

ТРАНСПОРТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

532.542:541.12

РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ ПЫЛЕВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КАНАЛАХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ВОЛОДИН, асп. А.Н. БОГДАНОВ

Представлена основанная на параметрических методах расчета, математическая модель турбулентного пограничного слоя (ТПС) двухфазных пылевоздушных потоков, для транспортных магистралей теплоэнергетического оборудования, работающего на твердом топливе.

To showed mathematical model the turbulent boundary layer (TBL) the two-state dust-air flows founding on the parameter methods calculation on the transport highways the heat-energy equipments working at the hard fuel.

Один из основных видов топлива в энергетике — это твердое топливо (уголь, торф и др.), на котором работают пылеугольные котлы. Для повышения надёжности конструкций и получения оптимальных показателей работы технологических систем необходимо детально изучать протекающие процессы.

Одной из характерных особенностей протекания гидродинамических процессов является наличие эффектов нестационарности (режимы пуска-останова, маневровые режимы, выполняемые для выбора оптимальных режимов работы, функционирование средств автоматизации и др.). Нестационарность приводит к значительному отклонению параметров одно- и двухфазных течений и может существенно изменить протекание гидродинамических, тепловых, массообменных и химических процессов, а в ряде случаев нестационарные режимы определяют прочностные запасы конструкций.

Многофазные системы, состоящие из непрерывной (несущей) и дискретной (несомой) фаз, могут быть представлены в виде некоторой совокупности частиц, находящихся в непрерывном движении. Ввиду невозможности определения параметров для каждой из этих частиц используем осредненное описание их движения с введением понятия многоскоростного континуума и взаимопроникающего движения его составляющих [1]. В рамках континуального представления двухфазных потоков уравнения движения и неразрывности при отсутствии фазовых переходов можно записать отдельно для каждой фазы [2, 3].

При невысокой концентрации твёрдой фазы взаимодействием между частицами и стенкой можно пренебречь. Если массообменных процессов нет, взаимодействие между фазами определяется в основном действующими на частицу аэродинамическими силами [4, 2, 5] и в этом случае система дифференциальных уравнений может быть представлена в виде уравнение движения для несжимаемой жидкости

$$\rho \frac{\partial w_x}{\partial t} + \rho w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + \rho w_r \frac{\partial w_x}{\partial r} = - \frac{dP}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \tau}{\partial r} + \frac{\rho_s \beta_s}{\tau_s} (w_{sx} - w_x); \quad (1)$$

уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_r}{\partial r} = 0 ; \quad (2)$$

уравнение движения для «газа» частиц

$$\rho_s \frac{\partial w_{sx}}{\partial t} + \rho_s w_{sx} \frac{\partial w_{sx}}{\partial x} + \rho_s w_{sr} \frac{\partial w_{sx}}{\partial r} = \frac{\rho_s \beta_s}{\tau_s} (w_x - w_{sx}) ; \quad (3)$$

уравнение неразрывности для «газа» частиц

$$\frac{\partial w_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial w_{sr}}{\partial r} = 0 , \quad (4)$$

где $\tau_s = (2\rho_s + \rho)d_s^2 / (36\mu)$ — время релаксации частиц, β_s — концентрация частиц.

При решении уравнений пограничного слоя воспользуемся параметрическими интегральными методами расчёта, которые основываются на решении интегральных уравнений пограничного слоя с привлечением полуэмпирических зависимостей теории турбулентности.

Предполагая, что профиль скоростей в потенциальной части течения не деформируется под действием внешних факторов и имеет прямолинейную форму, после интегрирования дифференциальных уравнений (1) и (2) в пределах пограничного слоя получаем следующие интегральные зависимости:

соотношение импульсов

$$F_1 \frac{\partial \bar{Re}^{++}}{\partial t} + F_2 \frac{\partial \bar{Re}^{++}}{\partial X} = F_3 + F_4 , \quad (5)$$

$$\text{где } F_1 = \frac{2r_0 H}{w_{01}} , \quad (6)$$

$$F_2 = 4H \bar{Re}^{++} (2 + H) + 1 , \quad (7)$$

$$F_3 = \frac{C_f}{2} (4H \bar{Re}^{++} + 1)^2 + \frac{\rho_s \beta_s}{\rho \tau_s w_{01}^2} (w_{s0} \delta_s^+ - w_0 H \delta^{++}) - \\ - \frac{r_0}{w_{01}^2} (W_0 - 1) \frac{dw_{01}}{dt} - 4H \bar{Re}^{++2} (1 + H) \frac{\partial H}{\partial X} , \quad (8)$$

$$F_4 = \frac{r_0 \bar{Re}^{++}}{2\delta^{++} W_0} \left[\frac{2r_0}{w_{01}} \frac{\partial W_0}{\partial t} + \frac{2r_0}{w_{01}^2} W_0 \frac{dw_{01}}{dt} + W_0 \frac{\partial W_0}{\partial X} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\rho w_{01}^2} \frac{dP}{dX} + \frac{2r_0 \beta_s}{\tau_s w_{01}} \left(\frac{w_{s0}}{w_{01}} - W_0 \right) \right] , \quad (9)$$

уравнение неразрывности

$$4H \bar{Re}^{++} = W_0 - 1 . \quad (10)$$

В (5)—(10) принято

$$\bar{Re}^{++} = Re^{++} / Re_1 , \quad (11)$$

$$\delta^{++} = \int_0^{r_0} \frac{w_x}{w_0} \left(1 - \frac{w_x}{w_0} \right) \left(1 - \frac{y}{r_0} \right) dy, \quad (12)$$

$$\delta^+ = \int_0^{r_0} \left(1 - \frac{w_x}{w_0} \right) \left(1 - \frac{y}{r_0} \right) dy, \quad (13)$$

$$\delta_s^+ = \int_0^{r_0} \left(1 - \frac{w_{sx}}{w_{s0}} \right) \left(1 - \frac{y}{r_0} \right) dy, \quad (14)$$

$$H = \delta^+ / \delta^{++}, \quad (15)$$

$$W_0 = w_0 / w_{01}. \quad (16)$$

Допустим, что

$$\frac{\partial W_0}{\partial t} \approx \frac{1 + W_0}{w_{01}} \frac{dw_{01}}{dt}. \quad (17)$$

Тогда из (5), после соответствующих преобразований, получим

$$\begin{aligned} & \left[4H \bar{\text{Re}}^{++} (2 + H) + 1 \right] \frac{d \bar{\text{Re}}^{++}}{dt} = \frac{C_f}{2} (4H \bar{\text{Re}}^{++} + 1)^2 + \frac{\rho_s \beta_s}{\rho \tau_s w_{01}^2} (w_{s0} \delta_s^+ - \\ & - w_0 H \delta^{++}) - r_0 \frac{4H \bar{\text{Re}}^{++}}{w_{01} \text{Re}_1} \frac{d \text{Re}_1}{dt} - 4 \bar{\text{Re}}^{++2} (1 + H) \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{r_0}{2} \frac{\bar{\text{Re}}^{++}}{\delta^{++} W_0} \times \\ & \times \left\{ \frac{2r_0}{w_{01}^2} (1 + 2W_0) \frac{dw_{01}}{dt} + W_0 \frac{\partial W_0}{\partial X} + \frac{1}{\rho w_{01}^2} \frac{dP}{dX} + \frac{2r_0 \beta_s}{\tau_s w_{01}} \left(\frac{w_{s0}}{w_{01}} - W_0 \right) \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Уравнение импульсов в форме (18) описывает движение двухфазных потоков на начальном и стабилизированном участках цилиндрического канала. Если параметры внешнего по отношению к пограничному слою потока удовлетворяют интегралу Лагранжа—Коши в модифицированной для двухфазных потоков форме

$$\rho \frac{\partial w_0}{\partial t} + \rho w_0 \frac{\partial w_0}{\partial x} + \frac{dP}{dx} + \frac{\rho_s \beta_s}{\tau_s} (w_{s0} - w_0) = 0, \quad (19)$$

то уравнение импульсов (18) упрощается в результате равенства нулю выражения, записанного в фигурных скобках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978. — 336 с.
2. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. — М.: Мир, 1971. — 536 с.
3. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности фаз / Н.Н. Яненко, Р.И. Солоухин, А.Н. Папырин и др. — Новосибирск: Наука, 1980. — 160 с.
4. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. — М.: Мир, 1975. — 379 с.
5. Фафурин А. В., Муслимов Р. А. Двухфазный пограничный слой в трубах / Сб.: Тепло- и массообмен в химических технологиях. — Казань, 1981. — С. 8—11.