

Моделирование турбулентного течения смеси вязких жидкостейЧулпонов О. Г.¹, Худайкулов С. И.², Хакимов Ш.¹¹ Наманганский инженерно-строительный институт

Наманган, Республика Узбекистан

² Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем

Ташкент, Республика Узбекистан

Статья позволяет раскрыть сущность взаимодействия между фазами при исследовании реактивных потоков смеси вязких жидкостей. Помимо теоретического значения решения задач, имеет ряд практических применений в машиностроении, промышленности и гидротехнике.

Многофазные потоки весьма разнообразны: кровь в сосудах, топливные смеси в ракетах, цементные и бетонные растворы, речные потоки в деформируемых рулах, пароводяные смеси в энергетических установках, селевые потоки на горных склонах и другие.

Часто можно выделить компоненты потока, резко отличающиеся по свойствам: газ, жидкость, твердое вещество. Каждая из этих фаз может быть в двух качественно различных формах: несущей среды или несомой среды (дисперсной фазы).

Несущая среда может предполагаться абсолютно непрерывной (или просто непрерывной). В любой точке этой среды может быть размещен шар, состоящий из частиц рассматриваемой среды, который можно переместить в любую другую точку области, занятой средой. Напротив, несомая среда этим свойством не обладает. Например, частицы грунта в русловом потоке полностью окружены водой. От одной частицы грунта к другой нельзя перейти, минуя воду. Такую среду при малых размерах частиц предложено называть непрерывно диспергированной (или равномерно разрывной), условно сплошной средой [1; 2].

Для дисперсной фазы не обязательно вводить гипотезу условной сплошности. В некоторых задачах, например, при выводе критериев подобия, полезно сохранить дискретное рассмотрение.

Исследования струйных течений смеси вязких жидкостей позволяют раскрыть характер взаимодействия между фазами.

Рассмотрим задачу о свободной турбулентной смеси двух вязких жидкостей в модели взаимопроникающих сред Х. А. Рахматулина [3]. В работах [1; 2; 4] даются решения ряда автомодельных задач о ламинарных струях смеси вязких жидкостей, в [3; 5; 6] приводится анализ струйного течения вязкой жидкости, распространяющейся над подстилающей поверхностью,

где особо отмечаются возможности слоистого ламинарного и турбулентного течения для однофазной жидкости.

Пусть некоторая область, ограниченная твердыми поверхностями, занята жидкостью, переносящей N твердых частиц. Движение каждой частицы описывается шестью уравнениями: тремя скалярными уравнениями сохранения количества движения частицы и тремя уравнениями сохранения момента количества движения.

Исследования струйных течений смеси вязких жидкостей позволяют раскрыть характер взаимодействия между фазами. Динамический коэффициент вязкости имеет следующий вид

$$\gamma_{HT} = \hat{C}_n - x^I y^r U_n^q,$$

где $\hat{C}_n = \gamma_{III} H^{I+r} V_{n\infty}^{-q}$;

при $I = q = r = 0$ – получим ламинарное течение;

при $I = 1, q = 1, r = 0$ – течение турбулентного пристеночного слоя;

при $I = 0, q = 1, r = 1$ – свободную турбулентную струю.

Уравнение движения, неразрывности и изменения температуры для осесимметричной при $K = 1$ и плоской при $K = 0$ закрученной струе смеси вязкой жидкости будет имеет вид [1]

$$\begin{aligned} LU_n &= \frac{K_1}{\rho_n} (U_p - U_n), \\ Lw_n + K \frac{W_n V_n}{y^k} + K \frac{\gamma_{HT} W_n}{y^{k+1}} &= \frac{K_2}{\rho_n} (W_p - W_n), \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= K \frac{\rho_1 W_1^2 + \rho_2 W_2^2}{y^{k+1}}, \\ L_1 T_n &= \frac{K_3}{\rho_n} (T_p - T_n), \\ \frac{\partial(\rho_n y^k U_n)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_n y^k V_n)}{\partial y} &= 0, \quad f_1 + f_2 = 1, \\ L_1 f_n &= U_n \frac{\partial f_n}{\partial x} + V_n \frac{\partial f_n}{\partial y} - \frac{1}{y^k} \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_{HT} y^k \frac{\partial f_n}{\partial y} \right), \\ L_2 T_n &= U_n \frac{\partial T_n}{\partial x} + V_n \frac{\partial T_n}{\partial y} - \frac{1}{y^k} \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{HT} y^k \frac{\partial T_n}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

где $\rho_n = f_n \rho_{ni}$, $a_n = \frac{\gamma_{HT}}{Pr_n}$.

Здесь U_n, V_n, W_n – компоненты вектора скорости в цилиндрической координате; ρ_n, ρ_{ni}, f_n – соответственно истинная, приведенная плотность и объемная концентрация n -ой фазы смеси; Pr_n – число Прандтля.

С граничными условиями при $y = 0$

$$\frac{\partial U_n}{\partial y} = 0, V_n = 0, W_n = 0, \frac{\partial W_n}{\partial y} = 0, \frac{\partial T_n}{\partial y} = 0,$$

при $y \rightarrow \infty$

$$U_n(x, \infty) = W_n(x, \infty) = 0; T_n(x, \infty) = T_{\infty}; P(x, \infty) = P_{\infty} = \text{const.}$$

Рассмотрим автомодельную задачу о течении смеси жидкостей, вытекающих из канала конечной ширины в свободное пространство. Решения для слоя строим путем введения ряда автомодельных преобразований и функций в виде:

$$\phi = Bx^\beta y,$$

$$U_n = U_{nm} \frac{F_n(\phi)}{\phi^k}, V_n = \frac{U_{nm}}{B} x^{-\beta-1} [(\alpha - \beta k - \beta) F_n(\phi) + \beta \phi F_n'(\phi)],$$

$$W_n = W_{nm} \Phi_n(\phi), \frac{P - P_{\infty}}{P_m - P_{\infty}} = P(\phi), \frac{T_n - T_{\infty}}{T_{nm} - T_{\infty}} = \theta_n(\phi).$$

Коэффициент взаимодействия запишем в виде [1–3]:

$$K_1 = K_2 = K_{p0} x^m y^z H^{m+z},$$

где

$$K_{p0} = f_1 f_2 \frac{\rho_1 V_{1\infty}^2 + \rho_2 V_{2\infty}^2}{\rho_1 \gamma_1 + \rho_2 \gamma_2},$$

Для введенных неизвестных функций получим следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} & \alpha \left(\frac{F_n^1(\phi)}{\phi k} \right)^2 - (\alpha - \beta k - \beta) \frac{F_n(\phi)}{\phi k} \left(\frac{F_n^1(\phi)}{\phi k} \right) = \\ & = \frac{a_n}{\phi k} \left[\phi^{k+r} \left(\frac{F_n^1(\phi)}{\phi k} \right)^q \left(\frac{F_n^1(\phi)}{\phi k} \right) \right] + \frac{K_p^* \phi^z}{\rho_n} \phi^z \left[\frac{P_p}{A_n} \frac{F_n^1(\phi)^n}{\phi n} - \frac{F_n^1(\phi)}{\phi k} \right], \end{aligned}$$

$$P_{(\phi)}^1 = \Phi_1^z(\phi) + \frac{\rho_n f_z}{\rho_{1i} f_1} C_2^z \Phi_2^z(\phi),$$

$$\begin{aligned} & \gamma \theta_n(\phi) \frac{F_n^1(\phi)}{\phi k} - (\alpha - \beta k - \beta) \theta_n^1 \frac{F_n(\phi)}{\phi k} = \\ & = \frac{a_n}{\rho_m} \frac{1}{\phi k} \left[\phi^{k+r} \left(\frac{F_n^1(\phi)}{\phi k} \right)^q \theta_n^1(\phi) \right]^1 + \frac{K_p^* \phi^z}{\xi} \phi^z \left[\frac{\Gamma_p}{\Gamma_n} \theta_p(\phi) - \theta_p(\phi) \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon \Phi_n(\phi) \frac{F_n^1(\phi)}{\phi k} - (\alpha - \beta k - \beta) \Phi_n^1 \frac{F_n(\phi)}{\phi k} - \\ & - k B^{k-1} (\alpha - \beta k - \beta) \frac{\Phi_n(\phi)}{\phi k} \frac{F_n(\phi)}{\phi k} - k B^{k-1} \beta \phi \frac{\Phi_n(\phi) F_n(\phi)}{\phi k} = \\ & = \frac{a_n}{\rho_m} \frac{1}{\phi k} \left[\phi^{k+r} \left(\frac{F_n^1(\phi)}{\phi k} \right)^q \Phi_n^1(\phi) \right]^1 - k \hat{C}_n B^{k+1-r} A_n^{q-1} \frac{\Phi_n(\phi)}{\phi^{k+1}} + \\ & + K_p^* \phi^z \left[\frac{C_p}{C_n} \Phi_p(\phi) - \Phi_p(\phi) \right], \end{aligned}$$

где $A_n = A_n^{q-1} \hat{C}_n B^{2-r}$; $K_p^* = \frac{K_z}{\rho_n A_n B^z}$.

Условие автомодельности дает [4; 6]

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\alpha - I - \alpha q}{z - r}, m = \alpha + \beta z - \alpha q, \\ \delta &= (k-1)\beta + 2\varepsilon, I = \varepsilon(k-1) - \varepsilon q, \end{aligned}$$

а также

$$D = k \frac{C_1^2 B^{k-1}}{1 + \frac{\rho_{1i} f_2}{\rho_{1i} f_1}}.$$

Выводы

1. Результаты показывают, что компоненты вектора скорости, коэффициент взаимодействия и закон изменения (убывания) кинетической энергии потока через поперечное сечение быстрее убывают в осесимметричном течении, чем в плоском.
2. Можно указать ряд струйных турбулентных течений вязкой смеси жидкостей, входящих в класс автомодельных задач.

Литература

1. Хамидов, А. А. Решение задач о двумерной свободной струе смеси вязких жидкостей / А. А. Хамидов // Проблемы механики. – 1993. – № 3. – С. 121–125.
2. Худайкулов, С. И. Вибрация при повороте бурного потока Каркидонского водохранилища / С. И. Худайкулов, О. А. Муминов, Ш. Р. Утбосаров // Инновационная техника в технологиях кишлоқ ҳўжалиги озик-овқат тармоғидаги муаммо ва истиқболлари: мавзусидаги II-халқаро илмий ва илмий-техник анжумани илмий ишлар тўплами. 2-қисм., Ташкент, 22–23 апр. 2022. – Ташкент, 2022. – С. 212–213.
3. Рахматулин, Х. А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред / Х. А. Рахматулин // Прикладная математика и механика. – 1956. – Т. 20, вып. 2. – С. 184–195.
4. Чулпонов, О. Г. Автомодельное решение турбулентного течения смеси вязких жидкостей / О. Г. Чулпонов, С. И. Худайкулов // Матрица научного познания. – 2022. – Т. 5, № 6. – С. 149–154.
5. Вулис, А. А. Теория струи вязкой жидкости / А. А. Вулис, В. П. Кашкарев. – М.: Наука, 1965. – 431 с.
6. Худайкулов, С. И. Модели двухслойных течений разнотных потоков / С. И. Худайкулов, Ш. Р. Утбосаров // Илмий – техника журнали. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 63–66.