© «Вестник ИГЭУ» Вып. 3 2007 г.

УДК 621.928

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КЛАССИФИКАЦИИ МАТЕРИАЛА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

ЖУКОВ В.П., д-р техн. наук, СМИРНОВ С.Ф., канд. техн. наук, OTWINOWSKI H. д-р техн. наук, URBANIAK D. канд. техн. наук

Представлены математическая модель классификации дисперсных материалов в реакторах кипящего слоя и результаты экспериментальных исследований процесса. Выполнена идентификация модели и проверка ее адекватности. Предлагается вероятностный подход к описанию классификации частиц в кипящем слое, приводятся результаты расчетно-экспериментального исследования процесса.

Ключевые слова: реакторы кипящего слоя, дисперсные материалы, математическая модель, кривая разделения.

THE MATHEMATIC MODEL OF MATERIAL CLASSIFICATION IN BOILING BED

ZHUKOV V.P., Ph.D., SMIRNOV S.F., Ph.D., OTWINOWSKI H., Ph.D., URBANIAK D., Ph.D.

The article contains the mathematical model of dispersed material classification in boiling bed reactors and the results of this process experimental research. The model identification and the checking up of its adequacy are carried out. Probabilistic approach to the particle classification description in boiling bed is given the results of calculation and experimental process research are listed.

Key words: boiling bed reactors, dispersed materials, mathematical model, splitting curve.

В реакторах кипящего слоя при обработке дисперсных материалов происходит унос из слоя преимущественно мелких частиц. Учет классификации частиц по крупности при расчете основных и вспомогательных процессов является необходимым условием для организации эффективной работы реактора.

В качестве объекта моделирования выбран реактор периодического действия с кипящим слоем дисперсного материала. Частицы в слое, двигаясь хаотично, имеют различные по направлению и величине скорости. Экспериментально установлено [1], что распределение частиц по скоростям соответствует распределению молекул газа по скоростям – распределению Максвелла [2]. Этот факт позволяет при описании поведения частиц в слое использовать известные подходы и зависимости статистической физики. Частицы, двигаясь хаотично, с определенной вероятностью могут покинуть слой. Цель математического моделирования – определение вероятности выноса частиц из слоя в различные моменты времени. Для обозначения зависимости вероятности выноса частиц в мелкий продукт от размера зерен в теории классификации используется термин *кривая разделения* [3]. Мелкий продукт разделения в реакторе кипящего слоя уносится из слоя газом, а крупный продукт остается в реакторе. Знание кривой разделения позволяет рассчитать гранулометрический состав и поверхность загрузки [3].

Для выноса частицы из слоя необходимо наступление двух последовательных событий: достижение частицей границы кипящего слоя (событие A) и унос частицы с границы из слоя (событие B). Соответственно вероятность выноса частиц из слоя за единицу времени (скорость классификации) $\dot{\varphi}$ определяется произведением вероятностей двух последовательных событий:

$$\dot{\varphi} = P(A)P(B). \qquad (1)$$

Вероятность достижения частицей границы слоя за единицу времени рассчитывается как отношение числа частиц, долетевших до границы слоя, к общему числу частиц в реакторе. Число частиц, достигающих границы слоя, выражается через произведение площади границы и числа ударов об единичную площадку $\nu(x)$, которое, в свою очередь, находится по известной из статистической физики формуле для числа ударов молекул о стенку [2]. Общее число частиц размера x в реакторе выражается через произведение концентрации частиц в единице объема n(x) и объема реактора V. Учитывая сделанные замечания, формула для вероятности события A записывается в виде

$$P(A) = \frac{\nu(x)S}{n(x)V} = \frac{<v>n(x)S}{4n(x)SH} = \frac{<v>}{4H}. \qquad (2)$$

Средняя скорость частиц в слое <v> находится по известной из статистической физики зависимости [2]

$$<v> = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{4}{\pi\beta}}, \qquad \beta = \frac{m}{2kT},$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура; m – масса частицы; H – высота слоя; S – площадь границы слоя; n(x) – концентрация частиц; V – объем загрузки реактора.

Температура для кипящего слоя является мерой кинетической энергии частиц и в этом смысле аналогична традиционной термодинамической температуре.

Вероятность уноса из слоя частиц, достигших границы (событие B), определяется как доля частиц, двигающихся вверх с положительной скоростью. Эта доля определяется как интеграл от распределения частиц по скоростям:

$$P(B) = \int_0^{v_{max}} f(v)\,dv. \qquad (3)$$

Распределение частиц по скоростям f(v) представляется распределением Максвелла, в котором математическое ожидание скорости частиц a(x) выражается через разность скорости газа $v_{газ}$ и скорости витания частицы $v_{вит}(x)$:

$$a(x) = v_{газ} - v_{вит}(x).$$

Скорость витания, в свою очередь, находится как равновесная скорость движения сферической

© ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

частицы в вертикальном вентилируемом канале. Для силы аэродинамического сопротивления, которая в соответствии с условиями реактора определяется законом Стокса, получается зависимость для скорости витания в виде [3]

$$v_{вит}(x) = A x^2,$$

где $A = \dfrac{g\rho_{мат}}{18\nu\rho_{газ}}$; $\rho_{мат}$, $\rho_{газ}$ – плотность материала и газа, соответственно; ν – динамическая вязкость; g – ускорение свободного падения.

Подстановка распределения Максвелла в (3) приводит выражение к виду

$$P(B) = \frac{\sqrt{\beta}}{\sqrt{\pi}} \int_0^{v_{max}} \exp(-\beta(a(x) - v)^2)\,dv. \qquad (4)$$

Скорость классификации определяет долю частиц, покидающих слой за единицу времени, что позволяет с учетом (1) записать дифференциальное уравнение изменения числа частиц в реакторе N:

$$\frac{dN(x)}{dt}\frac{1}{N(x)} = -\dot{\varphi} = -P(A)P(B). \qquad (5)$$

Согласно выражению (2), вероятность события A зависит от высоты слоя в реакторе. Рассматриваются два наиболее характерных случая изменения высоты слоя загрузки реактора:

- высота слоя загрузки не меняется (H = const), но при уносе частиц из слоя изменяется концентрация наблюдаемых частиц в слое (n = var) (такая ситуация наблюдается, например, в энергетических котлах, где слой формируется с помощью инертной насадки, а частицы топлива составляют незначительную часть загрузки);
- высота слоя определяется загрузкой реактора частицами реагента (H = var).

Решение уравнения (5) для двух указанных случаев с начальными условиями $N(0) = N_0$ представляется в виде зависимости числа частиц фракции от времени процесса:

$$N = \begin{cases} N_0 \exp(-A_3 x^{-1,5} P(B)\,t), & H = const, \\ N_0 - A_2 x^{-1,5} P(B)\,t, & H = var, \end{cases} \qquad (6)$$

где $A_2 = \dfrac{nS}{4}\sqrt{\dfrac{48kT}{\pi^2 \rho_{мат}}}$; $A_3 = \dfrac{1}{4H}\sqrt{\dfrac{48kT}{\pi^2 \rho_{мат}}}$.

Кривая разделения для различных моментов времени определяется отношением числа частиц, покинувших реактор, к числу частиц в начальной загрузке N_0.

При выполнении численных расчетов для реактора, работающего в периодическом режиме, загрузка считается кусочно-постоянной (для выбранного временного шага H = const). После проведения расчета на временном шаге производится уточнение загрузки и высоты слоя. Расчет повторяется до достижения конечного времени. Анализ полученных в результате расчета кривых разделения при различной продолжительности процесса классификации (рис. 1) показывает, что с увеличением времени процесса растет граничный размер и эффективность процесса разделения.

Основной задачей экспериментальных исследований являлось получение опытных данных для идентификации и проверки адекватности модели. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке струйной мельницы кипящего слоя. В качестве исследуемого материала использовался кварцевый песок, который в диапазоне варьирования параметров практически не измельчался. Отсутствие измельчения контролировалось посредством баланса массы фракций до и после опыта.

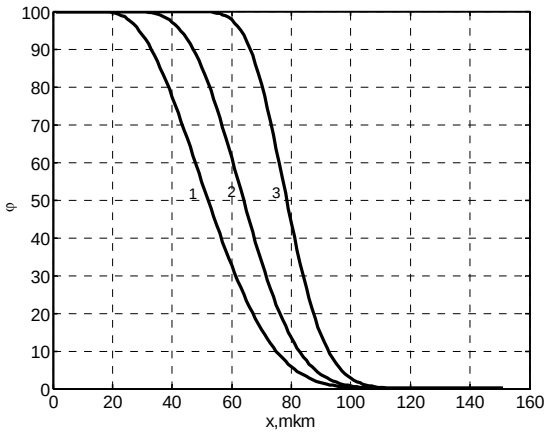

Рис. 1. Расчетные кривые разделения при различной продолжительности процесса классификации в реакторе кипящего слоя: 1 – 30 с; 2 – 60 с; 3 – 120 с

В начале опыта порция материала загружалась в реактор и подвергалась классификации в течение заданного времени. После завершения эксперимента проводилось определение массы и гранулометрического состава загрузки реактора и материала циклона. По известной методике [3] определяли кривую разделения и показатели эффективности классификации. При проведении исследований варьировались расход газа, скорость вращения ротора классификатора и продолжительность опыта.

При выполнении идентификации модели посредством минимизации отклонения рассчитанных и замеренных значений гранулометрических составов продуктов разделения определены два параметра идентификации: β, A. Для проверки адекватности модели рассчитаны гранулометрические составы мелкого продукта при продолжительности опыта 30 с, 60 с и 120 с. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов (рис. 2) показывает удовлетворительное описание моделью реального процесса.

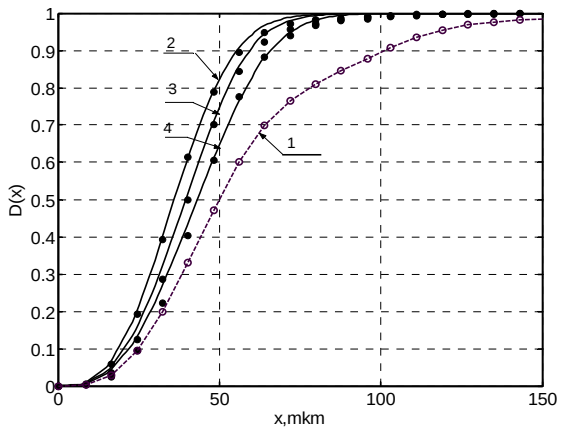

Рис. 2. Гранулометрический состав мелкого продукта классификации при различном времени процесса: 1 – 0 с; 2 – 30 с; 3 – 60 с; 4 – 120 с; ——— – расчетные данные; ●, ○ – экспериментальные данные

Результаты исследований могут использоваться для повышения точности расчета процесса

классификации и совмещенных процессов в реакторах кипящего слоя с дисперсной фазой.

Список литературы

1. **Расчетно-экспериментальное** исследование распределения частиц по скоростям в газовом потоке / В.П. Жуков, Р.А. Шорин, Х. Отвиновски и др. // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2001. – Т. 44. – Вып. 2.

2. **Савельев И.В.** Курс общей физики. Т. 1. – М.: Наука,1982.

3. **Мизонов В.Е., Ушаков С.** Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия,1989.

Жуков Владимир Павлович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov@ispu.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, профессор, зав. кафедрой котлов и термодинамики,
адрес: Польша 42 218 Честохова, Аллея Армии Крайовей, 19,
телефон +48 34 250 579,
e-mail: zhukov@ispu.ru

Urbaniak Darek,
Ченстоховский политехнический институт (Польша),
кандидат технических наук,
телефон +48 34 250 579,
e-mail: zhukov@ispu.ru

© ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»