

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГРАВИТАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА В КОЛОННОМ РЕАКТОРЕ АГРЕГАТА СЭР

Сеченов П.А., Цымбал В.П.

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, Россия

В статье рассматривается постановка задачи создания имитационной модели гравитационного сепаратора в колонном струйно-эмульсионном реакторе. Основное внимание уделено рассмотрению сил, действующих на частицу; генерированию крупности частиц по нормальному закону распределения в заданном диапазоне; скорости потока газа по высоте реактора при турбулентном движении; случайным скоростям действующих на частицу по высоте реактора; скоростям и массам двух частиц при упругом и неупругом соударении; схемам взаимодействия частиц железной руды, шлака, металла, углерода, газов CO и CO₂; расчетам плотностей газа и смеси по высоте реактора; определению массовых приходов и расходов частиц железной руды, шлака и металла. Алгоритмы программной реализации соответствующей модели будут представлены в следующей статье.

Ключевые слова: имитационная модель, гравитационный сепаратор, струйно-эмульсионный реактор, взаимодействие частиц.

The article discusses the formulation of the problem of creating a simulation model of the gravity separator in the column jet emulsion reactor. The main attention is paid to the forces acting on the particle; generation of particle size on the normal distribution within a predetermined range; the flow rate of gas through the reactor at a height of the turbulent motion; random velocities acting on the particle height of the reactor; the velocity and mass of the two particles in elastic and inelastic collisions; patterns of interaction of particles of iron ore, slag, metal, carbon emissions CO and CO₂; calculation of the density of gas and the reactor mixture adjustment; defining costs and mass arrivals iron ore particles of slag and metal. Software implementation of algorithms for the corresponding model will be presented in the next article.

Keywords: simulation model, gravity separator, spray-emulsion reactor, particles interacting ones.

Целью работы является описание механизма и создание имитационной модели гравитационного сепаратора колонного струйно-эмульсионного реактора [1–3].

На рисунке представлены силы, действующие на частицу: сила давления потока F_C , направленная снизу вверх, сила тяжести F_G и архимедова сила F_A . В зависимости от соотношения этих сил частица может подниматься, опускаться или оставаться неподвижной.

В условиях динамического равновесия принцип Д'Аламбера для движущейся частицы приводит к уравнению [4]:

$$F_G - F_C - F_A = m \frac{d\omega_{\text{ТВ}}}{dt}, \quad (1)$$

где $\omega_{\text{ТВ}}$ – скорость движения сферической частицы.

Сила тяжести выражается как

$$F_G = mg, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения.

Сила давления потока

$$F_c = c \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{\omega^2}{\gamma}, \quad (3)$$

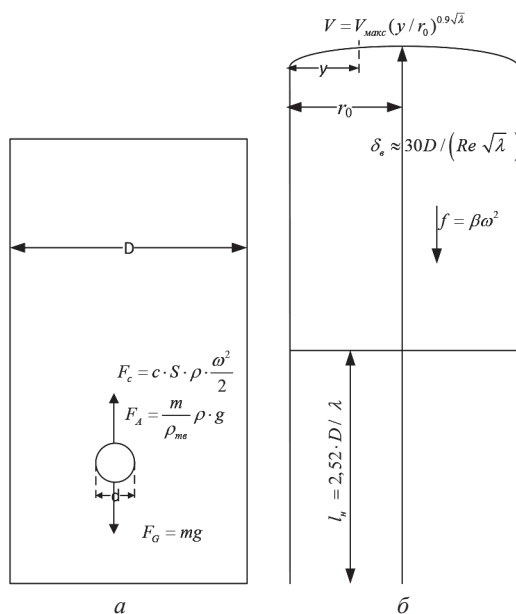
где S – площадь сечения обтекаемого тела по миделю (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную векторам скорости набегающего потока); ρ – плотность смеси; ω – скорость потока смеси; c – коэффициент лобового сопротивления, который зависит от формы обтекаемого тела и числа Рейнольдса. Для сферических частиц в турбулентном режиме коэффициент $c = 0,44$.

Подъемная или архимедова сила:

$$F_A = \frac{m}{\rho_{\text{TP}}} \rho \cdot g. \quad (4)$$

Из уравнений (1)–(4) получим

$$\frac{d\omega_{\text{TB}}}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{TB}}} \right) - \frac{c \cdot \rho \cdot \omega^2}{2 \cdot m} \cdot S. \quad (5)$$



Параболическое распределение скоростей при турбулентном движении в круглых трубах наступает не у самого начала трубы, а на некотором расстоянии l_n от входного сечения, которое находят по формуле [5]

$$l_{\text{H}} = 2,52 \cdot D/\lambda, \quad (6)$$

где D – диаметр канала, λ – коэффициент Дарси.

Силы, действующие на частицу в гравитационном сепараторе (*a*), эпюра скоростей для турбулентного течения (*b*)

Для турбулентного движения определить коэффициент Дарси можно по формуле Г. Блазиуса:

$$\lambda = 0,3164/\text{Re}^{0,25}. \quad (7)$$

Эпюру скоростей рассчитываем по формуле Альтшуля [6]:

$$V = V_{\text{макс}} (y/r_0)^{0,9\sqrt{\lambda}}, \quad (8)$$

где y – расстояние от точки, в которой рассчитывается скорость до стенки трубы; r_0 – радиус колонного реактора.

Генерировать радиус подаваемых частиц железной руды будем с помощью метода Неймана. Сначала генерируем две случайные пары чисел x_1^n и x_2^n , из них формируются другие случайные числа по следующим правилам:

$$x_1^{n*} = a + (b - a)x_1^n, \quad (9)$$

$$x_2^{n*} = w_m x_2^n, \quad (10)$$

где a, b – границы интервала определения случайной величины (т.е. минимальное и максимальное значение радиусов подаваемой железной руды), w_m – максимальное значение функции распределения.

Для функции нормального закона распределения:

$$W(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \text{ где } W(x)_{\text{макс}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}. \quad (11)$$

В качестве реализации случайной величины берется число x_1^{n*} из тех пар чисел, для которых выполняется условие:

$$x_2^{n*} \leq w(x_1^{n*}), \quad (12)$$

пары, не удовлетворяющие этому неравенству, выбрасываются, и на шаге n происходит возврат к генерации новой пары чисел.

Перейдем к рассмотрению соударений частиц. В имитационной модели различают два типа ударений: упругие (для нерасплавленных частиц) и неупругие (для расплавленных частиц). Для неупругого соударения скорость объединенной частицы

$$\omega = \frac{m_1 \bar{\omega}_1 + m_2 \bar{\omega}_2}{m_1 + m_2}. \quad (13)$$

Для упругих ударов из закона сохранения импульса и энергии получим

$$\omega_1 = \bar{\omega}_1 \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{2m_2}{(m_1 - m_2)}, \quad (14)$$

$$\omega_2 = \bar{\omega}_1 \frac{2m_1}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2)}.$$

Процессы, происходящие в верхней части реактора [1, 2], определяют процесс изменения состава конденсированных веществ и являются преимущественно восстановительными.

Здесь возможны следующие основные реакции:



На основе данных реакций были выбраны следующие механизмы взаимодействия частиц.

Каждые две секунды в колонный реактор попадают частицы железной руды с радиусами 0,1–2 мм согласно нормальному закону распределения. Состав железной руды и газов, поступающих в реактор, взят в соответствии с термодинамическими и балансовыми расчетами [7]. Зависимость скорости растворения частицы от радиуса взята из работы [3].

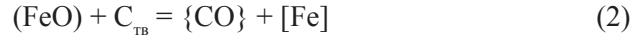
Кроме того в реактор поступают твердые частицы углерода. При встрече двух частиц типа железная руда – железная руда, углерод – углерод и железная руда – углерод удары считаются упругими. Как только частица железной руды расплавилась более чем на 50 % при встрече железная руда – углерод удар считается неупругим. При встрече двух частиц типа шлак–шлак и железо–железо, удары неупругие. После того как конкретная частица железной руды расплавилась образуются две новые частицы: железо и шлак, средний состав и плотность которых принимается в соответствии с расчетами баланса и термодинамики, а затем разыгрываются по нормальному закону распределения. При встрече шлаковой частицы газовой был реализован вариант образования шарообразных полых частиц шлака, которые образуются (как показали эксперименты на опытной установке) в результате турбулизационно-инерционного механизма. Этот вопрос заслуживает отдельного рассмотрения.

Плотность газа по высоте рассчитывается по слоям, на n -ом слое вычисляется по следующей формуле:

$$\rho_{\text{сл}, n}^{\text{г}} = \frac{\sum \rho_{\text{сл}, n}^{\text{г-ч}}}{c_{\text{сл}, n}^{\text{г-ч}}} \cdot \frac{\sum V_{\text{сл}, n}^{\text{г-ч}}}{V_{\text{сл}, n}} + \rho_0^{\text{г}} \cdot \left(1 - \frac{\sum V_{\text{сл}, n}^{\text{г-ч}}}{V_{\text{сл}, n}} \right), \quad (15)$$

где $\sum \rho_{\text{сл}, n}^{\Gamma-\text{ч}}$ – сумма плотностей газовых частиц на n -ом слое; $c_{\text{сл}, n}^{\Gamma-\text{ч}}$ – кол-во газовых частиц на n -ом слое; $\sum V_{\text{сл}, n}^{\Gamma-\text{ч}}$ – сумма объемов газовых частиц на n -ом слое; $V_{\text{сл}, n}$ – объем n -го слоя; ρ_0^{Γ} – начальная плотность газа, рассчитываемая из материального баланса.

Объем газовой частицы, определяется из объема расплавившейся железной руды в результате реакций:



$$V^{\Gamma-\text{ч}} = \frac{\rho_{\text{ж.р.}} \cdot V_{\text{ж.р.}}}{M_{\text{ж.р.}}} \cdot V_m, \quad (16)$$

где $\rho_{\text{ж.р.}}$ – плотность железной руды; $V_{\text{ж.р.}}$ – объем железной руды; $M_{\text{ж.р.}}$ – молярная масса железной руды; V_m – молярный объем газа.

$$\rho_0^{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_k \cdot \chi_k}{\left(1 + \frac{T - T_0}{T_0}\right)}, \quad (17)$$

где ρ_k – плотность k -го компонента смеси газа при н.у.; χ_k – доля k -го компонента смеси газа при н.у.; T_0 ; T – текущая температура газа, К.

Плотность среды по высоте канала делится на n частей. Плотность среды на n -ом слое вычисляется по следующей формуле:

$$\rho_{\text{сл}, n} = \frac{\sum \rho_{\text{сл}, n}^{\text{ч}}}{c_{\text{сл}, n}^{\text{ч}}} \cdot \frac{\sum V_{\text{сл}, n}^{\text{ч}}}{V_{\text{сл}, n}} + \rho_{\text{сл}, n}^{\Gamma} \left(1 - \frac{\sum V_{\text{сл}, n}^{\text{ч}}}{V_{\text{сл}, n}}\right), \quad (18)$$

где $\sum \rho_{\text{сл}, n}^{\text{ч}}$ – сумма плотностей частиц на n -ом слое; $c_{\text{сл}, n}^{\text{ч}}$ – кол-во частиц на n -ом слое; $\sum V_{\text{сл}, n}^{\text{ч}}$ – сумма объемов частиц на n -ом слое; $\rho_{\text{сл}, n}^{\Gamma}$ – плотность газа на n -ом слое, рассчитываемая по формуле (15).

Созданная имитационная модель позволяет наглядно изучить механизм гравитационного сепаратора при разном гранулометрическом составе, оценить среднее время пребывания частиц, определить средний расход частиц железа и шлака при различном заданном количестве частиц углерода. Алгоритмы и программная реализация процесса имитационного моделирования рассматривается в отдельной статье.

Список использованных источников

1. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Калашиников С.Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3-х ч.: Ч. III. Примеры реализации идей и принципов синергетики: Учеб. пособие / Под ред. В.П. Цымбала. СибГИУ. – Новокузнецк, 2005. – 264 с.
2. Цымбал В.П. Мочалов С.П., Рыбенко И.А. и др. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / Под ред. В.П. Цымбала. – М.: Металлургиздат, 2014. – 488 с.
3. Сеченов П.А., Олеников А.А., Цымбал В.П. Исследование динамики изменения состава шлака в зонной модели колонного струйно-эмульсионного реактора. Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. УрФУ. – Екатеринбург, 2014. – С. 105–110.
4. Лавренко А.Т. Автореферат диссертации магистра: «Анализ работы сепаратора прямого коксового газа». [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.uran.donetsk.ua>. Заглавие с экрана.
5. Гидравлика Часть I. Методические материалы по курсу «Гидравлика» / Крамаренко В.В., Савичев О.Г. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 124 с.
6. А.Д. Альтигуль, В.И. Калишун, Ф.Г. Майрановский, П.П. Пальгунов. Примеры расчетов по гидравлике. Учебное пособие для вузов. Под ред. А.Д. Альтигуля. М.: Стройиздат, 1977. – 248 с.
7. Ore Enrichment Required for a Self-Organizing Jet-Emulsion Reactor / V.P. Tsymbal, S.P. Mochalov, M.S. Parovinchakudp // SteelinTranslation. – 2009. – Vol. 39. No 4. – 310–312 p.