

## Двуфазни турбулентни течения. Методи за описание и числено моделиране

Ив. Антонов – ТУ-София

Дадени са основните съвременни методи за математическо описание и числено моделиране на двуфазни турбулентни течения, разработвани от колектива през последните 10-15 години. Приведени са резултати от числен експеримент за един клас струйни неизотермични двуфазни течения.

Двуфазните турбулентни течения са основни в редица енергийни, химически, сушилни и хранително-вкусови технологии. Тяхното изучаване е несъмнен интерес от научна и практическа гледна точка. В този аспект, в предлаганата работа, се разглежда един от често използваните модели и методи за решение на течения от подобен тип.

### 1. Математичен модел

Известни са два подхода на математическа интерпретация на двуфазните (разбира се и на многофазни) течения. Статистическият метод е основан на една аналогия с теорията на Болцман за газовите смеси. Неговото приложение при решаване на инженерни задачи е значително затруднено от необходимостта от използване на сложен математичен апарат. Това прави по-удобен и достъпен втория метод – феноменологичния, при който се прилагат преносни уравнения от Нютонов тип, много добре познати в инженерните среди.

Няма да се спирам на т.нар. метод на пасивните примеси, тъй като той е физически необоснован и неговото приложение води до големи отклонения от реалната картина на течението [1], [2].

Двуфлуидният (или многофлуиден) метод разглежда всяка една от фазите като отделна флуидна среда със собствена скорост, плътност и температура. За фазата на примесите се приема, че те не притежават собствен тензор на вътрешните напрежения  $P$ , респ. собствен вискозитет и налягане и за тях не е приложимо уравнението за състоянието. От друга страна те имат собствена турбулентност, собствен тензор на турбулентните напрежения. Това е обяснимо с обстоятелството, че турбулентността не е свойство на флуида, а е характеристика на течението.

Приема се, че загубите на количество на движение и енергия, следствие на междуфазово взаимодействие, удари между частиците примеси и пр., се компенсират от количеството на движение и енергия на носещата фаза. При това силите на междуфазово взаимодействие в уравненията за движение имат знак “-“ при газовата фаза и знак “+“ при фазата на примесите. При съставяне на уравненията за

движение, за всеки конкретен случай, се определя, на основата на физическата картина от течението, кои сили ще бъдат определящи.

За фазата на примесите се приема, че е “неплътно множество от частици” т.е. времето между два последователни удара на частици е по-голямо от времето за релаксация след собствен удар.

Уравненията на Рейнолдс приложени за двете фази за двумерно течение, съгласно изложеното по горе, имат вида:

$$1. \frac{\partial}{\partial x} [y^j U_g \rho_g] + \frac{\partial}{\partial y} [y^j V_g \rho_g] = 0$$

$$2. \frac{\partial}{\partial x} [y^j U_p \rho_p] + \frac{\partial}{\partial y} [y^j V_p \rho_p] = 0$$

3.

$$[y^j U_p] \frac{\partial \rho_p}{\partial x} + [y^j V_p] \frac{\partial \rho_p}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial y} [y^j \rho_p V'] - \overline{\rho_p V_p'}$$

4.

$$[y^j \rho_g U_g] \frac{\partial U_g}{\partial x} + [y^j \rho_g V_g] \frac{\partial U_g}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial y} [y^j \rho_p \overline{U_g V_g'}] - F_x y^j$$

5.

$$[y^j \rho_p U_p] \frac{\partial U_p}{\partial x} + [y^j (\rho_p V_p + \overline{\rho_p V_p'})] \frac{\partial U_p}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial y} [y^j \rho_p \overline{U_p V_p'}] + F_x y^j$$

6.

$$[y^j \rho_g U_g] \frac{\partial h_g}{\partial x} + [y^j \rho_g V_g] \frac{\partial h_g}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial y} [y^j \rho_g \overline{h_g V_g'}] - [y^j \rho_g \overline{h_g V_g'}] \frac{\partial U_g}{\partial y} - Q y^j + F_x y^j (U_g - U_p) + F_y y^j (V_g - V_p) - \sum_{i=1}^3 \overline{F_i V_{pi}'} + 2 R_j \cdot \pi \overline{\rho_g} (T_2 - \overline{T_g}) \overline{V_g} - 2 R_j \cdot \pi \overline{\rho_g} \cdot \frac{\overline{v_{tp}}}{Pr_i} \cdot \frac{\partial \overline{T_g}}{\partial y}$$

7.

$$[y^j \rho_p U_p] \frac{\partial h_p}{\partial x} + [y^j (\rho_p V_p + \overline{\rho_p V_p'})] \frac{\partial h_p}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial y} [y^j \rho_p \overline{h_p V_p'}] + Q y^j + 2 R_j \cdot \pi \cdot \overline{\rho_p} (T_2 - \overline{T_p}) \overline{V_p} - 2 R_j \cdot \pi \overline{\rho_p} \cdot \frac{\overline{v_{tp}}}{Pr_i} \cdot \frac{\partial \overline{T_p}}{\partial y}$$

$$8. P = \rho_g \cdot R \cdot T_g$$

където: индексите  $g$  и  $p$  се отнасят съответно до носещата фаза и на примесите;  $j = 0$  за равнинни течения;  $j = 1$  за ососиметрични;  $F_x$  - сили на междуфазово взаимодействие.

2. Методи за решение. Моделиране на турбулентните напрежения.

Интегрални методи. При изследване на турбулентни струи се прилагат интегрални методи, при които системата частни диференциални уравнения се свежда до система интегрални условия, които представляват обикновени диференциални уравнения. Решаването им се реализира при използване подобие на скоростното и температурното поле при струйните течения. Методът е удобен и сравнително точен при решаване на инженерни задачи [3], [4], [5].

Числени методи. При числените методи уравненията за движение и моделните уравнения за турбулентността се заменят с диференчни схеми, при използване на метода на крайните разлики. В нашите

решения най-често използваната схема е явна, тип Дюфорт–Франкел [6].

Турбулентните напрежения се моделират чрез модели от I<sup>ви</sup> ред, най-често  $k - \varepsilon$  модел със собствена модификация отчитаща двуфазността на течението. Използваната от нас модификация [6], [7], определена като  $k_g - k_p - \varepsilon$ , използва три моделни уравнения относно турбулентната енергия на газовата фаза и на примесите и едно уравнение за дисипацията на същата енергия. Турбулентните тангенциални напрежения се определят, съгласно хипотезата на Колмогоров, по зависимостта:

$$9. \overline{v_{tg}} = C_\mu \cdot \frac{K_g^2}{\varepsilon}; \overline{v_p} = C_\mu \cdot \frac{K_p^2}{\varepsilon}$$

$$10. \overline{\varepsilon} = C_D \cdot \frac{K_g^{1.5}}{L}$$

където:  $C_\mu = 0.09$  е емпиричен коефициент.

Едно съвременно направление е използването на дадените методи за решаване на уравненията за движение [8], [9], но изисква много мощни ЕИМ и много машинно време.

### 3. Резултати от числения експеримент

За илюстрация на възможностите на описаните числени методи за изследване на двуфазни течения са дадени резултати получени по  $k_g - k_p - \varepsilon$  модел. Численият експеримент е проведен при следните начални условия за случая на двуфазна турбулентна струя:

концентрация на примесите –  $\chi = 1.00$

диаметър на примесите –  $D_p = 0.000145m$

скорост на газовата фаза –  $u_{g0} = 35m/s$

скорост на примесите –  $u_{p0} = 35m/s$

температура на газовата фаза –  $T_{g0} = 300K$

температура на примесите –  $T_{p0} = 400K$

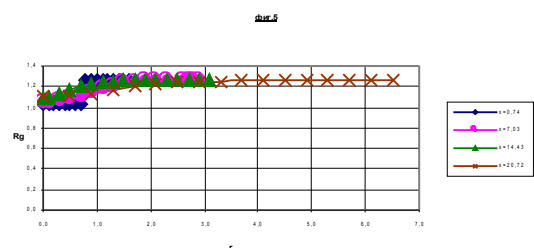
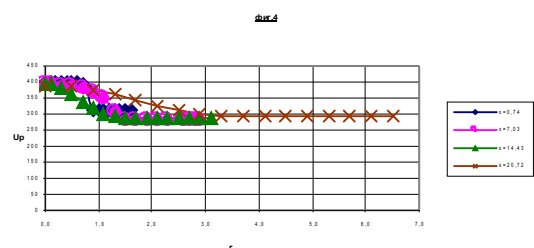
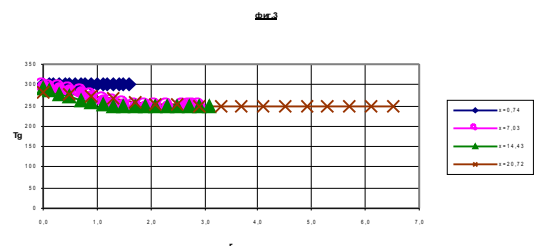
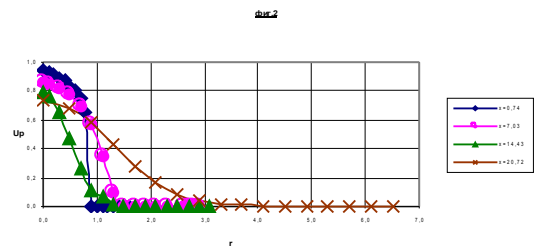
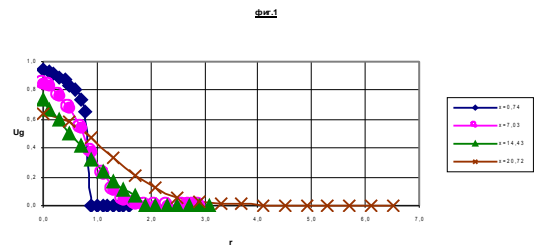
плътност на газовата фаза –  $\rho_{g0} = 1.04kg/m^3$

плътност на примесите –  $\rho_{p0} = 800kg/m^3$

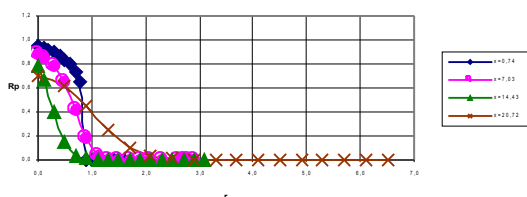
температура на околната среда –  $T_2 = 200K$

На фигури 1÷6 са показани напречното разпределение на скоростите, температурите и плътностите съответно на газовата фаза и на примесите за сечение  $x = 20,72$ . Приведените резултати показват работоспособността на избрания метод и числената му реализация за двуфазни турбулентни струи.

Липсата на достатъчно място в настоящата публикация не позволява да бъдат приведени числени резултати и за останалите методи.



Фиг. 6



Литература:

1. Нигматулин Р.И., Основы механики гетерогенных сред, М., Наука, 1978
2. Лойцянский Л.Г. "Механика жидкости и газа", Наука, М., 1970
3. Antonov, I.S., N.T.Nam, H.D.Lien, Two-Phase Turbulent Jet. Integral Method, Procc. of the 4<sup>th</sup> Workshop of Applies Mechanics, on 28.04.1994, HVT, HCM, Vietnam, p.p. IX-1 – IX-8
4. Antonov I.S., M.S.Angelov, Integral methods for investigation of two dimensional two phase turbulent jets 10<sup>th</sup> inter. Conference "SAER'96",sept. 27-29,1996,st.Konstantin ,Bulgaria p.p.156-160.
5. Antonov,I.S. ,H.D.Lien , E.P.Agontzev ,Integral method for investigation of non-isothermal two phase jets,11<sup>th</sup> international conf. "SAER'97" sept.20-21,1997,st. Konstantin ,Bulgaria p.p.145-151.
6. Antonov,I.S., N.T.Nam,Numerical methods for modeling of two phase turbulent swirling jets ,HADMAR'91 Procc.,vol1, 34-1-34-5.
7. Antonov,I.S. ,H.D.Lien , E.P.Agontzev,Numercal investigation of two phase non isothermal jet by three parameter turbulent model, 11<sup>th</sup> international conf. "SAER'97" sept.20-21,1997,st. Konstantin ,Bulgaria p.p.145-151.
8. Antonov,I.S., N.P.Petkov,L.A.Elenkov,Numerical model of a two dimensional two-phase turbulent jets,Год. на МГУ ,т.38,св2,1992,стр.95-104.
9. Antonov,I.S.,M.S.Angelov, Direct Numerical modeling of two phase turbulent axially symmetrical jets ,The 25<sup>th</sup> Israel conf. of mech. Engin., Technion ,Haifa ,25-26 may ,1994