

ФОРМИРОВАНИЕ ФРАКЦИОННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В СТРУЙНЫХ МЕЛЬНИЦАХ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

А.Н. БЕЛЯКОВ¹, В.П. ЖУКОВ¹, Н. ОТВИНОВСКИ², Т. WYLECIA²

¹ ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Иваново, Россия

² Institute of Thermal Machinery, Czestochowa University of Technology, Poland

E-mail: zhukov@home.ivanovo.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Процессы измельчения, движения и классификации сыпучих материалов в струйных мельницах кипящего слоя традиционно рассматриваются последовательно, хотя их взаимное влияние весьма существенно.

Материалы и методы: Для описания совмещенных процессов в струйной мельнице предложено использовать уравнение Больцмана.

Результаты: На основе уравнения Больцмана разработана математическая модель совместного протекания процессов движения, измельчения и классификации, получено численное решение уравнения, приведены результаты вычислительных экспериментов. Предложен новый подход к моделированию совмещенных процессов технологии переработки сыпучих материалов.

Выводы: Проведенные исследования позволили разработать математическое описание совмещенных процессов в струйной мельнице кипящего слоя, определить на его основе распределение вещества и энергии по фазовому пространству мельницы и спрогнозировать крупность готового продукта в аппарате.

Ключевые слова: измельчение, классификация, математическая модель, уравнение Больцмана, сыпучие материалы.

FORMATION OF FRACTIONAL AND POWER FLOWS IN FLUIDIZED BED JET MILLS

A.N. BELYAKOV¹, V. P. ZHUKOV¹, H. OTWINOWSKI², T. WYLECIA²

¹Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russia

²Institute of Thermal Machinery, Czestochowa University of Technology, Poland

E-mail: zhukov@home.ivanovo.ru

Abstract

Background: Traditionally, the processes of grinding, transportation and classification of loose materials in fluidized bed jet mills are analyzed consistently though their mutual influence is quite essential.

Materials and methods: We suggest the Boltzmann equation to describe combined processes in a jet mill.

Results: On the basis of the Boltzmann equation we developed the mathematical model of combined processes of transportation, grinding and classification, obtained a numerical solution of the equation, and listed the results of computing experiments. We suggest a new approach to modeling combined processes in loose materials processing technology.

Conclusions: The study suggests mathematical description of combined processes in fluidized bed jet mills, uses this mathematical description to determine distribution of substance matter and energy in the phase space of the mill, and allows to project fineness of the finished product in the machine.

Key words: grinding, classification, mathematical model, the Boltzmann equation, loose materials.

Струйные мельницы кипящего слоя используются во многих отраслях промышленности для получения особо чистых мелкодисперсных порошков [1, 2].

Процессы измельчения, движения и классификации сыпучих материалов в струйных мельницах кипящего слоя традиционно описываются последовательно [1], хотя взаимное влияние этих процессов весьма существенно.

Ниже предлагается математическая модель, которая позволяет описывать совместное протекание процессов движения, измельчения и классификации порошков в струйной мельнице кипящего слоя, определение на ее основе фракционных и энергетических потоков и тех-

нологических показателей режимов работы установки.

Объектом исследований является струйная мельница кипящего слоя, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Аппарат выполнен в виде вертикального вентилируемого реактора [1], подача исходного порошка в который осуществляется через патрубок 1, а подача вентилирующего агента (газа) – через патрубок 2. В рабочем объеме аппарата за счет столкновений частиц происходит их измельчение. Готовый продукт выносятся из аппарата газом через патрубок 3.

Построение модели выполняется на основе уравнения Больцмана [3, 4], которое позволяет описывать совмещенные процессы в

выбранном фазовом пространстве. Структура фазового пространства для струйной мельницы показана на рис. 1,б. В качестве определяющих координат выбраны геометрическая координата z , скорость частицы v и размер частицы x . Уравнение Больцмана в этом случае записывается в виде

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial vf}{\partial z} + \frac{\partial af}{\partial v} = f_c^i + f_c^e, \quad (1)$$

где $f(z, v, x, t)$ – искомая плотность распределения частиц по координате z , скорости v и размеру частиц x в момент времени t ; a – ускорение частицы; f_c^e – источниковый член уравнения, обусловленный внешними потоками; f_c^i – источниковый член уравнения, связанный с внутренними потоками измельчаемого вещества между ячейками.

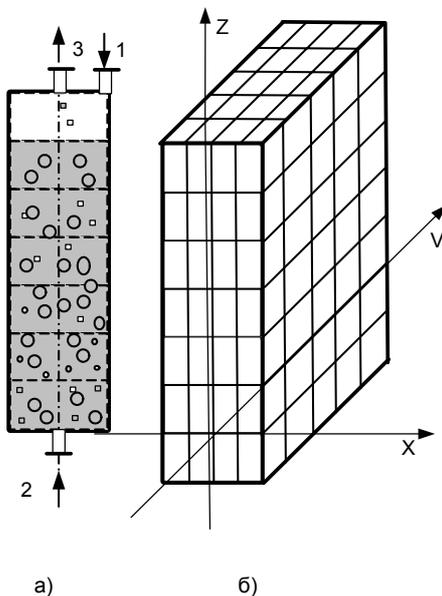


Рис. 1. Эскиз (а) и расчетное фазовое пространство (б) струйной мельницы кипящего слоя: 1 – подача исходного порошка; 2 – подача воздуха; 3 – выход готового продукта и воздуха

Для решения уравнения (1) необходимо задать поле ускорений или сил, действующих на частицу. В газовом потоке вдоль вертикальной оси z на частицу действуют сила тяжести mg , сила аэродинамического сопротивления F_c и сила F_μ , обусловленная столкновениями частиц в потоке. Согласно второму закону Ньютона, проекция уравнения движения частицы на ось z записывается в виде

$$m_i a_i = -m_i g + (F_c)_i + (F_\mu)_i, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения; m – масса частицы; индекс i – номер класса крупности частиц.

После деления (2) на массу частицы выражение принимает вид

$$a_i = -g + \frac{(F_c)_i}{m_i} + \frac{(F_\mu)_i}{m_i}. \quad (3)$$

Аэродинамическая сила сопротивления, отнесенная к массе частицы (второе слагаемое в правой части уравнения (3)), находится для сферической частицы согласно [5]:

$$\frac{(F_c)_i}{m_i} = -\frac{3}{4} \frac{\rho_g}{\rho_m} \frac{c_f}{x_i} (v_i - w) |v_i - w|, \quad (4)$$

где w – скорость газа; ρ_g, ρ_m – плотности газа и материала соответственно; $c_f = f(\text{Re})$ – коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от критерия Рейнольдса (Re) [5].

Для определения силы взаимодействия частицы i -го класса крупности с частицами j -го класса (третье слагаемое в правой части (3)) используется выражение, предложенное Г.Л. Бабухой [6] и уточненное нами:

$$\frac{(F_\mu)_{ij}}{m_i} = -\frac{3}{2} \frac{(1+k)(x_i + x_j)^2}{x_i^3 + x_j^3} (v_i - v_j) |v_i - v_j| \beta(z, v, x_j), \quad (5)$$

где β_j – объемная концентрация частиц j -го класса крупности в фазовом объеме.

При выводе уточненной зависимости (5) выявлено, что объемная концентрация зависит от фазовых координат ($\beta(z, v, x)$) и является именно локальным, а не интегральным, как в [6], параметром процесса.

Решение уравнения (1) при $f_c^i = 0$ описывает эволюцию распределения вещества по фазовым координатам z и v без учета измельчения материала. Для описания измельчения в правую часть уравнения (1) необходимо ввести выражение для внутренних потоков, обусловленных измельчением. Для этого предлагается использовать селективную модель измельчения в виде [7]

$$f_c^i(z, v, x, t) = \int f(z, v, y, t) b(x, y, E) dy, \quad (6)$$

где y – размер разрушаемых частиц; $b(x, y, E)$ – функция разрушения, которая показывает долю материала фракции $[y, y+dy]$, переходящую после разрушения во фракцию $[x, x+dx]$, при подводе к разрушаемой фракции энергии $E = E(z, v, y, t)$.

Таким образом, для учета процесса измельчения необходимо определить распределение энергии разрушения по фазовому пространству $E(z, v, x, t)$ и вид функции разрушения $b(x, y, E)$, соответствующий известному энергоподводу.

Порядок определения энергии разрушения и функции разрушения рассматривается применительно к дискретному фазовому пространству (рис. 1). Для оценки энергии разрушения для ансамбля частиц предлагается подход, который базируется на формуле (5) для силы взаимодействия между одной частицей выделенного размера i и всеми частицами класса крупности j и на теореме об изменении кинетической энергии системы [8]. Согласно этой теореме, изменение кинетической энергии системы определяется работой сил, действующих на систему. Часть механической энергии ансамбля частиц, которая рассеивается при ударе, в первом приближении счита-

ется энергией разрушения. Выражение для силы взаимодействия частиц двух классов (5) позволяет оценить уменьшение величины силы взаимодействия за счет диссипации энергии при ударе. При абсолютно упругом ударе механическая энергия частиц сохраняется, а при неупругом ударе часть энергии теряется. Уменьшение величины силы взаимодействия частиц находится с учетом (5) как разность между силой при абсолютно упругом ($k = 1$) и неупругом ($k < 1$) ударах:

$$\frac{(F_{\mu})_{ij}^D}{m_i} = \frac{(F_{\mu})_{ij}}{m_i} \Big|_{k=1} - \frac{(F_{\mu})_{ij}}{m_i} \Big|_{k<1} = -\frac{3(1-k)(x_i + x_j)^2}{2(x_i^3 + x_j^3)} (v_i - v_j) |v_i - v_j| \beta(z, v, x_j). \quad (7)$$

Произведение силы на перемещение частиц под действием этой силы $\Delta z = v\Delta t$ позволяет оценить работу, или энергию, разрушения. За время Δt удельная энергия разрушения определяется как

$$e_{ij} = \frac{(E)_{ij}^D}{m} = \frac{(F_{\mu})_{ij}^D}{m_i} \Delta z = \frac{(F_{\mu})_{ij}^D}{m_i} v \Delta t. \quad (8)$$

Для определения суммарной энергии, которая подводится при разрушении к i -й фракции, необходимо просуммировать энергию (8) по тем классам крупности (ячейкам), которые взаимодействуют с наблюдаемой частицей. Считается, что частицы за малый промежуток времени Δt взаимодействуют только с частицами, расположенными на одном с ней горизонтальном уровне аппарата, поэтому суммирование энергии выполняется только для ячеек этого уровня:

$$e_i = \sum_j e_{ij}.$$

Известное распределение энергии разрушения по ячейкам фазового пространства (9) и известное распределение вещества по этим же ячейкам позволяют в рамках селективной модели прогнозировать крупность продуктов разрушения. При известном подводе энергии к материалу вид функции разрушения (6) определяется, согласно [7], в виде

$$b_{ji} = \frac{\exp(\mu_i \tilde{e}_{ij})}{\sum \exp(\mu_i \tilde{e}_{ij})}, \quad (10)$$

$$e_i = \sum_j \tilde{e}_{ij} b_{ji}, \quad (11)$$

где \tilde{e}_{ij} – энергия, необходимая для разрушения частиц класса j до размера частиц класса i , определяемая в соответствии с известными энергетическими законами измельчения: Риттингера, Бонда или Кика [7]; μ_i – коэффициент, значение которого находится из баланса энергий (11).

Гранулометрические составы продуктов разрушения при разном подводе энергии, найденные согласно модели (10)–(11), приведены на рис. 2.

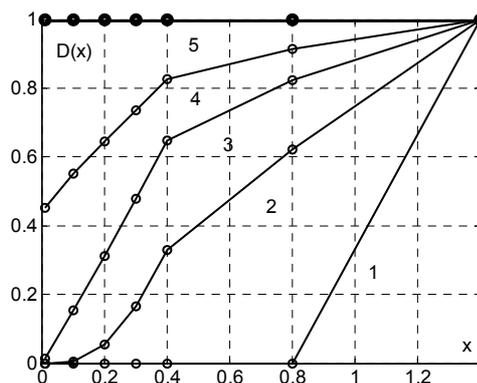


Рис. 2. Кривые распределения продуктов разрушения по крупности при разном удельном энергоподводе: 1 – 0; 2 – 1; 3 – 4; 4 – 48; 5 – 99 кДж/кг ($D(x)$ – проход материала через контрольное сито размера x)

Система уравнений (1)–(11) является замкнутым математическим описанием мельницы кипящего слоя.

Для численного решения системы уравнений (1)–(11) предложен вычислительный метод [9], алгоритм построения которого представлен на рис. 3. Многомерное фазовое пространство представляется одномерным вектором состояния. Для каждой ячейки вектора определяется адреса ячеек, с которыми она может взаимодействовать, и вероятности перехода вещества в эти ячейки. Эволюция вектора состояния системы описывается выражением

$$f_i^{k+1} = \sum_j p_{ij} f_j^k, \quad (12)$$

где p_{ij} – вероятность перехода из j -й ячейки в i -ю; верхний индекс k соответствует номеру шага по времени.

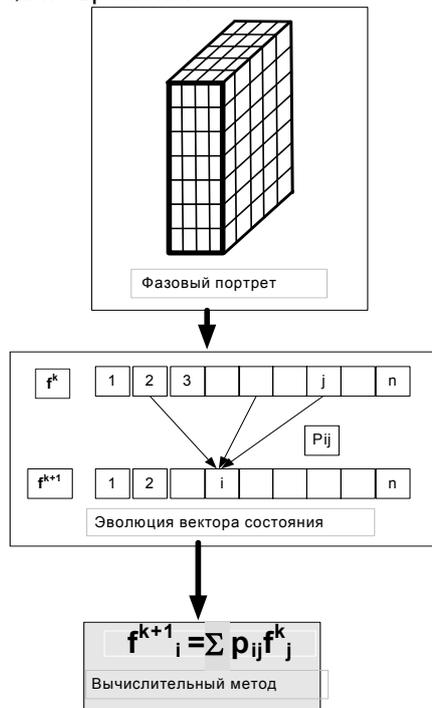


Рис. 3. Алгоритм построения модели эволюции состояния системы

При проведении расчетных исследований фазовое пространство представлено трехмерным массивом ячеек, дискретные значения фазовых координат которого задаются векторами: $z = [0, 1, 0, 2, 0, 3, 0, 4, 0, 5, 0, 6, 0, 7, 0, 8]$, м; $v = [-2, 8, -2, 1, -1, 4, -0, 7, 0, 0, 1, 0, 7, 1, 4, 2, 1, 2, 8, 3, 5]$, м/с; $x = [1, 35, 0, 8, 0, 45, 0, 25, 0, 165, 0, 125, 0, 05]$, мм. Подача исходного материала плотностью 2000 кг/м^3 осуществляется в точку фазового пространства с координатами $z_0 = 0,5 \text{ м}$, $v_0 = 0,7 \text{ м/с}$. Скорость вентилярующего газа при этом составляет $3,5 \text{ м/с}$.

Расчеты, выполненные в рамках предложенного подхода, позволили определить распределение вещества и энергии в выбранном фазовом пространстве. Указанные распределения приводятся на рис. 4 в виде изолиний, вдоль которых сохраняется постоянное значение плотности вещества и энергии. Строки матрицы рисунков (рис. 4) соответствуют сечениям фазового пространства на разной высоте аппарата. По оси абсцисс на каждом графике показаны значения скорости (v), а по оси ординат – значения крупности (x) частиц.

На рис. 5 представлены результаты расчета гранулометрического состава порошков: в питании аппарата, внутри аппарата без учета измельчения и с учетом измельчения материала в установке.

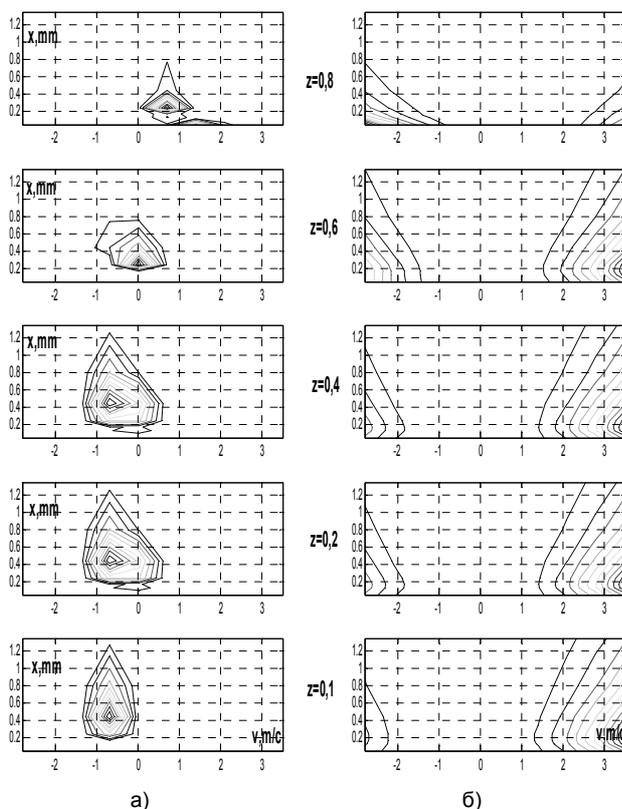


Рис. 4. Распределения вещества (а) и энергии (б) по фазовому пространству в виде изолиний в координатах x, v при разной высоте сечения аппарата z

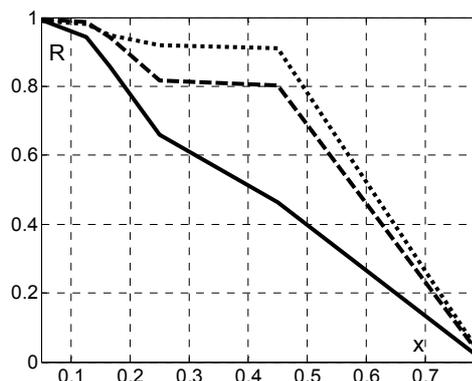


Рис. 5. Интегральное распределение материала по крупности: пунктирная линия – в питании; штриховая линия – в аппарате без учета разрушения; сплошная линия – в аппарате с учетом разрушения материала ($R(x)$ – остаток материала на контрольном сите размера x)

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать математическое описание совмещенных процессов в струйной мельнице кипящего слоя, определить на его основе распределение вещества и энергии по фазовому пространству мельницы и спрогнозировать крупность готового продукта в аппарате.

Список литературы

1. Огурцов А.В. Метод расчета струйной мельницы кипящего слоя // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2004. – № 10. – С. 122–124.
2. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
3. Вулис Л.А. Теория и расчет магнитогазодинамических течений в каналах. – М.: Атомиздат, 1971. – 384 с.
4. Жуков В.П., Беляков А.Н. Моделирование и расчет совмещенных процессов на основе уравнения Больцмана // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53. – № 11. – С. 114–117.
5. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия, 1989. – 160 с.
6. Бабуха Г.Л., Рабинович М.И. Механика и теплообмен потоков полидисперсной газозвеси. – Киев, 1969. – 219 с.
7. Mizonov V., Zhukov V., Bernotat S. Simulation of Grinding: New approaches. – Ivanovo: ISPEU Press, 1997. – 108 p.
8. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1983. – 640 с.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет многомерных совмещенных процессов измельчения, классификации в сыпучих средах №2010612671 от 19 апреля 2010 года» / А.Н. Беляков, В.П. Жуков, А.А. Власюк, А.Е. Барочкин.

References

1. Ogurtsov, A.V. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2004, 10, pp. 122–124.
2. Gel'perin, N.I., Aynshteyn, V.G., Kvasha, V.B. *Osnovy tekhniki psevdoozhivleniya* [The foundations of production technology], Moscow: Khimiya, 1967, 664 p.
3. Vulis, L.A. *Teoriya i raschet magnetogazodinamicheskikh techeniy v kanalakakh* [Theory and calculation of magnetogasdynamic flows in channels], Moscow: Atomizdat, 1971, 384 p.
4. Zhukov, V.P., Belyakov, A.N. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2010, vol. 53, 11, pp. 114–117.

5. Mizonov, V.E., Ushakov, S.G. Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov [Aerodynamic classification of powders], Moscow: Khimiya, 1989, 160 p.

6. Babukha, G.L., Rabinovich, M.I. Mekhanika i teploobmen potokov polidispersnoy gazovzvesi [Mechanics and heat exchange of polydisperse gas flows], Kiev, 1969, 219 p.

7. Mizonov, V., Zhukov, V., Bernotat, S. Simulation of Grinding: New approaches, Ivanovo: ISPEU Press, 1997, 108 p.

8. Loytsyanskiy, L.G., Lur'e, A.I. Kurs teoreticheskoy mekhaniki [The course of theoretical mechanics], Moscow: Nauka, 1983, 640 p.

9. Belyakov, A.N., Zhukov, V.P., Vlasyuk, A.A., Barochkin, A.E. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM «Raschet mnogomernykh sovmeshchennykh protsessov izmel'cheniya, klassifikatsii v sypuchikh sredakh №2010612671 ot 19 aprelya 2010 goda» [Certificate of state registration for a software program «Calculation of polydimensional integrated processes of refining, and classification in granular medium №2010612671, April 19, 2010»].

Беляков Антон Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, докторант кафедры прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-45.

Жуков Владимир Павлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-45.

Henryk Otwinowski,
Institute of Thermal Machinery,
Częstochowa University of Technology, Poland,
e-mail: zhukov@home.ivanovo.ru

Tomasz Wyleciał,
Department of Industrial Furnaces and Environment Protection,
Częstochowa University of Technology, Poland,
E-mail: zhukov@home.ivanovo.ru