы режимов струйного измельчения / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, Л. А. Цыбулько, В. В. Гаевой, И. В. Верхоробина // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – Вып. 65. – С. 127 – 138.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 15.06.12,
в окончательном варианте 06.09.12