

УДК 621.928.6

Д. И. Чиркун, ст. преподаватель (БГТУ); А. Э. Левданский, доцент (БГТУ);
Э. И. Левданский, профессор (БГТУ); Е. В. Опимах, студент (БГТУ)

ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОКАСКАДНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО КЛАССИФИКАТОРА

В статье представлены материалы по теоретическому исследованию многокаскадного гравитационного классификатора. Проанализированы различные подходы к математическому моделированию и расчету аэродинамической классификации. Обосновано применение детерминированного подхода к описанию динамики материала в рабочей зоне аппарата. Предложена упрощенная физическая модель движения несущей среды и разделяемых частиц в классификаторе. На основании физической модели составлены расчетные схемы основных сил, действующих на движущиеся частицы, с помощью которых получены дифференциальные уравнения движения частиц материала по наклонной полке разделительной колонки, а также в межполочном пространстве.

In article materials on theoretical research of the multicascade gravitational qualifier are presented. Various approaches to mathematical modelling and calculation of aerodynamic classification are analysed. Application of the determined approach to the description of dynamics of a material in a working zone of the device is proved. The simplified physical model of movement of the bearing environment and divided particles in the qualifier is offered. On the basis of physical model settlement schemes of the basic forces working on moving particles with which help the differential equations of movement of particles of a material on an inclined shelf of a dividing column are received, and also between device regiments are made. Results of theoretical researches are approved and compared with experimental data on classification of quartz sand for reception of filtering materials.

Введение. Процесс разделения в гравитационных классификаторах основан на том, что частицы, взвешенные в движущемся газе или жидкости, под действием сил тяжести и аэродинамического сопротивления перемещаются в зоне разделения в разных направлениях, отделяясь друг от друга [1].

В настоящее время наиболее распространены воздушные гравитационные классификаторы типа «Зигзаг», разработанные немецкой фирмой «Alpine» (рис. 1, а), и аппараты с пересыпными полками (рис. 1, б), разработанные российскими исследователями [2].

следователи, в литературе представлены экспериментальные данные и результаты промышленной эксплуатации множества конструкций такого типа, свидетельствующие об их высокой эффективности [1–3]. В то же время результаты теоретических исследований не позволяют в полной мере производить расчеты таких аппаратов. Как правило, расчетные методики привязаны к конкретному технологическому процессу либо однотипному продукту [4, 5]. Это сдерживает внедрение каскадных классификаторов в другие технологии и свидетельствует об актуальности исследований в этом направлении.

Основная часть. Среди основных подходов к моделированию и расчету аэродинамической классификации выделяются детерминированные и стохастические модели.

Стохастические модели основаны на использовании теории вероятности для расчета динамики потока материала. Наиболее существенные результаты в этом направлении получены М. Д. Барским [2] и С. Г. Ушаковым [6] при исследовании гравитационных и центробежных классификаторов. К настоящему времени стохастические модели получили дальнейшее развитие в работах многих ученых [7, 8], разработаны различные подходы к моделированию классификации дисперсных систем. Одним из перспективных является подход, основанный на теории цепей А. А. Маркова, который использовался еще в работах Ю. И. Макарова [8], а сейчас находит широкое применение при моделировании многих физико-химических

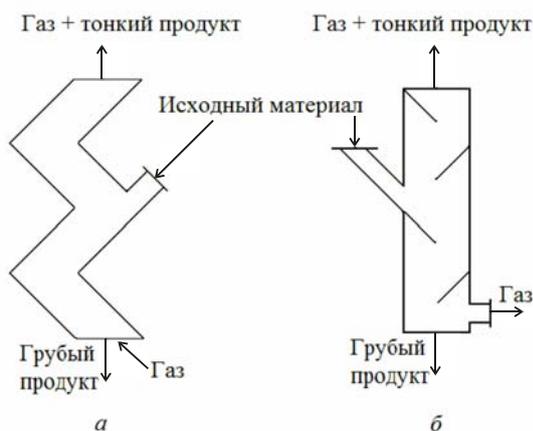


Рис. 1. Многокаскадные гравитационные классификаторы:

а – типа «Зигзаг»; б – с пересыпными полками

Созданием многокаскадных гравитационных классификаторов занимались многие ис-

процессов [7]. Основным достоинством стохастических моделей является получение формул для построения кривой разделения (кривой Тромпа), которая отражает вероятность попадания частицы определенного размера в крупный либо мелкий продукт и является основной технологической характеристикой классификатора [1].

Детерминированные модели базируются на дифференциальных уравнениях движения сыпучей среды в несущем потоке. Некоторые исследователи считают это направление малоперспективным вследствие множества допущений, принимаемых при моделировании [7]. Наиболее существенные из них заключаются в том, что, во-первых, частица движется под действием не только детерминированных, но и многочисленных случайных сил (столкновение, турбулентность и т. п.), которые сложно учесть даже в обобщенном виде, а во-вторых, не принимается во внимание стесненность движения частиц [7]. Однако многие считают, что указанные допущения не являются критическими при создании инженерных методик расчета реальных конструкций, когда к модели предъявляются не только требования точности и достоверности, но и доступности использования широкому кругу специалистов соответствующего профиля [4, 5]. Так, например, опытные данные свидетельствуют об эффективной классификации при массовом соотношении твердой и газовой фазы приблизительно 1 : 1 [2]. Учитывая разность в плотностях, можно сделать вывод о достаточно обособленном движении частиц в рабочем объеме классификатора при оптимальной производительности. Кроме того, детерминированные модели позволяют на основе анализа результатов решения уравнений движения определять многие конструктивные параметры аппаратов исходя из технологических требований к производительности и дисперсному составу конечных продуктов. Поэтому способы детерминированного моделирования распространены и развиваются в настоящее время, такой же подход был применен при теоретическом исследовании разработанной авторами конструкции многокаскадного полочного классификатора [9].

Теоретические исследования проводились в два этапа: на первом изучалось движение частиц по наклонной полке, а на втором – движение частиц в воздушном потоке до контакта со следующей полкой (согласно схеме рис. 1, б). Естественно, результаты первого этапа исследований являлись начальными условиями для последующего этапа и так далее по цепочке.

Для изучения движения частиц материала по наклонной полке классификатора была составлена расчетная схема (рис. 2).

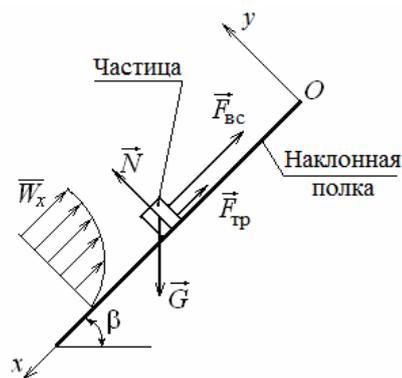


Рис. 2. Схема сил, действующих на частицу

На частицу, движущуюся по наклонной полке, действуют следующие основные силы.

Сила тяжести

$$G = mg, \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг; g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

Сила трения

$$F_{\text{тр}} = fN, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения частицы о поверхность полки; N – реакция опоры, Н.

Реакция опоры N в нашем случае, исходя из условия отсутствия движения относительно оси y (рис. 2), равна выражению

$$N = G \cos \beta. \quad (3)$$

Сила аэродинамического сопротивления движению частицы со стороны среды определяется зависимостью

$$F_{\text{вс}} = \xi S \frac{v_{\text{отн}}^2}{2} \rho_{\text{г}}, \quad (4)$$

где ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления; S – миделево сечение частицы, m^2 ; $v_{\text{отн}}$ – относительная скорость (скорость обтекания частицы потоком), m/c ; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа (воздуха), kg/m^3 .

Относительную скорость $v_{\text{отн}}$ можно найти как разность скоростей частицы по наклонной полке и потока воздуха (рис. 2)

$$v_{\text{отн}} = \frac{dx}{dt} - W_x, \quad (5)$$

где W_x – скорость воздуха, обтекающего частицу, m/c .

При турбулентном режиме течения профиль скоростей газа в каналах с достаточно высокой точностью описывается зависимостью [1]

$$\frac{W_x}{W_{\max}} = \left(\frac{y}{R} \right)^{\frac{1}{7}}, \quad (6)$$

где W_{\max} – максимальная скорость на оси канала, м/с; y – текущая координата (рис. 2), м; R – условный радиус канала, м.

Максимальная скорость по оси канала, т. е. при $y=R$, определяется при помощи выражения

$$W_{\text{cp}} = 0,85W_{\max}, \quad (7)$$

где W_{cp} – средняя скорость газа по сечению канала, м/с. Вычисляется как отношение расхода газа к площади поперечного сечения канала.

Таким образом, уравнение движения частицы по поверхности наклонной полки относительно оси x можно записать в виде

$$\frac{d^2x}{dt^2} = g(1 - f \cos \beta) - \xi S \frac{v_{\text{отн}}^2}{2m} \rho_r. \quad (8)$$

Уравнение (8) решалось численным методом в математическом пакете Matlab 6.0. Полученные данные о скорости схода частиц материала с наклонной полки в зависимости от их свойств, размера, длины полки использовались в качестве начальных условий для последующих уравнений движения.

На втором этапе исследований при помощи расчетной схемы, представленной на рис. 3, было рассмотрено движение частиц материала в восходящем воздушном потоке.

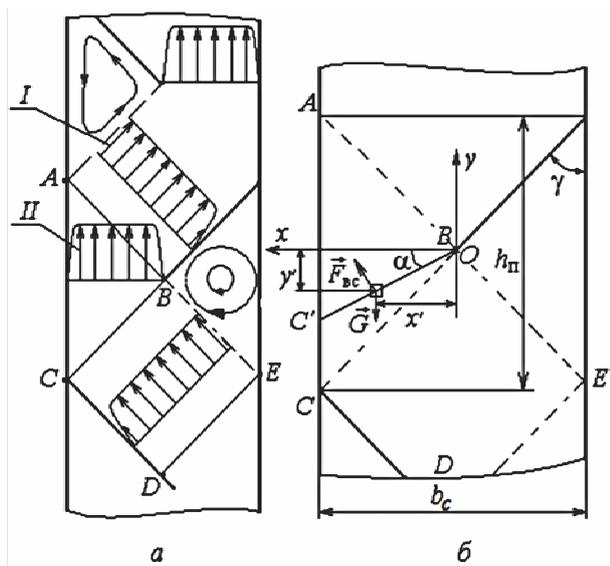


Рис. 3. Движение частиц материала и потока воздуха в полости классификатора: а – схема движения воздуха; б – схема сил, действующих на частицу материала

На частицу материала после ее отрыва от наклонной полки действуют две основные силы: сила тяжести, постоянная по величине и направлению, и сила воздушного сопротивления.

По ходу движения воздуха между наклонными полками можно выделить два характерных участка: участок I, ограниченный контуром BCDE, где средняя скорость и направление движения воздуха постоянны (рис. 3, а); и участок II, ограниченный контуром ABC, где воздушный поток поворачивает на 90° (рис. 3, а) и в ходе этого поворота средняя скорость воздуха постоянно меняется, т. к. меняется площадь свободного сечения. Профиль скоростей воздуха в классификаторе установить достаточно сложно, приведенные в литературе данные зачастую противоречивы, поэтому при расчете действующей на частицу силы аэродинамического сопротивления воспользуемся величиной средней скорости потока на сечение «условного» канала (контур BCDE и ABC на рис. 3, а).

Отметим, что в исследуемой конструкции классификатора рабочие колонки имеют квадратную форму, а наклонные полки перекрывают половину поперечного сечения. Такое конструктивное исполнение позволяет получить наиболее качественное разделение, о чем свидетельствуют экспериментальные исследования [9].

Тогда средняя скорость воздуха на участке I (контур BCDE) будет находиться по выражению

$$W_{\text{cp}} = \frac{2Q \sin \gamma}{b_c^2}, \quad (9)$$

где Q – расход проходящего через классификатор воздуха, м³/с; γ – угол наклона полок, град; b_c – ширина классификатора, м.

Скорость воздуха на участке II (контур ABC) изменяется как по величине, так и по направлению. Здесь происходит одновременный поворот потока с изменением площади поперечного сечения канала.

Предположим, что частица материала находится в произвольной точке с координатами x' и y' (рис. 3, б). Тогда скорость потока воздуха в этой точке будет равна

$$W_{\text{cp}} = \frac{Q}{b_c C'O} = \frac{2Q \cos \alpha}{b_c^2}, \quad (10)$$

где $\alpha = \arctg(y' / x')$.

Тогда в неподвижной системе координат Oxy уравнения движения частицы можно записать в виде

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= (F_{\text{вс}})_x, \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} &= (F_{\text{вс}})_y - mg. \end{aligned} \quad (11)$$

где $(F_{\text{вс}})_x$, $(F_{\text{вс}})_y$ – проекции силы воздушного сопротивления на оси координат.

Проекции силы воздушного сопротивления на оси координат определяются из выражений

$$\begin{cases} (F_{\text{вс}})_x = \xi S \frac{(v_{\text{отн}})_x v_{\text{отн}}}{2} \rho_{\Gamma}, \\ (F_{\text{вс}})_y = \xi S \frac{(v_{\text{отн}})_y v_{\text{отн}}}{2} \rho_{\Gamma}. \end{cases} \quad (12)$$

На основании этого уравнения движения частицы материала на участке I (рис. 3, а) запишутся в виде

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} = \xi S \frac{(v_{\text{отн}})_x v_{\text{отн}}}{2m} \rho_{\Gamma}, \\ \frac{d^2 y}{dt^2} = \xi S \frac{(v_{\text{отн}})_y v_{\text{отн}}}{2m} \rho_{\Gamma} - g. \end{cases} \quad (13)$$

Проекции относительной скорости с учетом (9) будут равны

$$\begin{cases} (v_{\text{отн}})_x = \frac{2Q \sin \gamma \cos \gamma}{b_c^2} \frac{dx}{dt}, \\ (v_{\text{отн}})_y = \frac{2Q \sin^2 \gamma}{b_c^2} \frac{dy}{dt}. \end{cases} \quad (14)$$

Полная величина относительной скорости

$$v_{\text{отн}} = \sqrt{\left(\frac{2Q \sin \gamma \cos \gamma}{b_c^2} \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{2Q \sin^2 \gamma}{b_c^2} \frac{dy}{dt} \right)^2}. \quad (15)$$

Если же частица материала выносится потоком воздуха в область II (контур ABC рис. 3, а), тогда расчет ее движения ведется по аналогичным дифференциальным уравнениям (13), которые дополнены учитывающей поворот потока зависимостью

$$\alpha = \arctg \left(\frac{y}{x} \right). \quad (16)$$

Для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления ξ во всем диапазоне чисел Рейнольдса использовалась эмпирическая зависимость [6]

$$\xi = 0,386 \cdot 1,325^{(\lg Re^2 - 3,87)^2}. \quad (17)$$

Заключение. Разработанные уравнения движения частиц в гравитационном каскадном классификаторе, безусловно, не претендуют на абсолютную точность и являются приближенными, т. к. не учитывают многие факторы – стесненность движения частиц, их взаимодействие, реальные профили скоростей потока воздуха между полками. Вместе с тем они позволяют устанавливать характер движения частиц различных свойств и размеров в классификаторе, определять граничный размер разделения.

Литература

1. Мизонов, В. Е. Аэродинамическая классификация порошков / В. Е. Мизонов, С. Г. Ушаков. – М.: Химия, 1989. – 158 с.
2. Барский, М. Д. Фракционирование порошков / М. Д. Барский. – М.: Недра, 1980. – 327 с.
3. Гортинский, В. В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В. В. Гортинский, А. Б. Демский, М. А. Борискин. – М.: Колос, 1980. – 325 с.
4. Тютюнин, В. В. Динамика минеральных частиц в центробежном поле при гравитационном обогащении: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.13 / В. В. Тютюнин; Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск, 2009. – 20 с.
5. Кирсанов, В. А. Научные основы и принципы совершенствования процессов и аппаратов каскадной пневмокласификации сыпучих материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / В. А. Кирсанов; Ивановский гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2005. – 36 с.
6. Ушаков, С. Г. Инерционная сепарация пыли / С. Г. Ушаков, Н. И. Зверев. – М.: Энергия, 1974. – 168 с.
7. Калинин, С. Г. Разработка методов расчета разделительной способности аэродинамических классификаторов порошков: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / С. Г. Калинин; Ивановский гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2008. – 17 с.
8. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 251 с.
9. Пневмосепаратор: пат. 5061 Респ. Беларусь, МПК7 В 04 В 4/00 / Э. И. Левданский, А. Э. Левданский, С. Э. Левданский; заявитель Э. И. Левданский. – № а 19990403; заявл. 27.04.99; опубл. 30.12.99 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1999. – № 4. – С. 45.

Поступила 31.03.2010