

УДК 004.42+621.928

Разработка программы для расчета функции разделения частиц в центробежном классификаторе

Дорошенко Юлия Николаевна, кандидат технических наук, доцент
 Толстых Александр Витальевич, канд. физ.-мат. наук, доцент
 Ким Владислав, магистрант

Томский государственный архитектурно-строительный университет (г. Томск)

Была разработана компьютерная программа «Расчет функции разделения». В данной программе имеется возможность проведения расчетов как с использованием метода Симпсона для вычисления определенного интеграла с заданной точностью, так и с использованием приближенной аналитической формулы. При сопоставлении этих 2-х вариантов расчета можно определить область значения исходных параметров, в которой работа центробежного классификатора будет наиболее эффективной, а также выяснить возможность применения аналитических расчетов, не снижая точность полученных результатов.

В различных технологических процессах (например, для подготовки твердого топлива для сжигания в факельных топках) с давних времен используются такие операции, как разлом твердых материалов, разделение частиц по размерам на фракции и приготовление нужного фракционного состава дисперсных смесей [1]. Разделение частиц осуществляется в различных специально разрабатываемых для этих целей аппаратах — в гравитационных и центробежных классификаторах. Продукт, выходящий из этих аппаратов, характеризует функция разделения. Расчет функции разделения связан с вычислением определенных интегралов от сложных нелинейных функций, поэтому решение этой задачи может быть получено только путем реализации соответствующих численных методов в соответствующем программном обеспечении [2, 3].

Принцип разделения частиц в гравитационном и центробежном классификаторах основывается на обеспечении равновесия частиц в рабочей зоне аппарата под действием на них противоположно-направленных аэродинамических и массовых сил. В гравитационном классификаторе в качестве массовой силы выступает сила тяжести, в центробежных - центробежная.

Выход мелкого продукта при разделении частиц в классификаторах характеризуют функцией выхода мелкого продукта

$$\phi_m = M_m / (M_m + M_k), \quad (1)$$

где M_m, M_k — вес мелкого и крупного продуктов соответственно после разделения материала. Для идеального разделения поведения функции $\phi_m(\delta)$ проиллюстрировано ступенчатой зависимостью 1 (рис. 1). Однако реально за счет взаимодействия частиц друг с другом, воздействия турбулентных молей воздуха на частицы в условиях неоднородности потока поперек трубы, ступенчатая зависимость размывается и приобретает вид 2.

Для этого случая в качестве граничного принимается такой размер частиц, которые попадают равновероятно в мелкий и крупный продукты. Для таких частиц выполняется соотношение $\phi_m(\delta^*) = 0,5$. Значения граничного размера, определяемого на реальной кривой разделения $\phi_m(\delta)$, в общем случае не совпадают.

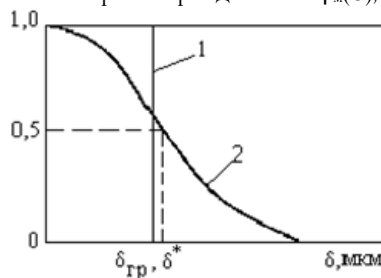


Рис. 1. Функция разделения частиц $\phi_m(\delta)$;
1,2 — идеальное и неидеальное разделение частиц, соответственно

Аналогичным образом может быть представлен процесс разделения частиц в центробежном классификаторе, где вместо гравитационной силы должна фигурировать центробежная.

Учет случайных эффектов, приводящих к размыванию кривой разделения, можно провести, используя уравнение конвективной диффузии

$$\frac{dc_j}{d\tau} = \text{div}(D_j v_j c_j - c_j v_j), \quad (2)$$

где c_j, D_j, v_j — концентрация, коэффициент диффузии, вектор скорости частиц j -ой фракции.

Это уравнение должно быть решено при соответствующих граничных условиях для концентрации C_j на границах области разделения частиц.

Рассмотрим случай центробежной классификации частицы при турбулентном течении среды. Поскольку профиль скорости и несущей среды в поперечном сечении зоны разделения почти равномерный, примем его приближенно средне расходным: $u = \bar{u}(r)$ (рис. 2).

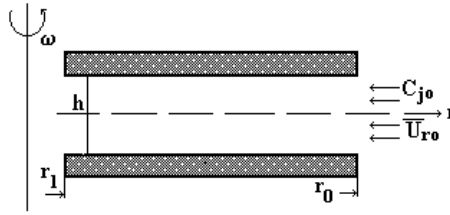


Рис. 2. Схема зоны разделения центробежного классификатора

В целом течение газа с частицами примем осесимметричным и стационарным. Тогда уравнение (2) в цилиндрической системе координат переписывается как

$$\frac{d}{dr} \left(r D_j \frac{dc_j}{dr} - v_{jr} c_j \right) = 0. \quad (3)$$

Это уравнение должно быть решено при соответствующих граничных условиях для концентрации c_j на границах области разделения частиц.

Рассмотрим приближенную постановку задачи. Положим коэффициент диффузии частиц D_j величиной постоянной, равной его среднему значению по длине зоны разделения. Далее пусть радиальная скорость частиц v_{jr} в зоне разделения подчиняется условию стационарного движения, т.е.

$$v_{jr} = u_r + \tau_j \frac{v_{j\phi}^2}{r}. \quad (4)$$

$$\tau_j = \frac{\delta_j^2 \rho_j}{18 \nu \rho}$$

Здесь v_{jr} – окружная скорость частиц, u_r – радиальная скорость газа, τ_j – время динамической релаксации частиц.

Ориентируясь на разделение мелких частиц, положим

$$v_{j\phi} \approx u_\phi, \quad (5)$$

где u_ϕ – окружная скорость газа. Таким образом, для определения v_{jr} будем иметь

$$v_{jr} = u_r + \tau_j \frac{u_\phi^2}{r}. \quad (6)$$

Скорость u_r определяется экспериментально либо на основании теории о турбулентном течении закрученного газа в зоне разделения аппарата. В ряде случаев окружную скорость можно аппроксимировать в виде степенной зависимости

$$u_\phi = u_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^m. \quad (7)$$

Изменение показателя m теоретически возможно в пределах $-1 \leq m \leq 1$, что соответствует законам твердотельного вращения ($m = -1$) и свободного вихря ($m = 1$).

Для плоскопараллельной зоны разделения в соответствии с уравнением расхода

$$u_r = \frac{u_{r0} r_0}{r}, \quad (8)$$

где u_{r0} – средняя расходная нормальная скорость газа на входе в зону разделения при $r = r_0$.

Использование уравнения конвективной диффузии приводит к следующим формулам для расчета функции разделения:

$$\Phi_m = \left[1 + \frac{\tau_j^\infty}{L} U_\phi^2(R_1) \right] C_j(R_1), U_\phi = U_0 R^{-m}; \quad (9)$$

$$0 \leq \tau_j^\infty \leq (\tau_j^\infty)_{\max}, \quad (\tau_j^\infty)_{\max} = 2|L|;$$

$$C_j(R_1) = \frac{R_1^{L/A} e^{b(1-R_1^{-2m})}}{1 - \frac{L}{A} \left(1 + \frac{\tau_j^\infty}{L} R_1^{-2m} \right) R_1^{L/A} e^{-bR_1^{-2m}} \int_{R_1}^1 R^a e^{bR^{-2m}} dr} \quad (10)$$

$$C_j(R_1) = \frac{R_1^{L/A} e^{b(1-R_1^{-2m})}}{1 - \frac{L}{A} \left(1 + \frac{\tau_j \infty}{L} R_1^{-2m} \right) R_1^{L/A} e^{b(R_{cp}^{-2m} - R_1^{-2m})} \times \frac{1 - R_1^{a+1}}{a+1}}; \quad (11)$$

$$a = -(L/A + 1); \quad b = \tau_j \infty / 2mA;$$

$$V_{jr} = L/R + \tau_j \infty U_\phi^2 / R; \quad (12)$$

$$A = 1,4\chi^2 U_o |m+1| R_1^{\frac{2m+1}{2}}; \quad (13)$$

$$\chi = 0,01 + 0,56\sqrt{|L|}. \quad (14)$$

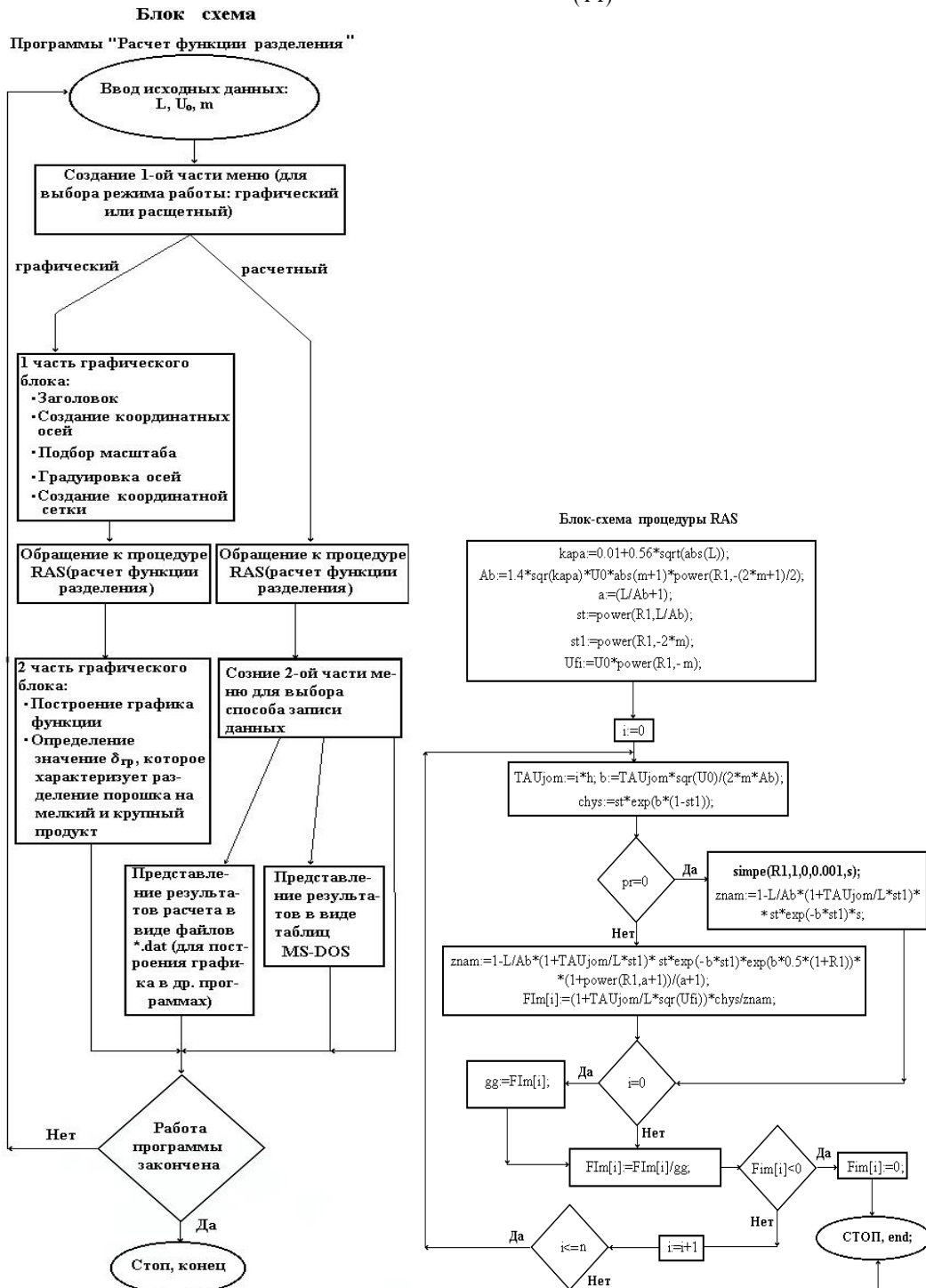


Рис. 3. Блок-схемы программы «Расчет функции разделения» и процедуры RAS

По приведенному выше алгоритму была разработана компьютерная программа, блок схема которой, а также схема основной расчетной процедуры приведена на рис. 3.

Программа «Расчет функции разделения» позволяет рассчитать значения функций разделения ϕ_m в зависимости от величины τ_j^∞ , меняющейся с произвольным шагом h . С помощью рабочего меню можно выбрать режим работы программы, в соответствии с которым значение безразмерной концентрации $C(R_1)$ определяется через соответствующий интеграл S , вычисленный методом Симпсона с автоматическим выбором шага с точностью $\varepsilon = 10^{-4}$, или этот же интеграл определяется аналитическим путем введения среднего значения $R_{cp} = 0,5(1+R_1)/2$.

Программа для расчета функции разделения позволяет получить как график функции $\phi_m(\delta)$ так и ее табличное представление. В данной программе имеется возможность проведения расчетов как с использованием метода Симпсона для вычисления определенного интеграла с заданной точностью, так и с использованием приближенной аналитической формулы.

При сопоставлении этих 2-х вариантов расчета можно определить область значения исходных параметров, в которой работа центробежного классификатора будет наиболее эффективной, а также выяснить возможность применения аналитических расчетов, не снижая точность полученных результатов.

Литература:

- 1.Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии/ В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М.: Наука, 1976. – 500 с.
- 2.Садретдинов Ш.Р. Численное моделирование закрученного течения в вихревой камере / Ш.Р. Садретдинов // «Сбор. мат. XIV Всерос. конф. АСФ России, Уфа 2008. С. 523 –524.
- 3.Шваб, А.В. Моделирование процесса классификации частиц в вихревой камере при турбулентном режиме течения /А.В. Шваб, Ш.Р. Садретдинов // Сбор. мат. VI Всерос. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» Томск.2008. С.399–400.