

А. КАРТУШИНСКИЙ, Ф. ФРИШМАН

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ДВУХФАЗНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

A. KARTUSINSKI, F. FRISMAN. TURBULENTSE KANEFAASILISE HIBSE JOA ARVUTUS-
 MEETOD

A. KARTUSINSKI, F. FRISMAN. THE NUMERICAL SOLUTION OF TWO-PHASE TURBULENT
 SUBMERGED JET

(Представил Н. Эпик)

До недавнего времени турбулентные струи с твердыми примесями рассчитывались в основном интегральными методами [1-3]. Эти методы имеют один существенный недостаток: для их реализации необходим большой объем экспериментальной информации, подтверждающий допущение о подобии всех параметров в поперечных сечениях, о границах начального и основного участков и т. д. Получение достоверных данных о подобии путем обработки экспериментального материала затрудняется из-за неточности измерений на периферии струи.

Хотя преимущества численных методов для решения этой задачи бесспорны, в литературе им уделяется мало внимания. В [4] приводятся результаты численного расчета двухфазной струи, рассматриваемой как частный случай струи в спутном потоке при коэффициенте спутности, стремящемся к нулю. Однако минимальное значение спутности было 10%. В настоящей работе удалось получить решение при спутности не более 2%, применяя вместо формулы Прандтля уравнение переноса турбулентной вязкости [5].

Система уравнений свободного двухфазного пограничного слоя (размерный вид) с соответствующими граничными условиями представляется так:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} (yv) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (au_s) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} (yav_s) = \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} y \frac{\varepsilon_s}{Sc_s} \frac{\partial a}{\partial y}, \quad (2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} y \varepsilon \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{c_D a |u - u_s| (u - u_s)}{\delta}, \quad (3)$$

$$au_s \frac{\partial u_s}{\partial x} + \left(av_s - \frac{\varepsilon_s}{Sc_s} \frac{\partial a}{\partial y} \right) \frac{\partial u_s}{\partial y} =$$

$$= \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} ya\varepsilon_s \frac{\partial u_s}{\partial y} + \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{c_D a |u - u_s| (u - u_s)}{\delta}, \quad (4)$$

$$u \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial y} = \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} y(\varkappa \varepsilon_0 + v) \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial y} + \beta \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \varepsilon_0, \quad (5)$$

$$v_s = v, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + n\alpha) (2 + \alpha(1 + n)) / (2(1 + \alpha)^2), \quad (7)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_0 (1 - n) (2 + \alpha(1 + n)) / 2(1 + \alpha)^2, \quad (8)$$

$$Sc_s = Sc_0, \quad (9)$$

$$\frac{dn}{dy} = \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_p} (1 + \bar{a})^2 \frac{n^2 c_D}{\delta(n - 1)}, \quad (10)$$

$$c_D = (24/Re_p) + (4,3/\sqrt{Re_p}) + 0,32, \quad (11)$$

$$c_D = 24/Re_p \text{ при } Re_p < 1, \quad c_D = 0 \text{ при } Re_p \leq 10^{-6}, \quad (12)$$

$$Re_{p1} = v'_0 n \delta / v, \quad Re_{p2} = (u - u_s) \delta / v, \quad Sc_0 = 1, \quad \varkappa = 7, \quad \beta = 0,2 \quad (13)$$

при следующих граничных условиях:

$$y=0, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u_s}{\partial y} = \frac{\partial a}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial y} = 0, \quad v = v_s = 0,$$

$$y=\delta, \quad a_\Delta = u_{s\Delta} = u_\Delta = 0,02, \quad \varepsilon = v.$$

Для $x = 0$ задается начальное распределение всех параметров, индекс 0 соответствует чистому газу, индекс s — твердой фазе, безындексное обозначение — газовой фазе в двухфазном потоке; ρ_p — плотность частиц, ρ — плотность газа, δ — диаметр частиц, a — массовая концентрация примеси, \bar{a} — средняя по сечению величина массовой концентрации.

Система уравнений свободного пограничного слоя для примеси была получена в предположении, что твердая фаза является сплошной. В эту систему входят два уравнения неразрывности — (1) и (2), два уравнения движения соответственно для газовой и твердой фаз — (3) и (4), уравнение для турбулентной вязкости (5) чистого газа, взятое из [5], и обыкновенное дифференциальное уравнение (10) для числа n , характеризующего относительное пульсационное движение фаз. Формула для пульсационной скорости газа v'_0 , а также постоянные, входящие в ее выражение, были взяты из [6].

Уравнения решались при монотонной аппроксимации пространственных производных с использованием неявной схемы. Разностные уравнения на каждом слое решались методом прогонки [7]. Такой метод счета позволил получить значения скоростей обеих фаз и относительной массовой концентрации.

Коэффициент турбулентной вязкости для газовой и твердой фаз определялся по формулам (7) и (8), т. е. находился через число n , которое рассчитывалось в каждой точке в соответствии с теорией

Абрамовича [8]. Кроме того, для определения силы сопротивления в случае осредненных и пульсационных характеристик поля закон сопротивления в зависимости от числа Re_p задавался как в форме Стокса, так и в форме Кравцова [9].

Полученные в результате расчета значения u , u_s , α удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А., Докл. АН СССР, 212, № 3, 573—576 (1973).
2. Абрамович Г. Н., Бажанов В. И., Гиршович Т. А., Изв. АН СССР, Мех. жидкости и газа, вып. 6, 41—49 (1972).
3. Ванатоа В., Лаатс М., Картушинский А., Фришман Ф., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 26, № 4, 446—449 (1977).
4. Васильков А. П., Изв. АН СССР, Мех. жидкости и газа, вып. 5, 57—63 (1976).
5. Секундов А. Н., Изв. АН СССР, Мех. жидкости и газа, вып. 5, 114—127 (1971).
6. Абрамович Г. Н., Теория турбулентных струй, М., Физматгиз, 1960, с. 56.
7. Самарский А. А., Введение в теорию разностных схем, М., «Наука», 1971, с. 42.
8. Абрамович Г. Н., Докл. АН СССР, 190, № 5, 1052—1055 (1970).
9. Кравцов М. В., Инж.-физ. ж., 15, № 3, 464—470 (1968).
10. Гиршович Т. А., Картушинский А. И., Лаатс М. К., Леонов В. А., Мульги А. С., В кн.: Турбулентные двухфазные течения, Таллин, изд. АН ЭССР, 1979, с. 142—148.

Институт термодинамики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
29/IV 1980