

но значительно влияет на величину прогибов. Отклонения вала от оси вращения приводят к дополнительной вибрации, биению, неправильной работе и в итоге к преждевременному выходу из строя подшипников качения и элементов довольно дорогостоящего торцевого уплотнения. Используя полученные по предлагаемой методике результаты расчетов и приведенные зависимости, можно связать основные параметры горизонтальной бисерной мельницы для правильного подбора торцевого уплотнения и для рационального ее конструирования в целом.

Литература

1. Индейкин, Е.А. Пигментирование лакокрасочных материалов / Е.А. Индейкин, Л.Н. Лейбзон, И.А. Толмачев. – Л.: Химия, 1986. – 160 с.
2. Масунов, Е.Б. Преимущество различных типов отечественного диспергирующего оборудования с мелющими телами / Е.Б. Масунов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1983. – № 2. – С. 37–39.
3. Михалев, М.Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств (примеры и задачи): учеб. пособие / М.Ф. Михалев, [и др.] – Л.: Машиностроение, 1984. – 304 с.
4. Козловский, В.И. Влияние конструктивных особенностей шаровой мельницы с мешалкой на ее эффективность / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2015. – № 7. – С. 43–45.
5. Козловский, В.И. Определение энергозатрат на вращение рабочего органа шаровой мельницы с мешалкой / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 5–6. – С. 14–17.

УДК 621.926

Мытько Д.Ю., Гребенчук П.С., Петров О.А.
(БГТУ)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АГЛОМЕРАЦИИ ЧАСТИЦ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

Движение как тонкодисперсных частиц, так и агломератов в закрученном газовом потоке может быть описано вторым законом Ньютона. Механизм агломерации моделируется с учетом траектории движения частиц в циклоне и вероятности их столкновения.

Модель агломерации частиц в турбулентных потоках предложена Зоммерфельдом. Автор предполагает, что в Эйлеровом–Лагранжевом

методе все частицы, размер которых больше, чем турбулентные масштабы длины, участвуют в процессе агломерации, и турбулентная инерция и сдвиг являются определяющим механизмом столкновения частиц. Частоту столкновений f_c одной частицы (т. е. $n_{p,i} = 1$) с диаметром $d_{p,i}$ и скоростью $\vec{u}_{p,i}$ со всеми другими частицами с диаметром $d_{p,j}$ и скоростью $\vec{u}_{p,j}$ можно вычислить согласно кинетической теории газов с помощью следующего уравнения

$$f_c = \frac{N_c}{n_{p,i}} = \sum_{j=1}^{N_{class}} \frac{\pi}{4} (d_{p,1} + d_{p,2})^2 \|\vec{u}_{p,1} - \vec{u}_{p,2}\| n_{p,j}. \quad (1)$$

В работах по моделированию в псевдооживленных слоях [2] с концентрацией частиц, аналогичной концентрации в циклонах, показано, что изменением распределения плотности мелких частиц из-за агломерации броуновским движением можно пренебречь по сравнению с соответствующим изменением из-за турбулентности/сдвига (даже для частиц диаметром до 0,2 мкм).

На рисунке представлен алгоритм предлагаемой модели агломерации.

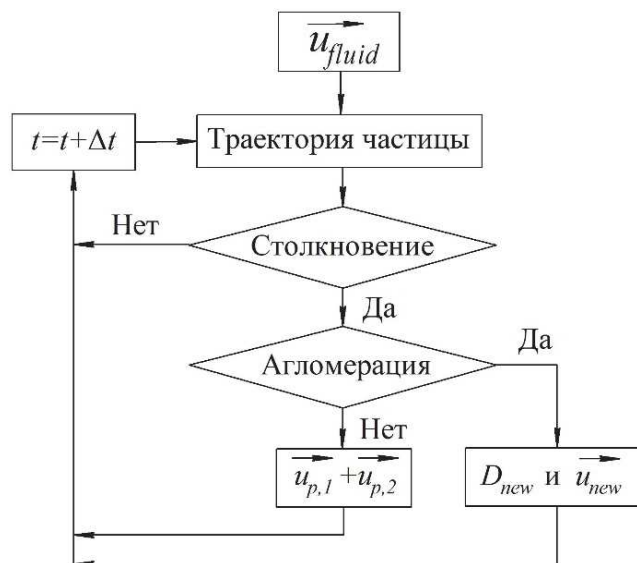


Рисунок – Алгоритм модели агломерации частиц

Одним из первых шагов является то, что модель должна оценить контрольный объем, равный (по размеру и форме) исследуемому циклону. Контрольный объем, используемый в данной модели, имеет тот же объем, но не такую же геометрию, как у реального циклона.

Модель также предполагает, что частицы, которые попадают в циклон, равномерно распределены в кольцевом пространстве между выхлопной трубой и корпусом циклона. По аналогии с моделью Мёзеса

и Лёффлера [3] эффективность сепарации не зависит от осевой координаты, трехмерный расчетный объем может быть заменен двухмерным.

Данные, используемые в модели, расположены в 4 группах: геометрические параметры (геометрия системы), эксплуатационные параметры (рабочие условия, такие как давление, температура, расход газа, и т. д.), параметры частиц (распределение частиц по размерам, плотность и т. д.) и параметры взаимодействия частиц (шаг взаимодействия, время взаимодействия и т.д.). Каждая из этих групп оказывает различное влияние на окончательный результат, но геометрические и эксплуатационные параметры в основном используются для прогнозирования начальной эффективности, в то время как некоторые параметры частиц и их взаимодействия используются для оценки воздействия агломерации на конечную эффективность.

Модель сначала вычисляет скорость газа в расчетном объеме, а затем определяет траекторию каждой отдельной частицы, которая вводится в этот контрольный объем.

Траектория движения и скорость частицы определяются следующим образом

$$\frac{dx_{p,i}^N}{dt} = u_{p,i}^N \quad N = 1 \dots N_{particles}, \quad (2)$$

$$\frac{du_{p,i}^N}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\rho c_D}{\rho_p d_p^N} (u_{fluid,i} - u_{p,i}^N) \left\| \vec{u}_{fluid} - \vec{u}_p^N \right\| + g_i \quad N = 1 \dots N_{particles} \quad (3)$$

Коэффициент сопротивления и число Рейнольдса для частиц рассчитываются по следующим уравнениям

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1.0 + 0.15 Re_p^{0.687}) \\ 0.44 \end{cases}, \quad (4)$$

$$Re_p = \frac{\rho \|\vec{u}_{fluid} - \vec{u}_p\| d_p}{\mu} \quad (5)$$

Решение уравнений (2–5) в заданном поле скоростей газового потока дает определенное поведение частиц в контрольном объеме. Однако в данной модели учитываются случайные турбулентные флуктуации газового потока. Очевидно, что различное заданное поле скоростей газового потока дает разную эффективность сепарации.

Для учета турбулентности газового потока, используя модель Зоммерфельда [1], скорость газового потока пересчитывается каждый шаг в каждом положении согласно уравнению

$$u_{fluid,i}^{n+1} = u_{fluid,i}^n R_{p,i}(\Delta t, \Delta r) + |u_{fluid,i}^n| \sqrt{1 - [R_{p,i}(\Delta t, \Delta r)]^2} \times N(0,1) \quad (6)$$

где $N(0,1)$ – случайное число, полученное стандартным нормальным распределением. Первое слагаемое справа характеризует коррелированную величину, а второй член – случайный вклад в колебания скорости. Корреляционная функция $(R_{p,i}(\Delta t, \Delta r))$ включает лагранжевую и эйлерову составляющие, чтобы учесть пересекающиеся траектории в случае, когда учитывается сила тяжести

$$R_{p,i}(\Delta t, \Delta r) = R_L(\Delta t) \times R_{E,i}(\Delta r), \quad (7)$$

где индекс i обозначает каждое из компонентов x и y . Для лагранжевой автокорреляционной функции используется экспоненциальная формы, как показано в уравнении

$$R_L(\Delta t) = \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_L}\right), \quad (8)$$

где T_L – Лагранжевый интегральный временной масштаб.

После получения траекторий частиц в турбулентном потоке для установления, произошло ли столкновение между двумя частицами, используется статистический критерий (вероятность столкновения).

Вероятность столкновения – это количество столкновений в течение временного шага. Она рассчитывается как произведение временного шага Δt и частоты столкновений

$$P_{collision} = \frac{\pi}{4} (d_{p,1} + d_{p,2})^2 \|\overline{u}_{p,1} - \overline{u}_{p,2}\| N_p \Delta t \quad (9)$$

где $d_{p,1}$ и $d_{p,2}$ – диаметры частиц; $\|\overline{u}_{p,1} - \overline{u}_{p,2}\|$ является евклидовой нормой относительной скорости и N_p – число частиц в единице объема.

Модель сравнивает вероятность столкновения со случайным числом $U(0, 1)$, полученным из равномерного распределения, и учитывает, что столкновение возникает, когда $U(0, 1) < P_{collision}$. При отсутствии столкновения каждая частица повторно вводится в следующий временной шаг с ее неизменившейся скоростью.

В модели считается, что агломерат формируется, когда нормальная относительная скорость ($\|\overline{u}_{p,1} - \overline{u}_{p,2}\| \cos\phi$) не больше, чем критическая скорость, которая определяется с учетом только сил Ван дер Вальса. В противном случае модель учитывает сохранение импульса и вычисляет новые скорости двух полученных частиц после взаимодействия. Если происходит агломерация, то модель вычисляет размер нового агломерата, который имеет сферическую форму, и его скорость.

Все частицы вводятся комбинированно, т.е. бинарные взаимодействия анализируются случайным образом на каждом временном шаге, обновляя скорости газового потока и положения частиц. Этот процесс повторяется до тех пор, пока финальное время взаимодействия,

определяемое комбинацией геометрических и эксплуатационных параметров, не будет достигнуто.

Таким образом, данная модель позволит определить траекторию движения частиц на входе в циклон с учетом их взаимодействия в зависимости от скорости потока газа. Она может быть использована в том числе для проектирования новых конструкций циклонов с рециркуляционным контуром.

Литература

1. Sommerfield, M. Validation of a stochastic lagrangial modelling approach for inter-particle collisions in homogeneous isotropic turbulence / M. Sommerfield // International Journal of Multiphase Flow 27 (10) / 2001. – P. 1829–1858.

2. Mao, D. A model for fine particle agglomeration in circulation fluidized bed absorbers / D. Mao, J.R. Edwards, A. Kuznetsov, R. Srivastava // Heat and Mass Transfer 38 / 2002. – 379 p.

3. Mothes, H. About the influence of particle agglomeration on the separation in a gas cyclone / H. Mothes, F. Loffer // Staub Reinhaltung Der Luft 44 / 1984. – P. 9–14.

УДК 621.926

Вайтехович П.Е., Хвесько Г.М.
(БГТУ)

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВАЛКОВОГО АГРЕГАТА ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ОТХОДОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

Процессы измельчения довольно широко используются в химической промышленности, особенно при производстве минеральных удобрений. А вот в нефтепереработке до недавнего времени они не находили применения. Однако увеличение глубины переработки нефти привело к образованию значительного количества твердых отходов в виде нефтяного кокса. Для дальнейшего использования требуется его тонкое измельчение.

По своим свойствам, прочностным характеристикам нефтяной кокс близок к каменному углю, клинкеру. В этой связи для его помола может использоваться широкая номенклатура измельчающих агрегатов, ударного и раздавливающего действия. Преимущества последних обоснованы в работе [1] авторов данного сообщения. Они заключаются в меньших удельных энергозатратах, абразивном износе и динамических нагрузках.