

УДК 621.928

Расчетно-экспериментальные исследования процессов в струйных мельницах кипящего слоя

Жуков В.П., Otwinowski H., доктора техн. наук, Смирнов С.Ф., канд. техн. наук, Kapiowski P., асп.

Предложено описание процессов измельчения и классификации в струйных мельницах кипящего слоя на основе теории цепей Маркова, а также методика и результаты экспериментальных исследований совмещенного процесса измельчения и классификации.

Ключевые слова: струйная мельница, кипящий слой, измельчение, классификация, цепь Маркова.

Computational and experimental investigation of process in a fluidized bed jet mill

A mathematical description of the processes of grinding and classification in a fluidized bed jet mill based on the theory of Markov chains is proposed. The experimental investigation of the combined process of grinding and classification on the basis of a developed approach was done.

Keywords: jet mill, fluidized bed, grinding, Markov chain.

Струйные мельницы кипящего слоя в настоящее время широко применяются для получения чистых и особо чистых материалов в химической и смежных отраслях промышленности. Если собственно процессу измельчения посвящено достаточно большое число публикаций [1–5], то процесс классификации в этих мельницах освещен достаточно скудно. Описание классификации и измельчения материала осложняется совместным протеканием процессов внутри рабочего объема мельницы. Предлагается методика декомпозиции системы на отдельные процессы с использованием подходов системного анализа: измельчение и классификация; их раздельное исследование и синтез общей модели системы.

Описание отдельных процессов и синтез их моделей предлагается реализовать в рамках ячеечных матричных моделей с использованием математического аппарата теории цепей Маркова, который хорошо зарекомендовал себя при моделировании различных процессов [6].

Принцип работы струйной мельницы кипящего слоя иллюстрирует рис. 1. Исходный материал (П) загружается в реактор 1, куда через одно вертикальное и три горизонтальных сопла одновременно подается воздух (В). Находясь во взвешенном состоянии и сталкиваясь с другими частицами и со стенками аппарата, частицы интенсивно измельчаются. Образовавшиеся осколки выносятся воздухом сначала в гравитационную 2, а затем в центробежную 3 ступени разделения. Крупные частицы после классификации возвращаются в реактор для повторного измельчения, а мелкие частицы (М) выносятся воздухом в циклон.

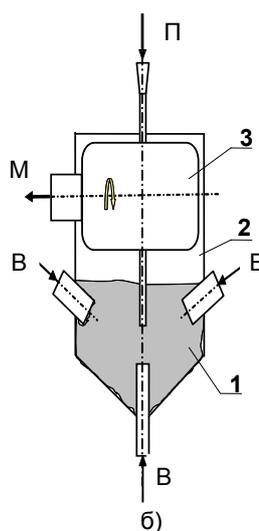
Измельчение материала в струйных мельницах кипящего слоя реализуется преимущественно за счет истирания. При истирании от исходной частицы откалываются мелкие осколки, а масса частиц фракции после разрушения переходит только в два класса крупности: мелкий и соседний. Матричное описание измельчения в рамках популяционно-балансовой модели представляется в виде [7]

$$F^{k+1} = GF^k, \quad (1)$$

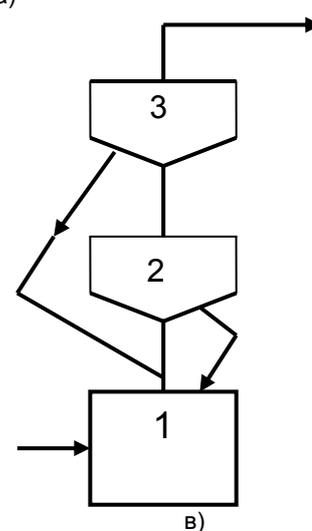
где F – фракционный состав материала, представленный вектором-столбцом; k – дискретное время процесса, которое рассчитывается из выражения $k = t/\Delta t$; t – полное время пребывания материала в мельнице при периодическом измельчении; Δt – шаг по времени.



а)



б)



в)

Рис. 1. Фотография (а), технологическая (б) и расчетная (в) схемы струйной мельницы кипящего слоя: 1 – реактор; 2 – гравитационная ступень классификации; 3 – центробежная ступень классификации; П – подача материала; В – подача воздуха; М – выход мелкого продукта

Матрица разрушения **G** при измельчении истиранием записывается в виде

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ g_{21} & g_{22} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & g_{32} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & g_{n-1n-1} & 0 \\ g_{n1} & g_{n2} & \dots & g_{nn-1} & g_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Вероятности переходов массы частиц при разрушении из фракции *j* во фракцию *i* определяются соотношением

$$g_{ij} = \begin{cases} 1 - S_j \Delta t, & i = j, \\ \frac{S_j x_{j+1}^k}{x_{j+1}^k + x_n^k} \Delta t, & i = j + 1, \\ \frac{S_j x_n^k}{x_{j+1}^k + x_n^k} \Delta t, & i = n, \\ 0, & i \neq j, j + 1, n, \end{cases} \quad (3)$$

где *S* – селективная функция разрушения; *x* – размер частицы; *k* – параметр, соответствующий форме разрушаемых частиц: *k* = 1 для частиц линейной, *k* = 2 – пластинчатой, *k* = 3 – кубической структуры, индексы показывают номер фракций. Селективная функция разрушения ищется в виде степенной зависимости от размера частиц $S = \alpha x^m$, где α, m – коэффициенты. На рис. 2 приведены расчетные (линии) и экспериментальные (точки) гранулометрические составы материала после измельчения в течение 20, 40 и 60 мин. Сопоставление указанных гранулометрических составов свидетельствует об адекватном описании моделью реального процесса.

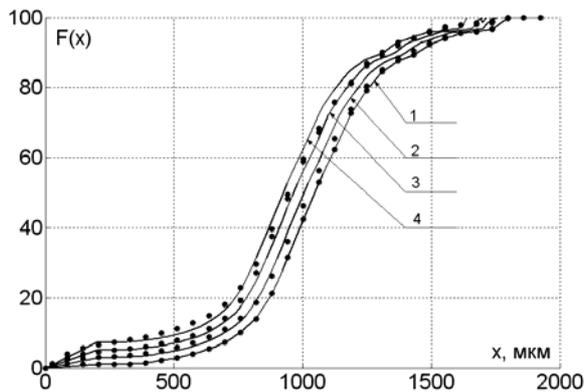


Рис. 2. Сопоставление расчетных (линии) и экспериментальных (точки) гранулометрических составов материала после измельчения: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60 мин

Гранулометрический состав измельченного материала существенно зависит от материальной загрузки слоя. Для определения вида зависимости параметра α от материальной загрузки реактора проведена специальная серия экспериментальных исследований на лабораторной мельнице кипящего слоя (рис. 1,а). Обработка результатов экспериментальных исследо-

ваний позволила определить зависимость параметра α от материальной загрузки в виде

$$\alpha = 0,0116 + 0,0084 \cdot M - 0,0021 \cdot M^2.$$

На рис. 3 приводится сопоставление экспериментальных и расчетных гранулометрических составов, которое показывает удовлетворительное совпадение рассчитанных и замеренных результатов при среднем относительном расхождении между их значениями 3,2 %.

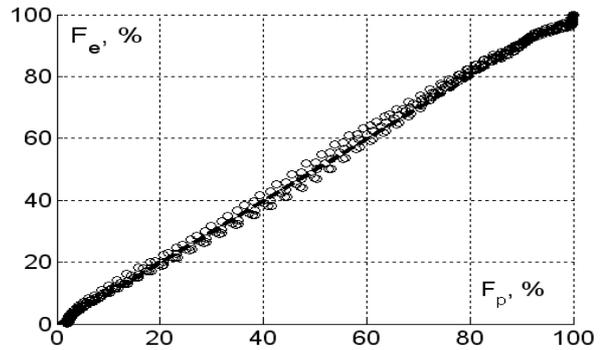


Рис. 3. Сопоставление расчетных (F_p) и экспериментальных (F_e) гранулометрических составов измельченного материала в диапазоне материальных загрузок $M = (0,5-3,5)$ кг

При построении модели классификации выделяются две ступени разделения: гравитационная и центробежная (рис. 1,в). Традиционной характеристикой классификатора является кривая разделения $C(x)$, показывающая зависимость вероятности выхода (доли) узкой фракции ($x, x+dx$) в тонкий продукт разделения от размера этой фракции x . Для дискретного набора *n* фракций кривая разделения становится многоступенчатой $C(x_j)$ и описывается матрицей классификации, в которой элементы C_{jj} ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) соответствуют долям фракций, выносимым в тонкий продукт:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & C_{nn} \end{bmatrix}$$

Для описания кривых разделения и обработки опытных данных в работе использовалась формула О.Молеруса [8]:

$$C(x) = \frac{1}{1 + \exp(S[(x/x_g)^2 - 1])}, \quad (8)$$

где *S* – параметр эффективности разделения, определяемый обычно из экспериментальных исследований; x_g – граничный размер разделения, соответствующий размеру частиц, вероятность выхода которых в тонкий продукт равна 0,5. Гранулометрический состав мелкого F_3 и крупного F_2 продуктов разделения определяются при этом следующим образом[7]:

$$\begin{aligned} F_3 &= C F_1, \\ F_2 &= (I-C) F_1. \end{aligned} \quad (9)$$

В двухпродуктовом классификаторе происходит разделение входящего потока на два: один – с преимущественным содержанием мелких частиц – в готовый продукт, другой – с преимущественным содержанием крупных частиц – в возврат.

Сложный характер движения газа и частиц измельчаемого материала в струйной мельнице существенно затрудняет исследование процесса классификации. Так как процессы измельчения и классификации в кипящем слое протекают совместно, то для экспериментального исследования только классификации в качестве исходного материала использовался кварцевый песок, который в диапазоне варьирования параметров практически не измельчался.

Специфика проведения идентификации модели по экспериментальным исследованиям заключается в классификации материала одновременно в двух ступенях: гравитационной и центробежной. В гравитационной ступени основное влияние на разделение оказывают расход воздуха через размоленное пространство и величина материальной загрузки в слое. В центробежной ступени на процесс классификации существенно влияют частота вращения ротора классификатора и скорость газа. Идентификация гравитационной ступени проводилась по опытным данным, полученным на лабораторной струйной мельнице кипящего слоя (рис. 1,а) при отключенной центробежной ступени (при нулевой скорости вращения ротора). Во время опытов контролировались следующие параметры процесса: p_p – атмосферное давление; p – давление энергоносителя перед мельницей; n – скорость вращения ротора классификатора; t – время опыта; M_N – масса загрузки реактора в начале опыта; M_K – масса загрузки реактора в конце опыта; M_C – масса материала в циклоне; Q – расход воздуха через мельницу. Гранулометрические составы продуктов определялись на анализаторе дисперсности IPS–A System.

Фракционный состав, найденный на первом этапе разделения в гравитационной ступени классификации при различных скоростях газового потока, считался исходным для центробежной ступени разделения. На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости выхода тонкого продукта для второй (центробежной) ступени классификации от расхода газа через установку при различных скоростях вращения ротора классификатора.

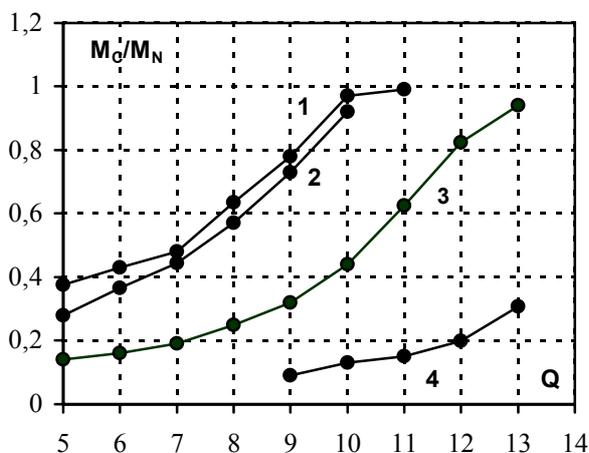


Рис. 4. Экспериментальные зависимости выхода тонкого продукта после классификации ($t = 180$ с) от расхода газа (Q , $m^3/час$) при различных скоростях вращения ротора классификатора (при разных скоростях вращения ротора центробежной ступени): 1 – $n = 0$; 2 – $n = 7,5$; 3 – $n = 15$; 4 – $n = 25$ 1/с

Результаты экспериментальных исследований были обработаны следующим образом. При отключенной второй ступени был подобран граничный размер первой ступени для различных расходов газа через ступень. Затем при подключении второй ступени с заданным числом оборотов и расходом газа через классификатор, считая известным граничный размер первой ступени, определяли методом наименьших квадратов граничный размер второй ступени разделения. Результаты расчетного исследования приведены на рис. 5 в виде зависимости граничного размера первой и второй ступеней разделения от расхода воздуха при различных скоростях вращения ротора. Представленные на рис.5 зависимости являются основой экспериментального обеспечения метода расчета классификации в кипящем слое.

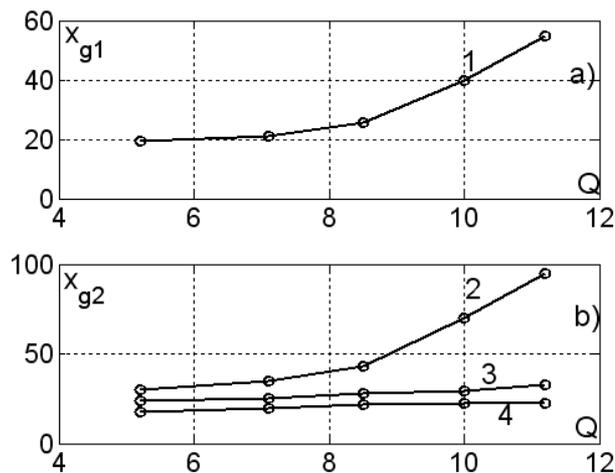


Рис. 5. Расчетно-экспериментальные зависимости граничного размера гравитационной ступени (а) и центробежной ступени (б) от расхода газа через мельницу (Q , $m^3/час$) при разных скоростях вращения ротора центробежной ступени: 1 – $n = 0$; 2 – $n = 7,5$; 3 – $n = 15$; 4 – $n = 25$ 1/с

Разработанные матричные модели процессов измельчения (1) и классификации (9) позволяют синтезировать в рамках матричной формализации [7] модель струйной мельницы кипящего слоя и метод ее расчета.

Список литературы

1. Метод расчета струйной мельницы кипящего слоя / А.В. Огурцов, D. Zbronski, В.П. Жуков и др. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2004. – №10. – С.122–124.
2. Palaniandy S., Azizli K., Hussin H., Hashim S. Effect of operational parameters on the breakage mechanism of silica in a jet mill // Minerals Engineering. – 2008. – 21. – P. 380–388.
3. Fukunak T., Golmanb B., Shinohara K. Batch grinding kinetics of Ethenzamide particles by fluidized-bed jet-milling // International Journal of Pharmaceutics. – 2006. – 311. – P. 89–96.
4. Berthiaux H., Dodds J. Modeling fine grinding in a fluidized bed opposed jet mill. Part I: batch grinding kinetics // Powder Technology. – 1999. – 106. – P. 78–87.
5. Tasirin S.M., Geldart D. Experimental investigation on fluidized bed jet grinding // Powder Technology. – 1999. – 105. – P. 337–341.
6. Mizonov V.E., Berthiaux H., Zhukov V.P., Bernotat S. Application of multi-dimensional Markov chains to model kinetics of grinding with internal classification // Int. J. Miner. Process, v.74, issue 1001 (2004), pp.307–315.
7. Mizonov V., Zhukov V., Bernotat S. Simulation of grinding: new approaches. – Ivanovo: ISPEU Press, 1997.
8. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия, 1989.

Жуков Владимир Павлович,
Ивановский государственный энергетический университет,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
e-mail: zhukov@ispu.ru
zhukov@home.ivanovo.ru

Смирнов Станислав Федорович
Ивановский государственный архитектурно-строительный университет,
кандидат технических наук, докторант,
телефон 8-961-248-43-49.

Otwinowski Henryk ,
Ченстоховский политехнический институт (Польша),
доктор технических наук, заведующий кафедрой котлов и термодинамики,
адрес: Польша 42 218 Честохова, Аллея Армии Крайовой, 19,
телефон +48 34 250 579,
e-mail: zhukov@ispu.ru
zhukov@home.ivanovo.ru

Kaniowski Piotr,
Ченстоховский политехнический институт (Польша),
аспирант кафедры котлов и термодинамики,
адрес: Польша 42 218 Честохова, Аллея Армии Крайовой, 19,
телефон +48 34 250 579,
e-mail: zhukov@ispu.ru
zhukov@home.ivanovo.ru