ISSN 2658–5782 Том 18 (2023), № 3, с. 244–246

Многофазные системы

http://mfs.uimech.org/2023/pdf/mfs2023.3.071.pdf
DOI: 10.21662/mfs2023.3.071

Получена: 15.09.2023
Принята: 10.11.2023

14-я международная конференция-школа «Волны и вихри в сложных средах» 2023

Численное моделирование динамики скоплений твердых частиц[1]

Тукмаков Д.А.

Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр РАН, Казань

Одной из развивающихся областей механики жидкости, газа и плазмы является динамика неоднородных сред [1–10], отличающаяся от классической гидродинамики [11].В ряде случаев возникает необходимость моделировать течения неоднородных сред, движущихся в электрическом поле [4–10, 12]. В работе [4] сопоставляются результаты физического эксперимента и численные расчёты динамики электрически заряженной газовзвеси без учета взаимообратного влияния компонент смеси. Публикация [5] посвящена усовершенствованию технологии электрических фильтров, очищающих газовые выбросы промышленных предприятий от дисперсных примесей. Из рассмотренных работ следует, что в различных исследованиях динамики электрически заряженных неоднородных сред изучаются совокупность как электрофизических, так и гидродинамических процессов. Для совершенствованиях технологий и устройств, работающих с электрически заряженными газовзвесями, необходимо выявление закономерностей динамики таких сред в электрических и аэродинамических полях. В данной работе для массовых и поверхностных плотностей заряда дисперсной компоненты рассматривается влияние плотности материла частиц на интенсивность скоростного скольжения компонент смеси. Математическая модель учитывала взаимодействие компонент смеси в процессе распространения ударной волны малой интенсивности на электрически заряженную газовзвесь. В работе предполагалось, что электрическое поле формировалось заряженными дисперсными частицами.

Для описания динамики электрически заряженной газовзвеси применялась математическая модель, реализующая континуальный подход моделирования в которой учитывается влияние компонент гетерогенной среды друг на друга [1, 2, 6–10]. Движение несущей среды описывается системой уравнений Навье–Стокса [11, 13] для вязкого, сжимаемого теплопроводного газа с учетом межфазного силового взаимодействия и теплообмена [6–10]:

$$
\begin{gathered}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0 \\
\frac{\partial \rho V^k}{\partial t} + \nabla^i(\rho V^k V^i + \delta_{ik} p - \tau_{ik}) = -F_k + \alpha \nabla^k p \\
\frac{\partial (e)}{\partial t} + \nabla^i (V^i(e + p - \tau_{ii}) - V^k \tau_{ki} - \lambda \nabla^i T) = \\
= -Q - |F_k|(V^k - V_1^k) + \alpha \nabla^k (p V^k)
\end{gathered}
\qquad (1)
$$

[1]Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-21-00363 «Моделирование процесса осаждения капель двухфазной газокапельной среды».

Тензоры вязких напряжений записываются следующим образом:

$$\tau_{11} = \mu\left(2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}D\right), \qquad \tau_{22} = \mu\left(2\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}D\right),$$

$$\tau_{12} = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right), \qquad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Динамика дисперсной фазы описывается уравнением сохранения средней плотности, уравнениями сохранения составляющих импульса и уравнением сохранения энергии, записанными с учетом взаимодействия компонент смеси:

$$\begin{gathered}\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla(\rho_1 V_1) = 0\\ \frac{\partial \rho_1 V_1^k}{\partial t} + \nabla^i(\rho_1 V_1^i V_1^k) = F_k + F_{Ck} - \alpha\nabla^k p\\ \frac{\partial (e_1)}{\partial t} + \nabla^k(e_1 V_1^k) = Q\end{gathered} \qquad (2)$$

Здесь p, ρ, u, v — давление, плотность, декартовы составляющие скорости несущей среды в направлении осей и соответственно; T ,e — температура и полная энергия газа; ρ_1, T_1, e_1, u_1, v_1 — средняя плотность, температура, внутренняя энергия, декартовы составляющие скорости дисперсной фазы в направлении осей x, y. Температура несущей среды находится из уравнения $T = (\gamma - 1)(e/\rho - 0.5(u^2 + v^2)/R$, где R — газовая постоянная несущей фазы, μ —вязкость газа, λ — теплопроводность газа, γ —постоянная адиабаты. Внутренняя энергия взвешенной в газе дисперсной фазы определяется как $e_1 = \rho_1 C_p T_1$, где C_p — удельная теплоемкость единицы массы вещества дисперсной фазы, средняя плотность дисперсной фазы вычисляется из выражения $\rho_1 = \alpha\rho_{10}$, где α — объёмное содержание дисперсной фазы являющееся функцией временной и пространственных переменных, ρ_{10} — физическая плотность материала дисперсной компоненты смеси остающаяся постоянной величиной, F_k — пространственные составляющие силы аэродинамического сопротивления, F_k —пространственные составляющие силы Кулона, воздействующей на частицы. Q — поток тепла между компонентами смеси. Потенциал электрического поля в расчетной области определяется из решения уравнения Пуассона. В правой части уравнения Пуассона содержится плотность заряда газовзвеси (массовая или поверхностная), отнесенная к абсолютной диэлектрической проницаемости несущей среды [12]:

$$\begin{gathered}\operatorname{div}\mathbf{E} = \frac{\rho_E}{\varepsilon\varepsilon_0}, \qquad \mathbf{E} = -\bar{\nabla}\phi,\\ \Delta^2\phi = -\frac{\rho_E}{\varepsilon\varepsilon_0}, \qquad \varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}\ \Phi/\text{м}.\end{gathered} \qquad (3)$$

$$\rho_E = \alpha\rho_{10}\cdot q_m, \qquad \rho_E = S\cdot q_S = \frac{\alpha}{3r}\cdot q_S,$$

$$F_{Cx} = -\rho_1\frac{\partial\phi}{\partial x}, \qquad F_{Cy} = -\rho_1\frac{\partial\phi}{\partial y}$$

Здесь ρ_E — плотность заряда, q_i — удельный заряд единицы массы m или площади s твердой фракции, φ — потенциал электрического поля, $\varepsilon = 1$ — относительная диэлектрическая проницаемость воздуха, ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха. Система уравнений (1– 2) интегрировалась явным конечно-разностным методом Мак–Кормака второго порядка точности [13]. Для подавления численных осцилляций применялась схема нелинейной коррекции сеточной функции [14, 15].

Система уравнений дополнялась соответствующими начальными и граничными условиями. При расчёте течений двухфазной смеси для составляющих скорости несущей среды и дисперсной компоненты задавались однородные граничные условия Дирихле, на всех поверхностях. Для остальных динамических функций смеси на боковых поверхностях канала задавались однородные граничные условия Неймана, согласно методике конечно-разностного моделирования динамики сжимаемого теплопроводного газа [13] и методике моделирования динамики, взвешенной в сжимаемом топливопроводном газе, дисперсной компоненты с изменяющейся «средней плотностью» и энергией [2, 3].

Уравнение Пуассона [12–16], описывающее потенциал электрического поля (3), решалось методом конечных разностей с помощью итерационной схемы метода установления [16] на сгенерированной для газодинамических расчётов сетке, с целью учесть влияние силы Кулона при решении уравнений динамики двухфазной среды, а также учесть распределение «средней плотности» дисперсной фазы в узлах разбиения физической области при решении уравнения Пуассона.

Список литературы

[1] *Нигматулин Р.И.*Основы механики гетерогенных сред. Москва: Наука. 1978. С.464.

[2] *Кутушев А. Г.*Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. СПб.: Недра. 2003. С. 284.

[3] *Федоров А. В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Волновые процессы в газовзвесях частиц металлов. Новосибирск. 2015. С 301.*

[4] *Tadaa Y. , Yoshioka S., Takimoto A., Hayashi Y.*Heat transfer enhancement in a gas —solid suspension flow by applying electric field// International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 93. P. 778–787.

[5] *Чекалов Л.В., Гузаев В.А., Смирнов М.Е.*Повышение эффективности электрофильтров тепловых электростанций путём совершенствования осадительных электродов// Электрические станции. 2021. № 7. С. 48–54.

[6] *Тукмаков Д. А., Ахунов А. А.*Численное исследование влияния электрического заряда дисперсной фазы на распространение ударной волны из чистого газа в запылённую среду// Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2020. № 3. С. 183–192.

[7] *Тукмаков А. Л., Тукмаков Д. А.*Численное исследование влияния параметров дисперсных частиц на осаждение твердой фазы электрически заряженной полидисперсной газовзвеси // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика.Механика. Информатика. 2022. № 1. С. 90–102.

[8] *Тукмаков Д. А.*Сопоставление математических моделей динамики электрически заряженных газовзвесей для различных концентраций дисперсной компоненты // Прикладная информатика. 2022. № 1. С. 39–54.

[9] *Тукмаков Д.А.*Сопоставление численных моделей динамики электрически заряженных газовзвесей с массовой и поверхностной плотностями зарядов для различных дисперсностей частиц// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2022. № 3. С. 43–56.

[10] *Тукмаков Д.А., Тукмакова Н.А.*Численное исследование межкомпонентного скоростного скольжения в электрически заряженной и нейтральной газовзвесях в двухмерной нестационарной постановке с вязкой несущей средой//Физическое образование в ВУЗах. 2023. Т.29. №1. С. 123–134.

[11] *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. Москва: Издательство «Дрофа»,2003. С. 784.

[12] *Сальянов Ф.А.*Основы физики низкотемпературной плазмы, плазменных аппаратов и технологий. М., Наука, 1997.С. 240

[13] *Fletcher C. A.*Computation Techniques for Fluid Dynamics Springer-Verlang, Berlin et al., 1988. Pp. 504.

[14] *Тукмаков А.Л.*Численное моделирование акустических течений при резонансных колебаниях газа в закрытой трубе// Авиационная техника. 2006. № 4. С. 33–36.

[15] *Музафаров И.Ф., Утюжников С.В.*Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа.// Математическое моделирование.1993. №3. С. 74–83.

[16] *Крылов В. И., Бобков В. В., Монастырный П. И.*Вычислительные методы. Т.2, М.:Наука, 1977. С. 401.