ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕТЫРЁХФАЗНЫХ ПОТОКОВ В СЕПАРАТОРАХ ИНЕРЦИОННОГО ТИПА

И.Х. Еникеев

Московский политехнический университет
107023, Москва, Россия

Работа посвящена распространению метода крупных частиц для расчёта течения четырёхфазных сред в каналах сложной формы, моделирующих форму двухступенчатого конфузорного воздухоочистителя (рис.1). Исследована гидродинамическая структура потока в широком диапазоне изменения определяющих параметров невозмущенного потока. Особое внимание уделено режимам движения газодисперсных потоков в криволинейных каналах с большим массовым содержанием дисперсной фазы во входном сечении канала. Рассмотрим движение четырёхфазной среды, состоящей из несущего сжимаемого газа и монодисперсных твёрдых частиц в канале с радиусом входного сечения R.В качестве 1-ой фазы будем рассматривать несущий газ, 2-ой фазы – фракцию падающих частиц, т.е. частиц, летящих к боковой поверхности канала, 3-ей фазы – фракцию частиц, отскочивших от боковой поверхности канала и 4-ой фазы – фракцию частиц, отскочивших от внутренней стенки канала, расположенной вдоль оси симметрии канала. Так как между частицами разных фракций возникают столкновения, приводящие к обмену импульсом между частицами различных фаз, то изменяются скорости как падающих, так и отражённых частиц. Это приводит к необходимости вводить в рассмотрение эффективную силу взаимодействия между частицами. Следует отметить, что учёт столкновений между частицами разных фракций приводит к хаотизации движения частиц, а значит и к появлению дополнительных членов в уравнениях импульса и энергии для частиц и дополнительной фазы частиц, расположенной вблизи стенок канала, с некоторой внутренней энергией хаотического движения и почти нулевой макроскопической скоростью. Учёт этих слагаемых и дополнительной фазы частиц существенно усложняют систему уравнений: возникают дополнительные, заранее неизвестные параметры. Поэтому в данной работе хаотизация частиц при столкновениях не учитывалась. Примем ось симметрии канала за ось OX цилиндрической системы координат (X, Y, φ). Уравнения, описывающие движение данной среды в рамках модели взаимопроникающих континуумов приведены в [1, 2]. Выражение для эффективной силы взаимодействия между частицами различных фракций $\vec{\mathrm{F}}_{se}$ такое же, как и в [2]:

$$\vec{\mathrm{F}}_{se} = \frac{k^{(F)} \upsilon_s \upsilon_l (\vec{v}_s - \vec{v}_l) \left| \vec{v}_s - \vec{v}_l \right|}{\beta_v}, \beta_v = \frac{\rho_e^o d}{\rho_1^o R}$$

Здесь величина $k^{(F)}$ определяет интенсивность силового взаимодействия фаз, а β_v - степень инерционности частиц. В работе по изучению гидродинамики полидисперсных потоков в трубах [3] приведена зависимость этого коэффициента от разности скоростей фаз. Для скоростей $\cong$ 10 м/с, $k^{(F)} \cong 0{,}1.$

Для интегрирования уравнений уравнений движения необходимо задать граничные и начальные условия. Предполагалось, что левая граница области, откуда происходит истечение газодисперсного потока расположена достаточно далеко. Тогда при x -> -oo реализуется течение без динамического (по скорости) и теплового (по температуре) отставания частиц, с вертикальными составляющими скоростей газа и частиц равными нулю. В этом случае можно считать справедливым выполнение условия однородности потока [4-5], т.е. считать, что выполнено условие:

$$\frac{\partial v_1^{(x)}}{\partial x} = 0.$$

Предполагалось также, что течение смеси на этом участке является тизоэнтропическим и изоэнтальпическим, т.е. $H_0 = const,\ S = const.$ Также считалось, что приведенная плотность второй фазы на этом участке канала являлась величиной заданной. При проведении расчетов эти граничные условия сносились в сечение x = -2. На боковых стенках для газа выполняется условие непротекания, а для частиц - условие нормального отражения с коэффициентом отражения k^n $(v_s^{(\tau)} = v_e^{(\tau)}, v_s^{(n)} = -k^{(n)} v_e^{(n)}$. На выходе из канала в качестве граничных условий для газа использовались соотношения, полученные для одномерного изоэнтропического истечения газа из сопла [6].

В качестве начальных данных использовались параметры невозмущенного потока в сечении x = -2, с $F_{1l} = 0$ и $q_{1l} = 0$. При интегрировании системы уравнений конечно-разностным методом в криволинейной области, происходит замена непрерывной области на сеточную. Непосредственная замена приводит к появлению вблизи границы области нерегулярных узлов (или расчетных ячеек). В этом случае для постановки граничных условий в слое нерегулярных расчетных ячеек в методе крупных частиц вводят в рассмотрение дробные ячейки [7]. Практика проведения расчетов с использованием дробных ячеек показала, что этот алгоритм является достаточно громоздким, особенно в случае, когда число Маха невозмущённого потока M_0 << 1. Поэтому целесообразней ввести такие новые переменные $\xi = \xi(x, y),\ \eta = \eta(x, y),$ в которых криволинейная область становится прямоугольной. В работах [4, 5] показано, что, если при таком преобразовании якобиан преобразования $I = D(\xi,\eta)/D(x,y)$ существует и не обращается в ноль ни в одной точке области, то дивергентная форма уравнений [1,2] сохраняется. При помощи замены независимых переменных $x = x$,

$$\xi = \frac{— - G(x)}{F(x) - G(x)},$$

где F(x) и G(x) – уравнения верхней и нижней границы канала, криволинейная область переходит в прямоугольную

$$N\,(0 \le x \le 1,\ 0 \le \xi \le 1).$$

Уравнения движения, записанные в переменных $(x,\ \xi)$ приведены в [1]. Как показано в работах [7, 8] для течений в областях прямоугольной формы при M_o<<1 на Эйлеровом этапе целесообразней применять неявную по времени разностную схему для вычисления давления.

В работе [1] предлагается обобщение метода крупных частиц с неявным эйлеровым этапом для случая областей сложной формы.

Расчетёты показали, что начиная с m_{20} = 0.2, где m_{20} – концентрация дисперсной фазы во входном сечении канала, дисперсная фаза оказывает влияние не только на движение газа, но и существенно влияет на движение частиц различных фракций. Так, например, с увеличением m_{20} под действием частиц 2-ой фазы (частиц, попадающих в канал вместе с газом) частицы, отскочившие от боковой стенки канала более интенсивно сносятся в сторону выходного сечения канала, тем самым уменьшая область, в которой расположены частицы, отражённые от поверхности, расположенной вблизи оси симметрии канала (рис.2).

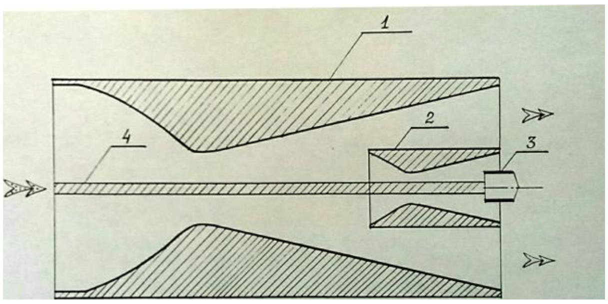

Рис.1. Схема двухступенчатого конфузорного воздухоочистителя с центральным отводом пыли.
1— корпус 1-ой ступени, 2 - корпус 2-ой ступени, 3 — пылеприёмник, 4 — перегородка

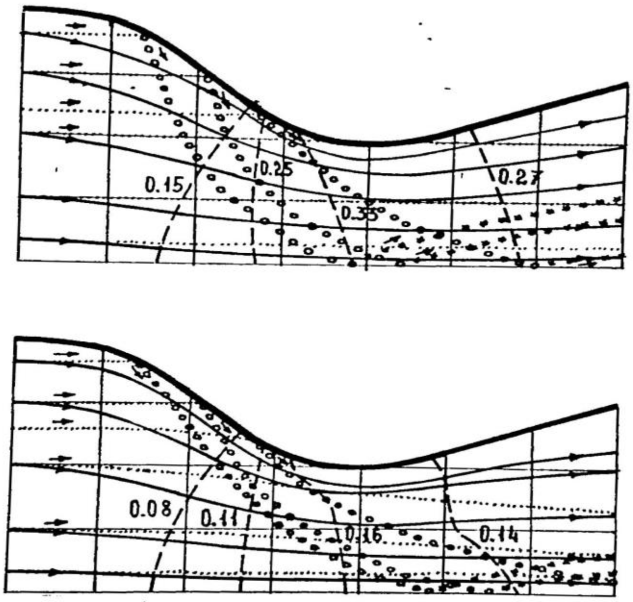

Рис. 2. Линии тока газа и частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Enikeev I.H.** Application of method large particles for the calculation of three-phase flow in a narrowing channel // Teor. Foundations of chemical technol., v.43, N°3, 2009,p.322-329.
2. **Nigmatulin R.I.** Fundamentals of mechanics of multiphase media. – M.: Nauka, 1078.
3. **Babuha T.D., Schreiber A.A.** Interaction of particles of polydisperse material in tow-phase flowers. – Kiev: Nauk. Dumka, 1972.
4. **Rychkov A.D.** Mathematical modeling of gas-dynamic processes in channels and nozzles. – Novosibirsk: Nauka, 1976.
5. **Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Kraiko A.I., Prokopov G.A.** Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics. – M.: Nauka, 1976.
6. **Loytzyanky L.G.** Mechanics of liquid and gas. – M.: Nauka, 1978.
7. **Belotserkovsky O.M., Davydov Yu. M.** Method of large particles in gas dynamics. The computational experiment. – M.: Nauka, 1982.
8. **Davydov Yu. M.** Differential approximation and representation of difference schemes. – M.: MIPT, 1981.