

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ТГУ



Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики

Международная молодежная научная конференция

17–19 ноября 2014 г., Томск



Издательство Томского университета
2015

Литература

1. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977. 815 с.
2. Худобина Ю.П. Диполь в потоке неоднородной несжимаемой жидкостин // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: матер. конф., 3–5 окт. 2006 г. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. С. 181–182.
3. Терновых Е.Ю. Конформное отображение прямолинейной полосы на криволинейную полосу с заданными границами // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: матер. науч. конф. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. С. 138–140.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАКРУТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФРАКЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ

А.В. Шваб, Н.С. Евсеев

Проводится моделирование аэродинамики двухфазного закрученного турбулентного потока в сепарационной камере воздушно-центробежного классификатора. Анализируется влияние параметров закрутки на сепарацию тонкодисперсных частиц и эффективность фракционного разделения частиц в пневматическом центробежном аппарате.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS OF ROTATION ON THE EFFICIENCY OF FRACTIONAL SEPARATION OF PARTICLE

A.V. Shvab, N.S. Evseev

The paper deals with modeling of aerodynamics two-phase swirling turbulent flow in the separation chamber of air centrifugal classifier. In this paper we analyze the effect of the parameters of rotation on the separation of particles, and the effectiveness of the fractional separation of particles in the pneumatic centrifugal machine.

В настоящее время в различных отраслях промышленности существенно возросли потребности в тонкодисперсных материалах. Важной проблемой в порошковой технологии является возможность получения тонкодисперсных порошков заданного гранулометрического состава. Для выделения тонкодисперсных фракций из полидисперсного состава порошков существуют различные методы их получения, но наиболее эффективными и экологически чистыми являются пневматические методы, в основе которых лежит использование противодействия аэродинамических и центробежных сил [1–2].

В работе проводится моделирование аэродинамики двухфазного закрученного турбулентного потока в сепарационной камере воздушно-центробежного классификатора. Поле скоростей закрученного турбулентного потока газовой фазы определялось на основе уравнений Рейнольдса, замыкание которых осуществлялось при помощи двухпараметрической модели турбулентности Уилкокса. Согласно этой модели дополнительно записываются два уравнения переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций k и удельной скорости диссипации кинетической энергии ω . Движение тонкодисперсной твердой фазы моделируется совокупностью расчетов траекторий движения отдельных частиц в лагранжевой системе координат с учетом действия инерционных, центробежных, гравитационных и аэродинамических сил. В работе также прогнозируется влияние турбулентной диффузии частиц за счет пульсационного движения газовой фазы на основе полуэмпирической вероятностной модели.

Схема вихревой камеры центробежного аппарата, в которой происходит процесс разделения порошка по размеру на крупный и мелкий продукт, представлена на рис. 1.

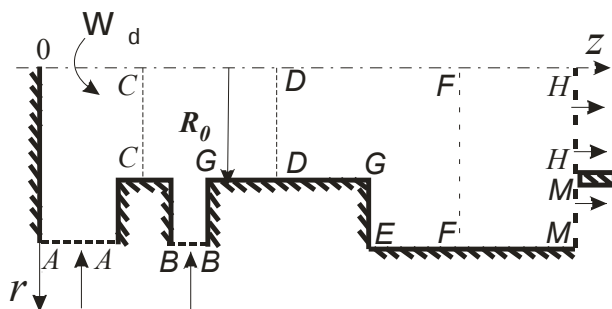


Рис. 1. Схема вихревой камеры центробежного аппарата

Турбулентный поток несущей среды совместно с твердой фазой через сечение *A-A* попадает в зону сепарации. Этот поток имеет среднюю радиальную U_0 и угловую ω_{cp} скорости. В сечении *B-B* имеется дополнительный подвод только газовой фазы, который также имеет радиальную и тангенциальную составляющие вектора скорости. Этот дополнительный подвод несущей среды позволяет, с одной стороны, оттеснить мелкие частицы к оси симметрии, чтобы они попали в мелкий продукт разделения, с другой – устранить отрыв потока за уступом вблизи области входа несущего потока. Стенки сепарационной камеры могут вращаться вокруг оси *OZ*, придавая тем самым дополнительное вращение потоку газа в исследуемом аппарате и тем самым выравнивая поле тангенциальной составляющей вектора скорости. Через сечение *H-H* поток газа вместе с мелкой фракцией покидает рабочую зону вихревой камеры разделяемого полидисперсного порошка, а крупный продукт разделения – через сечение *M-M*.

Экспериментальные данные показывают, что в расчетах существенно завышена реальная эффективность процесса разделения, так как в них не учитываются случайные факторы, которые могут изменить траекторию движения частицы. Одним из важнейших факторов, влияющих на диффузию твердой примеси в турбулентном потоке, является участие частиц в пульсационном движении несущей среды. Это явление турбулентной диффузии частиц понижает эффективность процесса классификации частиц по размерам. Будем учитывать турбулентную диффузию в соответствии с работой [3], согласно которой пульсационные значения скоростей определяются вероятностным законом Гаусса, причем дисперсией в этом законе является кинетическая энергия пульсационного движения. В случае турбулентных пульсаций вероятностный закон Гаусса можно записать в виде

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi k}} \exp \left(-\frac{(u' - u'_m)^2}{2k} \right).$$

Здесь u'_m – математическое ожидание, значение которого равно нулю; k – дисперсия, равная кинетической энергии пульсационного движения; f – плотность вероятности, максимальное значение которой определяется величиной $1/\sqrt{\pi k}$. Выражая значение пульсационной скорости из закона Гаусса, получим

$$u' = \pm \sqrt{-2k \ln(f \sqrt{2\pi k})}.$$

Как известно, значение f определяется в диапазоне $0 < f < 1/\sqrt{\pi k}$. Используя датчик случайных чисел, который определяет случайное число N в диапазоне $0 < N < 1$, найдем случайную величину пульсационной скорости:

$$u' = \pm \sqrt{-2k \ln N}. \quad (1)$$

Здесь знак перед корнем также определяется с помощью датчика случайных чисел. Учитывая полуэмпирический характер соотношения (1), введем в него константу γ , которая определяется с использованием опытных данных:

$$u' = \pm \gamma \sqrt{-2k \ln N}. \quad (2)$$

На рис. 2 показана совокупность траекторий движения частиц (без учета турбулентной диффузии) диаметром 15 мкм в зависимости от их местоположения во входном сечении сепарационной камеры.

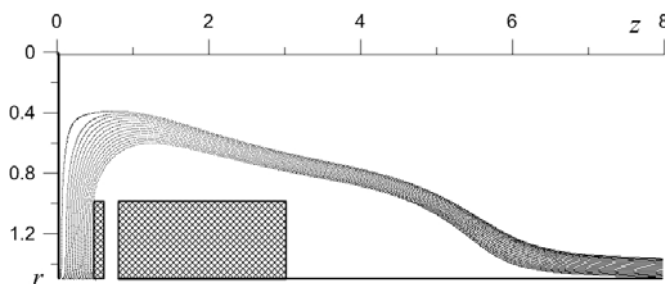


Рис. 2. Траектории движения частиц без учета турбулентной диффузии

Влияние турбулентной диффузии и местоположения старта на траекторию движения частиц представлено на рис. 3. Видно, что без учета турбулентной диффузии все частицы попадают в крупный продукт разделения, в отличие от случая учета турбулентной диффузии, при котором небольшая доля частиц попадает в мелкий продукт разделения.

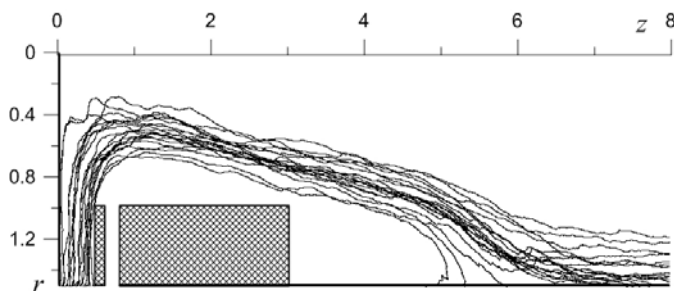


Рис. 3. Траектории движения частиц с учетом влияния турбулентной диффузии

Из графика изолиний окружной составляющей скорости (рис. 4) видно, что за счет направления закрученного потока газа к оси симметрии существенно возрастает окружная составляющая скорости в силу сохранения импульса при уменьшении радиуса. За счет дополнительного подвода закрученного газа без частиц из сечения $B-B$ поддерживается большая окружная скорость, что способствует существенному уменьшению граничного размера частиц.

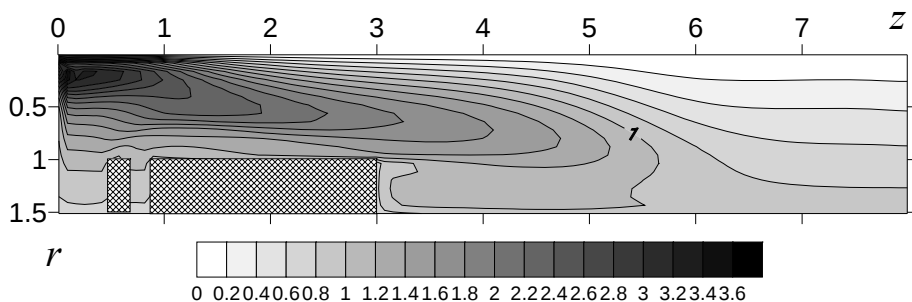


Рис. 4. Распределение окружной составляющей вектора скорости

На рис. 5 показаны кривые разделения Тромпа при различных параметрах закрутки несущей среды. Изображено влияние параметров закрутки газа на эффективность фракционного разделения частиц. Кривые 1, 2, 3 отображают режимы, при которых окружные скорости имеют безразмерные значения: $\omega R_0/U_0 = 0,5$; 0,3 и 0,1 соответственно. Видно, что увеличение окружной компоненты скорости существенно влияет на уменьшение граничного размера частиц. Из этого графика также видно, что острота сепарации увеличивается с уменьшением граничного размера, который определяется одинаковой вероятностью попадания в крупный и мелкий продукт разделения (значение граничного размера определяется при $\phi=0,5$).

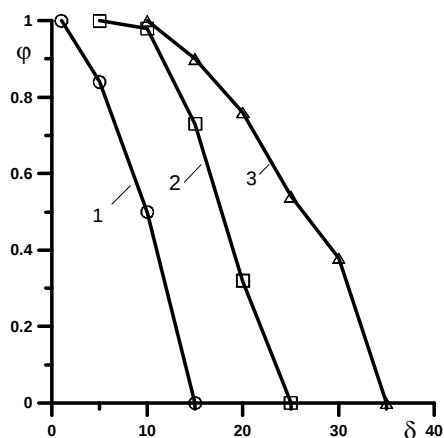


Рис. 5. Кривые разделения

Проведённые численные исследования показали, что на процесс сепарации частиц по размерам влияют режимные параметры двухфазного закрученного потока, а также турбулентная миграция частиц за счет участия их в пульсационном движении газа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-00367А.

Литература

1. Росляк А.Т., Зятиков П.Н. Воздушно-центробежная классификация микропорошков. Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. 224 с.
2. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. М.: Химия, 1989.
3. Мостафа А.А., Монджиа Х.Ц., Макдонелл В.Г., Самуэлсен Г.С. Распространение запыленных струйных течений: Теоретическое и экспериментальное исследование // Аэрокосм. техника. 2000. № 3. С. 65–82.

ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛЕ**В.А. Якименко**

Получено аналитическое решение уравнения Якоби–Гамильтона для потенциальной силы, описываемой потенциалом Леонарда Джонса. Как и в случае задач небесной механики, получаются плоские орбиты и зависимость от времени. Обращение интегралов производится численным методом.

MOVEMENT OF MATERIAL PARTICLES IN THE CENTRAL FIELD**V.A. Yakimenko**

In article the analytical decision the equation of Jakobi-Hamilton for potential force described Leonarda Johns's in potential is received. As well as in case of problems of heavenly mechanics flat orbits and dependence on time turn out. The reference of integrals is made by a numerical method.

Если потенциальная энергия частицы $U(r)$ зависит только от расстояния до силового центра, то орбиты частиц в центрально симметричном поле являются плоскими кривыми [1, 2]. В таком случае полное решение задачи можно получить, применяя метод Якоби–Гамильтона. Вводя в плоскости орбиты полярные координаты r , φ , получим для функции действия $S(r, \varphi, t)$ уравнение

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2m} \left[\left(\frac{\partial S}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial S}{\partial \varphi} \right)^2 \right] + U(r) = 0. \quad (1)$$

Методом разделения переменных, учитывая, что φ – циклическая координата, находим, что решение уравнения (1) имеет следующий вид:

$$S = -Et + G\varphi + \int \sqrt{2m[E - U(r)] - G^2/r^2} dr, \quad (2)$$

где константы разделения E и G представляют собой энергию движущейся частицы и ее момент количества движения. Величина $G^2/2mr^2$ является добавочной потенциальной энергией, соответствующей центробежной силе. Дифференцируя (2) по параметру E , получим зависимость r от t :

$$t + \beta_1 = \int \frac{m dr}{\sqrt{2m[E - U(r)] - G^2/r^2}}. \quad (3)$$

Беря от выражения (2) производную по G , получаем уравнение траекторий: