

УДК 51-73,533

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ

© 2024 г. Д. А. Тукмаков^{1,*}¹ИММ ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия

*e-mail: tukmakovda@imm.knc.ru

Поступила в редакцию 15.02.2024 г.

После доработки 03.05.2024 г.

Принята к публикации 10.06.2024 г.

В работе численно моделируется течение полидисперсной газовзвеси в канале. Несущая среда описывалась как вязкий, сжимаемый, теплопроводный газ. Математическая модель реализовывала континуальную методику динамики многофазных сред, учитывающую взаимодействие несущей среды и дисперсной фазы. Для каждой из компонент смеси решалась полная гидродинамическая система уравнений движения для несущей фазы и фракций дисперсной фазы. Дисперсная фаза состояла из частиц с различными размерами дисперсных включений. Для несущей среды на боковых поверхностях канала задавались однородные граничные условия Дирихле. Для фракций дисперсной фазы граничные условия проскальзывания. Выявлено влияние граничных условий течения несущей среды на динамику фракций газовзвеси.

Ключевые слова: континуальная модель, полидисперсная газовзвесь, межфазное взаимодействие, граничные условия

DOI: 10.31857/S0032823524030066 ZAUJXO

1. Введение. Динамика неоднородных сред является развивающимся разделом механики жидкости и газа. Отличием от классической гидродинамики однородных сред [1] является то, что в динамике неоднородных сред движение смеси определяется эффектами, связанными с межфазным взаимодействием. В монографии [2] изложены теоретические основы динамики различных неоднородных сред – как гомогенных, так и многофазных смесей, описаны монодисперсные модели динамики газовзвесей. В работе [3] разработаны различные математические модели течений газодисперсных сред с моно и полидисперсным составом частиц, представлены результаты расчетов полидисперсных потоков. В монографии [4] исследованы проблемы движения двухфазных сред – газожидкостных потоков с большими скоростями. Разработаны теоретические основы и методики расчета, также описаны прикладные задачи течений газожидкостных сред. В работе [5] в одномерном приближении, без учета вязкости среды разработаны математические модели динамики запыленных, газокапельных и порошковых сред приведены результаты численных расчетов. В монографии [6] разработаны математические модели и численные алгоритмы моделирования ударно-волновых и детонационных процессов в газовзвесах металлических частиц, приводятся результаты расчетов.

В статье [7] проведен обзор расчетно-теоретических и экспериментальных работ, посвященных изучению различных видов двухфазных потоков. Описаны и проанализированы результаты исследований двухфазных потоков с твердыми частицами,

каплями и пузырями. Рассмотрены прикладные и фундаментальные исследования динамики газодисперсных сред в трубах, каналах и соплах. В работе [8] численно исследован теплообмен в газокапельном потоке движущемся в канале. Для моделирование дисперсного потока применялся подход Эйлера. Выявлено, что добавление капель приводит к существенному росту теплообмена между стенками канала и движущейся средой в сравнении с движением однофазной среды. В исследовании [9] изучаются волновые и релаксационные эффекты при импульсном истечении смеси газа с большим содержанием твердых частиц из цилиндрического канала. Задача сформулирована в двухскоростной двухтемпературной постановке и решалась численно. Публикация [10] посвящена численному исследованию распространения гетерогенной детонационной волны в смеси частиц алюминия и кислорода в плоском канале с линейным расширением. В серии расчетов изменялся угол наклона стенки. В работе [11] исследовано движение частицы в круглом канале с проницаемыми стенками с учетом действия на нее массовых сил. Определены траектории движения частицы при изменении характерных параметров задачи в широких диапазонах чисел Стокса. В статье [12] разработана методика и алгоритм моделирования динамических характеристик течения газа в цилиндрическом канале при дозвуковой скорости и при наличии дисперсной примеси в газе. Расчеты проводились с целью определения динамических характеристик процессов подачи в конвертеры инертных газов, содержащих дисперсные примеси. В работе [13] изучены характеристики осаждения микронных частиц на стенках круглой или сужающейся–расширяющейся трубок. В рамках подхода Эйлера разработан метод моделирования динамики частиц в трубах. Механизм осаждения частиц модели включал в себя диффузионное осаждение, термофоретическое и гравитационное осаждение. В публикации [14] в рамках подхода Эйлера–Лагранжа проведено численное моделирование движения дисперсных частиц. Моделируются два случая с разными диаметрами частиц. Исследуется накопление частиц вблизи стенок канала и вблизи оси канала. Результаты численных расчетов демонстрируют, что частицы скапливаются в низкоскоростных областях вблизи стенки канала.

В статье [15] исследуются нестационарные течения и оседание дисперсных частиц в дыхательных путях в рамках разработки математической модели дыхательной системы человека. Получены параметры течения газа с твердыми частицами в каналах, приведены поля скоростей и траектории движения твердых частиц различных размеров. В публикации [16] представлены результаты численного моделирования начального этапа импульсного течения газодисперсной смеси в канале, в целях оптимизации технологии порошкового пожаротушения и нейтрализации загрязнений. Рассматривались равномерные и неравномерные начальные концентрации дисперсных частиц. Выявлены физические эффекты отличий струи дисперсной смеси по сравнению с потоком однородной среды. Исследование [17] посвящено моделированию процессов, происходящих при движении порошка в коническом канале системы подачи зернистого материала. Выявлено, что, изменяя давление газовой фазы, можно изменять режимы течения порошково-газовой среды в коническом канале, тем самым влиять на характеристики истекающей порошково-газовой смеси. В работе [18] разработаны газодинамические модели движения многоскоростных континуумов в соплах сложной формы, моделирующих форму двухступенчатого конфузорного воздухоочистителя. Исследовано влияние силового взаимодействия газовой и дисперсной фаз на структуру течения газопылевого потока. В публикации [19] теоретически и экспериментально исследовано удаление частиц в потоке газодисперсной смеси движущейся в трубе. Рассматривалась эффективность удаления дисперсных частиц для различных режимов расхода газодисперсной среды. В статье [20] разработана численная модель движения водной пены под воздействием сильной ударной волны в лагранжевых переменных с учетом межфазного теплообмена и вязкости. Рассчитывалось течение двухфазной среды в цилиндрической области. Иссле-

довано снижение амплитуды и скорости распространения ударной волны в газожидкостной среде за счет межфазного взаимодействия.

В работе [21] с целью оптимизации пылеудаления в шахтах моделируются течение газодисперсного потока. Несущая среда газозвеси описывалась нестационарной системой уравнений Навье—Стокса. Определены оптимальные скорости движения газа в технологии пылеудаления воздушным потоком. В статье [22] численно исследуются процессы очистки газа от твердых взвешенных в газе частиц в аппарате очистки аэрозолей. С целью оптимизации технологии пылеудаления рассматривались конструкции пылеудаляющего устройств с различными расстояниями между вогнутыми пластинами, составляющими основу сепарационного устройства.

В публикации [23] с помощью аналитических методов исследуются процессы очистки газодисперсных сред от тонкодисперсного от мелкодисперсных капель. Рассматривается осаждение аэрозоля на стенках трубок и каналов. Сформулированы закономерности, при которых существенно возрастает осаждение мелкодисперсного капельного аэрозоля на стенках трубок и щелевых каналах осадительного элемента. В статье [24] представлена численная модель электрохимического топливного элемента. Моделируется движение двухфазной газо-жидкостной среды в канале. Динамика жидкой фазы внутри канала численно анализируется при различных рабочих режимах. Количественно оценено содержание жидкой фазы на различных участках канала. В работе [25] исследуется течение двухфазной смеси в трубе с целью оптимизации производительности градилен. Рассматривался процесс предварительного охлаждения при высоких рабочих температурах, предлагается предварительное охлаждение воздуха распылением воды. Разработана трехмерная численная модель Эйлера-Лагранжа для описания распыления испаряющейся жидкости. В публикации [26] с целью моделирования аварийных ситуаций на ядерных реакторах разработана математическая модель газожидкостного течения. Исследованы физические процессы в канале, предназначенном для наблюдения раздела жидкой и газовой фазы. Рассматривались различные механизмы осаждения и уноса капель газовой фазой.

Анализ работ демонстрирует, что исследования по моделированию течений газозвесей, имеющие как практический, так и теоретический характер, направлены как на изучение динамики дисперсных включений в каналах и трубах, так и на исследование процессов, связанных с межфазным взаимодействием в различных течениях газодисперсных сред.

В данной работе рассматривается влияние граничных условий, заданных для течения несущей среды газозвеси на динамику фракций дисперсной фазы, отличающихся размером дисперсных включений. Численная модель реализует континуальную методику моделирования динамики газозвеси, предполагающую учет взаимодействия между дисперсной средой и несущей фазой. Течение несущей среды описывалось двумерной нестационарной системой уравнений Навье—Стокса [27].

2. Математическая модель. Движение несущей среды описывается системой уравнений Навье—Стокса для сжимаемого теплопроводного газа с учетом межфазного силового взаимодействия и теплообмена [5, 27–32]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) &= 0 \\ \frac{\partial \rho V^k}{\partial t} + \nabla^i (\rho V^k V^i + \delta_{ik} p - \tau_{ik}) &= - \sum_{j=1}^n F_{kj} + \sum_{j=1}^n \alpha_j \nabla^k p \\ \frac{\partial e}{\partial t} + \nabla^i (V^i (e + p - \tau_{ii}) - V^k \tau_{ki} - \lambda \nabla^i T) &= \\ &= \sum_{j=1}^n Q_j - \sum_{j=1}^n |F_{kj}| (V^k - V_j^k) + \sum_{j=1}^n \alpha_j \nabla^k (p V^k) \end{aligned} \quad (1.1)$$

Тензоры вязких напряжений записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}\tau_{11} &= \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} D \right), \quad \tau_{22} = \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} D \right) \\ \tau_{12} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\end{aligned}$$

Динамика каждой из фракций дисперсной фазы описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho_j}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_j \mathbf{V}_j) &= 0 \\ \frac{\partial \rho_j V_j^k}{\partial t} + \nabla^i (\rho_j V_j^i V_j^k) &= F_{kj} - \alpha_j \nabla^k p \\ \frac{\partial (e_j)}{\partial t} + \nabla^k (e_j V_j^k) &= Q_j\end{aligned}\quad (1.2)$$

Здесь p , ρ_1 , u_1 , v_1 – давление, плотность, декартовы составляющие скорости несущей среды в направлении осей x и y соответственно; T_1 , e_1 – температура и полная энергия газа; ρ_j , T_j , e_j , u_j , v_j – средняя плотность, температура, внутренняя энергия, декартовы составляющие скорости j -ой фракции дисперсной фазы в направлении осей x , y . Для описания массопереноса фракций дисперсной фазы применялась функция средней плотности [5,6] являющаяся произведением физической плотности, остающейся неизменной на объемное содержание, являющееся функцией временной и пространственных переменных. Температура несущей среды находится из уравнения $T_1 = (\gamma - 1)(e/\rho_1 - (u_1^2 + v_1^2)/2)/R$, где R – газовая постоянная несущей фазы, μ – вязкость газа, λ – теплопроводность газа, γ – постоянная адиабаты, c – скорость звука, $c = \sqrt{M^{-1}\gamma RT}$, M – молярная масса газа. Внутренняя энергия j -ой фракции дисперсной фазы определяется как $e_j = \rho_j C_{pj} T_j$, где C_{pj} – удельная теплоемкость единицы массы вещества j -ой фракции дисперсной фазы, средняя плотность дисперсной фазы вычисляется из выражения $\rho_j = \alpha_j \rho_{j0}$, где α_j – объемное содержание j -ой фракции дисперсной фазы, ρ_{j0} – физическая плотность материала j -ой фракции, F_{kj} – k -ая пространственные составляющие силы аэродинамического сопротивления:

$$\begin{aligned}F_{1j} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha_j}{d_j} C_d \rho_1 \sqrt{(u - u_j)^2 + (v - v_j)^2} (u - u_j) \\ F_{2j} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha_j}{d_j} C_d \rho_1 \sqrt{(u - u_j)^2 + (v - v_j)^2} (v - v_j)\end{aligned}$$

$Q = 6\alpha_j \lambda Nu_j (T - T_j)/d_j^2$ – поток тепла между несущей средой и j -ой фракцией дисперсной фазы. Здесь Nu_j – относительное число Нуссельта [5] d_j – диаметр частицы. Число Нуссельта определяется с помощью известной аппроксимации в зависимости от относительное число Маха – M_j , относительное число Рейнольдса – Re_j , число Прандтля [5] – Pr :

$$M_j = |\bar{V} - \bar{V}_j|/c, \quad Re_j = \rho |\bar{V} - \bar{V}_j| d_j \mu^{-1}, \quad Pr = C_p \mu \lambda^{-1}$$

$$Nu_j = 2 \exp(-M_j) + 0.459 Re_j^{0.55} Pr^{0.33}, \quad 0 \leq M_j \leq 2, \quad 0 \leq Re_j < 2 \cdot 10^5$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления вычислялся с использованием следующего выражения [5]:

$$C_{dj} = \frac{24}{\text{Re}_j} + \frac{4}{\text{Re}_j^{0.5}} + 0.4$$

Система уравнений (1.1)–(1.2) интегрировалась явным конечно-разностным методом Мак-Кормака второго порядка точности [33]. Для подавления численных осцилляций применялась схема нелинейной коррекции сеточной функции [27, 34]. В конечно-разностной аппроксимации на границах расчетной области для газа и k -ой фракции дисперсной фазы задавались однородные граничные условия Неймана:

$$\begin{aligned} u(t, 1, j) &= u_0, \quad u_k(t, 1, j) = u_0 \\ v(t, 1, j) &= 0, \quad v_k(t, 1, j) = 0 \\ u(t, N_x, j) &= u(t, N_x - 1, j), \quad u_k(t, N_x, j) = u_k(t, N_x - 1, j) \\ v(t, N_x, j) &= v(t, N_x - 1, j), \quad v_k(t, N_x, j) = v_k(t, N_x - 1, j) \\ u(t, i, 1) &= 0, \quad u_k(t, i, 1) = u_k(t, i, 2) \\ v(t, i, 1) &= 0, \quad v_k(t, i, 1) = v_k(t, i, 2) \\ u(t, i, N_y) &= 0, \quad u_k(t, i, N_y) = u_k(t, i, N_y - 1) \\ v(t, i, N_y) &= 0, \quad v_k(t, i, N_y) = v_k(t, i, N_y - 1) \\ \rho(t, 1, j) &= \rho(t, 2, j), \quad \rho_k(t, 1, j) = \rho_k(t, 2, j) \\ \rho(t, N_x, j) &= \rho(t, N_x - 1, j), \quad \rho_k(t, N_x, j) = \rho_k(t, N_x - 1, j) \\ \rho_1(t, i, 1) &= \rho_1(t, i, 2), \quad \rho_k(t, i, 1) = \rho_k(t, i, 2) \\ \rho_1(t, i, N_y) &= \rho_1(t, i, N_y - 1), \quad \rho_k(t, i, N_y) = \rho_k(t, i, N_y - 1) \\ e(t, 1, j) &= e(t, 2, j), \quad e_k(t, 1, j) = e_k(t, 2, j) \\ e(t, N_x, j) &= e(t, N_x - 1, j), \quad e_k(t, N_x, j) = e_k(t, N_x - 1, j) \\ e(t, i, 1) &= e(t, i, 2), \quad e_k(t, i, 1) = e_k(t, i, 2) \\ e(t, i, N_y) &= e(t, i, N_y - 1), \quad e_k(t, i, N_y) = e_k(t, i, N_y - 1) \\ p(t, 1, j) &= p(t, 2, j), \quad p(t, N_x, j) = p(t, N_x - 1, j) \\ p(t, i, 1) &= p(t, i, 2), \quad p(t, i, N_y) = p(t, i, N_y - 1) \end{aligned}$$

Здесь N_x, N_y – количество узлов, i, j – нумерация узлов в x и y направлениях соответственно. В работе [28] проводилось сопоставление результатов численных расчетов, проведенных по описанной модели с результатами физического эксперимента и аналитическими расчетами.

3. Результаты расчетов. В расчетах задавались следующие параметры несущей фазы газозвеси: $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса воздуха, теплопроводность несущей среды предполагалась равной – $\lambda = 0.02553$ Вт/(м·К), динамическая вязкость несущей среды – $\mu = 1.72 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\gamma = 1.4$, $R = 8.31$ Дж/(моль·К). Начальная плотность несущей среды – $\rho_0 = 1.29$ кг/м³. В работе моделировалось течение полидисперсной газозвеси. Моделируемая область течения представляет собой прямо-

угольный канал с длиной сторон $L = 0.4$ м и шириной $h = 0.1$ м (рис. 1), на входе в канал задаются начальные значения продольной составляющей скорости несущей среды и фракций дисперсной фазы $u_0 = 17$ м/с. Физическая плотность материала фракций дисперсной фазы $\rho_{i0} = 2500$ кг/м³, начальное объемное содержание фракций дисперсной фазы $\alpha_{i0} = 0.00008$. Фракции дисперсной фазы имели диаметры частиц соответственно $d_1 = 2$ мкм, $d_2 = 4$ мкм, $d_3 = 8$ мкм, $d_4 = 20$ мкм, $d_5 = 40$ мкм.

В представленных численных расчетах предполагалось, что при описании движения несущей среды для составляющих скорости газа задавались однородные граничные условия Дирихле на боковых поверхностях канала. Для всех фракций дисперсной фазы на боковых поверхностях канала задавались однородные граничные условия Неймана.

На рис. 2 представлено пространственное распределение модуля скорости однородного газа и несущей среды полидисперсной газовзвеси. За счет межфазного взаимодействия несущей среды и фракций дисперсной фазы значение модуля скорости несущей среды имеет меньшее значение, чем в однородном газе.

На рис. 3 представлены пространственные распределения модуля скорости несущей среды – рис. 3, а и фракций дисперсной фазы с различными размерами дисперсных включений – рис. 3, б–г; в момент времени $t = 30$ мс. Пространственное распределение модуля скорости несущей среды имеет “параболический” профиль [1] течения вязкой среды в канале. Профиль модуля скорости фракций дисперсной фазы схож с профилем движения несущей среды. При этом течение фракций дисперсной фазы описывается уравнениями динамики невязкой среды



Рис. 1. Общая схема моделируемого течения

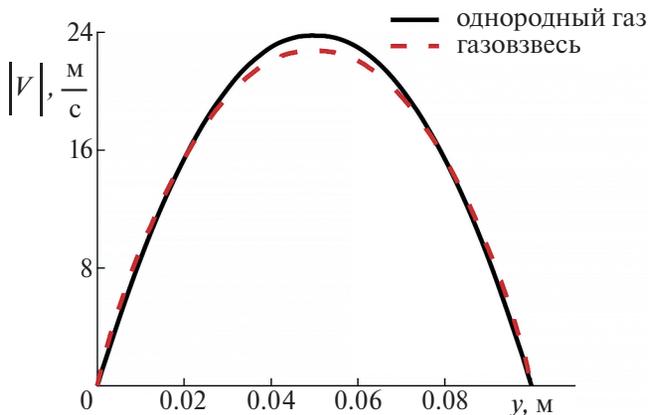


Рис. 2. Пространственное распределение вдоль поперечного сечения модуля скорости однородного газа и несущей среды газовзвеси – y ($x = L/2$), момент времени $t = 30$ мс

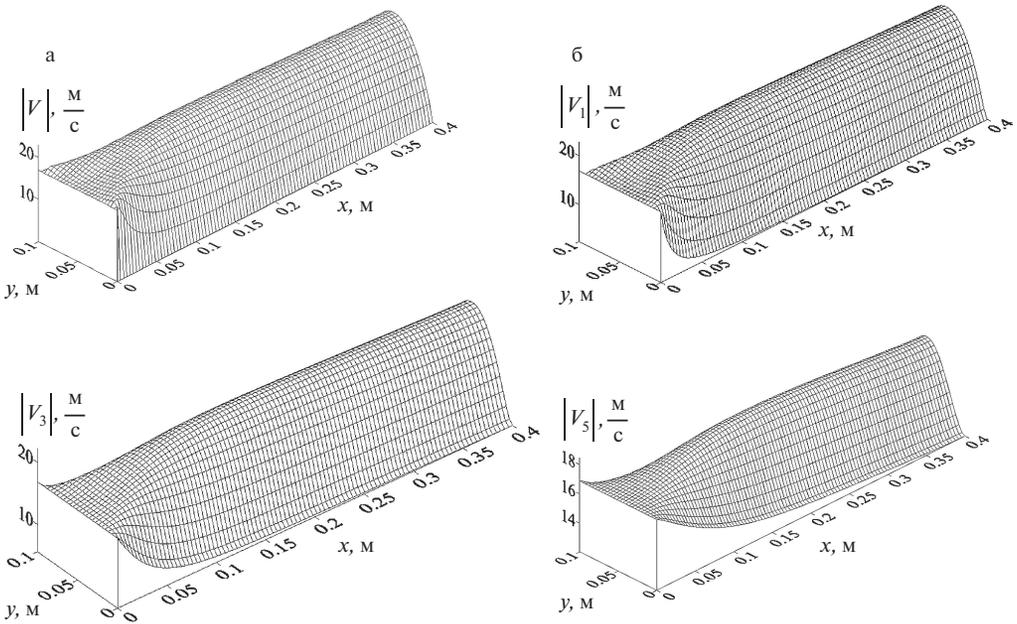


Рис. 3. Пространственное распределение модуля скорости несущей среды и фракций дисперсной фазы: а) несущая среда; б) фракция $d_1 = 2$ мкм; в) фракция $d_3 = 8$ мкм; г) фракция $d_5 = 40$ мкм

с граничными условиями “проскальзывания” на боковых поверхностях. Увеличение размера дисперсных включений приводит к большим отличиям распределений модулей скорости фракций в сравнении с распределением модуля скорости несущей среды. Для мелкодисперсных частиц ($d_1 = 2$ мкм) распределение профиля модуля скорости газа имеет наибольшее сходство с профилем модуля скорости несущей среды.

Наибольшее значения модуля скорости фракций дисперсной фазы достигается на оси симметрии канала, наименьшее значения модуля скорости достигается на границах канала (рис 4). При увеличении размера частиц фракций происходит увеличение модуля скорости частиц на границах канала и уменьшение

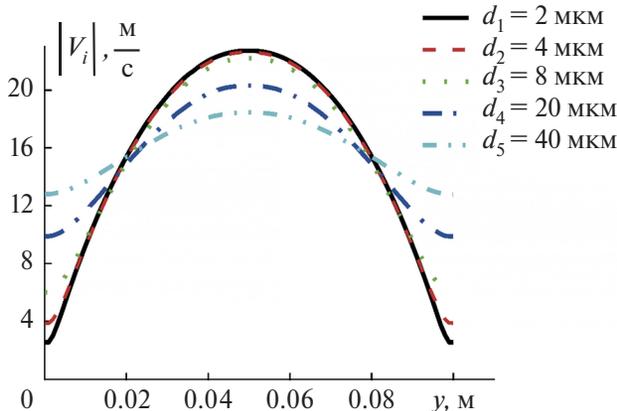


Рис. 4. Пространственное распределение вдоль поперечного сечения $-y$ ($x = L/2$) модуля скорости фракций дисперсной фазы газозвеси, в момент времени $t = 30$ мс

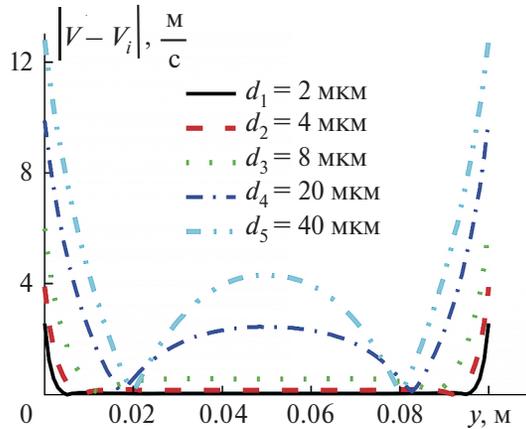


Рис. 5. Пространственное распределение вдоль поперечного сечения — y ($x = L/2$) модуля разности скоростей несущей среды и фракций дисперсной фазы — y ($x = L/2$), $t = 30$ мс

значения модуля скорости на оси симметрии канала. Для частиц с диаметром — $d_1 = 2$ мкм, $d_2 = 4$ мкм, $d_3 = 8$ мкм, $d_4 = 20$ мкм, $d_5 = 40$ мкм отношение минимального и максимального значений модуля скорости частиц составляют соответственно — $|V_{1\min}|/|V_{1\max}| = 11.55\%$, $|V_{2\min}|/|V_{2\max}| = 17.75\%$, $|V_{3\min}|/|V_{3\max}| = 29.98\%$, $|V_{4\min}|/|V_{4\max}| = 63.08\%$, $|V_{5\min}|/|V_{5\max}| = 70.4\%$. Таким образом увеличение размера дисперсных включений приводит к более равномерному распределению скорости фракций в поперечном сечении канала.

Для всех фракций дисперсной фазы наибольшее значение величина модуля разности скоростей несущей среды и фракций дисперсной фазы — $\sqrt{|V - V_i|}$ наблюдается на границах канала (рис. 5). Увеличение размера частиц приводит к увеличению значения скоростного скольжения между несущей средой и соответствующей фракцией дисперсной фазы.

Закономерность можно объяснить тем, что за счет межфазного взаимодействия динамика фракций дисперсной фазы определяется несущей средой. Увеличение размера частиц увеличивает их инерционность, таким образом динамика крупнодисперсных фракций в меньшей степени определяется динамикой несущей среды и соответственно граничные условия, задаваемые для несущей среды в меньшей степени влияют на профиль скорости фракции крупнодисперсных частиц.

Закключение. В работе численно моделировалось движение полидисперсной газозвеси в канале. Для несущей фазы газозвеси были заданы однородные граничные условия Дирихле на боковых поверхностях канала. Для фракций дисперсной фазы задавались однородные граничные условия Неймана. Выявлено, что в процессе движения газозвеси за счет межфазного взаимодействия с несущей средой в канале формируется «параболический» профиль модуля скорости фракций дисперсной фазы. Максимальное значение модуля скорости фракций достигается на оси симметрии канала, минимальные значения модулей скорости фракций дисперсной фазы на боковых поверхностях канала. На динамику мелкодисперсных фракций несущая среда оказывает более существенное влияние. При увеличении размера дисперсных включений происходит уменьшение перепада значений модуля скорости дисперсной фазы в поперечном сечении канала. Таким образом для фракций более крупных частиц поперечное распределение скорости более равномерное.

Работа выполнялась в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра Казанского научного центра Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 784 с.
2. *Нигматулин Р.И.* Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
3. *Стернин Л.Е.* Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1980. 176 с.
4. *Дейч М.Е., Филиппов Г.А.* Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981. 472 с.
5. *Кутушев А.Г.* Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. СПб.: Недра, 2003, 284 с.
6. *Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А.* Волновые процессы в газозвесах частиц металлов. Новосибирск: Параллель, 2015. 301 с.
7. *Вараксин А.Ю.* Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58. №4. С. 646–669.
8. *Пахомов М.А., Терехов В.И.* Влияние закрутки потока на теплоперенос в газокapельном потоке за внезапным расширением трубы // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. №3. С. 431–438.
9. *Широкова Е.Н., Садин Д.В.* Волновые и релаксационные эффекты при истечении газозвеси, частично заполняющей цилиндрический канал// Компют. исслед. и моделир. 2023. Т. 15. №6. С. 1495–1506.
10. *Федоров А.В., Хмель Т.А., Лаврук С.А.* Выход гетерогенной детонационной волны в канал с расширением // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. №3. С. 58–63.
11. *Волков К.Н.* Качественный анализ и численное моделирование движения частицы в канале с проницаемыми стенками с учетом действия массовых сил // ИФЖ. 2013. Т. 86. №6. С. 1212–1218.
12. *Абед А.Х., Шеклеин С.Е., Пахалуев В.М.* Теплообмен сферического элемента с водовоздушным потоком аэрозоля в цилиндрическом канале // Теплофиз. и аэромех. 2020. Т. 27. №1. С. 109–119.
13. *Xu Z., Yu X., Han Z., Wang Y.* Simulation of particle fouling characteristics with improved modeling on two different tubes // Powder Technol. 2021. V. 382. С. 398–405.
14. *Xiao W., Jin T., Luo K., Dai Q., Fan J.* Eulerian–Lagrangian direct numerical simulation of preferential accumulation of inertial particles in a compressible turbulent boundary layer // J. of Fluid Mech. 2020. V. 903. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.601>
15. *Трусов П.В., Зайцева Н.В., Цинкер М.Ю., Бабушкина А.В.* Моделирование течения запыленного воздуха в респираторном тракте // Рос. ж. биомех. 2018. Т. 22. №3. С. 301–314.
16. *Широкова Е.Н.* Численное исследование импульсного струйного течения неоднородной газодисперсной смеси // Физ.-хим. кин. в газ. дин. 2022. Т. 23. №4. С. 72–83.
17. *Земерев Е.С., Малинин В.И.* Анализ течения порошково-газовой среды в коническом канале с выпускным отверстием // Вестн. Пермского национального исследовательского политехнич. ун-та. Аэрокосмич. техн. 2016. №47. С. 154–176.
18. *Еникеев И.Х.* Математическое моделирование газопылевых течений в сепараторах соплового типа // Теплофиз. и аэромех. 2020. Т. 27. №1. С. 99–108.
19. *Ali S., Waheed K., Qureshi K., Irfan N., Ahmed M., Siddique W., Farooq A.* Experimental investigation of aerosols removal efficiency through self-priming Venturi scrubber // Nuclear Engng.&Technol. 2020. V. 52. №10. P. 2230–2237.
20. *Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф.* Влияние теплообменных процессов на снижение интенсивности сферического взрыва в водной пене // ПММ. 2019. Т. 83. №3. С. 468–477.
21. *Xiu Z., Nie W., J Yan J., Chen D., Cai P., Liu Q., Du T., Yang B.* Numerical simulation study on dust pollution characteristics and optimal dust control air flow rates during coal mine production // J. of Cleaner Prod. 2020. V. 248.
22. *Салахова Э.И., Зинуров В.Э., Харьков В.В., Глухова П.Е., Лавриков В.А., Николаев А.Н.* Численное моделирование очистки газа от твердых взвешенных частиц в сепарационном устройстве с вогнутыми отражающими элементами // Научно-технич. Вестн. Поволжья. 2023. №8. С. 10–14.

23. *Ватузов Д.Н.* Теоретические предпосылки создания аппаратов очистки воздуха в трубках и щелевых каналах от высокодисперсного капельного аэрозоля // Градостр. и архитектура. 2016. Т. 25. №4. С. 40–43.
24. *Ferreira R., Falco D., Oliveira V., Pinto A.* 1D+ 3D two-phase flow numerical model of a proton exchange membrane fuel cell // Appl. Energy. 2017. V. 203. P. 474–495.
25. *Alkhedhair A., Jahn I., Gurgenci H., Guan Z., He S., Lu Y.* Numerical simulation of water spray in natural draft dry cooling towers with a new nozzle representation approach // Appl. Thermal Engng. 2016. V. 98. P. 924–935.
26. *Yan X., Zhou Y., Diao H., Gu H., Li Y.* Development of mathematical model for aerosol deposition under jet condition // Annals of Nuclear Energy. 2020. V. 142.
27. *Tukmakov A.L.* Model of motion and sedimentation of a charged gas suspension in an electric field // J. Engng. Phys.&Thermophys. 2014. vol. 87. no. 1. P. 38–47.
28. *Нигматулин Р.И., Губайдуллин Д.А., Тукмаков Д.А.* Ударно-волновой разлет газозвесей // Докл. РАН. 2016. Т. 466. №4. С. 418–421.
29. *Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А.* Динамика заряженной газозвесей с начальным пространственно неравномерным распределением средней плотности дисперсной фазы при переходе к равновесному состоянию // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. №4. С. 509–512.
30. *Тукмаков Д.А.* Численное исследование влияния свойств газовой составляющей взвеси твердых частиц на разлет сжатого объема газозвесей в двухкомпонентной среде // ИФЖ. 2020. Т. 93. №2. С. 304–310.
31. *Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А.* Численное исследование влияния параметров дисперсных частиц на осаждение твердой фазы электрически заряженной полидисперсной газозвесей // Изв. Саратов. Ун-та. Новая сер. Сер.: Математика.Механика. Информатика. 2022. Т. 22. №1. С. 90–102.
32. *Губайдуллин Д.А., Тукмаков Д.А.* Численное исследование массопереноса дисперсных частиц при прохождении ударной волны по моно- и полидисперсной газозвесей // ПММ. 2023. Т. 87. №3. С. 461–474.
33. *Флетчер К.* Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2. М.: Мир, 1991. 552 с.
34. *Музафаров И.Ф., Утужников С.В.* Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа // Математическое моделирование. 1993. №3. С. 74–83.

Numerical Study of the Influence of Boundary Conditions on Calculations of the Dynamics of Polydisperse Gas Suspension

D.A. Tukmakov^{a,*}

^aIME Federal Research Center Kazan Scientific Center RAS, Kazan, Russia

^{*}e-mail: tukmakovda@imm.knc.ru

The work numerically simulates the flow of a polydisperse gas suspension in a channel. The carrier medium was described as a viscous, compressible, heat-conducting gas. The mathematical model implemented a continuum technique for the dynamics of multiphase media, taking into account the interaction of the carrier medium and the dispersed phase. For each component of the mixture, a complete hydrodynamic system of equations of motion for the carrier phase and dispersed phase fractions was solved. The dispersed phase consisted of particles with different sizes of dispersed inclusions. For the carrier medium, homogeneous Dirichlet boundary conditions were specified on the side surfaces of the channel. For fractions of the dispersed phase, boundary conditions for slippage. The influence of the boundary conditions of the flow of the carrier medium on the dynamics of gas suspension fractions has been revealed.

Keywords: continuum model, polydisperse gas suspension, interphase interaction, boundary conditions

REFERENCES

1. *Loytsyansky L.G.* Mechanics of Liquid and Gas. Moscow: Drofa, 2003. 784 p. (in Russian)
2. *Nigmatulin R.I.* Dynamics of Multiphase Media. N.Y.: CRC Press, 1990. 532 p.
3. *Sternin L.E.* Two-Phase Mono- and Polydisperse Flows of Gas with Particles. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 176 p. (in Russian)
4. *Deutsch M.E., Filippov G.A.* Gas Dynamics of Two-Phase Media. Moscow: Energoizdat, 1981. 472p. (in Russian)
5. *Kutushev A.G.* Mathematical Modeling of Wave Processes in Aerodisperse and Powder Media. St. Petersburg: Nedra, 2003. 284 p.
6. *Fedorov A.V., Fomin V.M., Khmel T.A.* Wave Processes in Gas Suspensions of Metal Particles. Novosibirsk: Parallil, 2015. 301 p. (in Russian)
7. *Varaksin A.Y.* Two-phase flows with solid particles, droplets, and bubbles: problems and research results (review) // High Temp., 2020, vol. 58, no. 4, pp. 595–614.
8. *Pakhomov M.A., Terekhov V.I.* Effect of droplet evaporation on the flow structure and heat and mass transfer in a confined swirling gas-droplet flow downstream of a tube sudden expansion // Thermophys.&Aeromech., 2018, vol. 25, no. 6, pp. 833–843.
9. *Shirokova E.N., Sadin D.V.* Wave and relaxation effects during the outflow of a gas suspension partially filling a cylindrical channel // Kompyut. Issled. i Model., 2023, vol. 15, no. 6, pp. 1495–1506. (in Russian)
10. *Fedorov A.V., Khmel T.A., Lavruk S.A.* Exit of a heterogeneous detonation wave into a channel with expansion // Goreniye i Vzryv, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 58–63. (in Russian)
11. *Volkov K.N.* Qualitative analysis and numerical modeling of particle motion in a channel with permeable walls taking into account the action of mass forces // Inzh.-Fiz. zh., 2013, vol. 86, no. 6, pp. 1212–1218. (in Russian)
12. *Abed A.H., Shcheklein S.E., Pakhaluev V.M.* Heat transfer of a spherical element with air-water aerosol in a cylindrical channel // Thermoph.&Aeromech., 2020, vol. 27, no. 1, pp. 105–115. (in Russian)
13. *Xu Z., Yu X., Han Z., Wang Y.* Simulation of particle fouling characteristics with improved modeling on two different tubes // Powder Technol., 2021, vol. 382, pp. 398–405.
14. *Xiao W., Jin T., Luo K., Dai Q., Fan J.* Eulerian–Lagrangian direct numerical simulation of preferential accumulation of inertial particles in a compressible turbulent boundary layer // J. of Fluid Mech., 2020, vol. 903. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.601>
15. *Trusov P.V., Zaitseva N.V., Tsinker M.Yu., Babushkina A.V.* Modeling the flow of dusty air in the respiratory tract // Rus. zh. Biomekh., 2018, vol. 22, no. 3, pp. 301–314. (in Russian)
16. *Shirokova E.N.* Numerical study of pulsed jet flow of an inhomogeneous gas-dispersed mixture // Fiz.-Khim. Kinetika v Gaz. Din., 2022, vol. 23, no. 4, pp. 72–83. (in Russian)
17. *Zemerev E.S., Malinin V.I.* Analysis of the flow of a powder-gas medium in a conical channel with an outlet // Vestn. Perm. Nats. Issled. Politekhn. Univ. Aerokosm. Tekhn., 2016, no. 47, pp. 154–176. (in Russian)
18. *Enikeev I.K.* Mathematical modeling of gas-dust flows in nozzle-type separators // Teplofiz.&Aeromekh., 2020, vol. 27, no. 1, pp. 99–108.
19. *Ali S., Waheed K., Qureshi K., Irfan N., Ahmed M., Siddique W., Farooq A.* Experimental investigation of aerosols removal efficiency through self-priming venturi scrubber // Nuclear Engng.&Techn., 2020, vol. 52, no. 10, pp. 2230–2237.
20. *Bolotnova R.K., Gainullina E.F.* Influence of heat transfer on decreasing intensity of a spherical explosion in aqueous foam // Fluid Dyn., 2019, vol. 54, no. 7, pp. 970–977.
21. *Xiu Z., Nie W., J Yan J., Chen D., Cai P., Liu Q., Du T., Yang B.* Numerical simulation study on dust pollution characteristics and optimal dust control air flow rates during coal mine production // J. of Cleaner Prod., 2020, vol. 248.
22. *Salakhova E.I., Zinurov V.E., Kharkov V.V., Glukhova P.E., Lavrikov V.A., Nikolaev A.N.* Numerical modeling of gas purification from solid suspended particles in a separation device with concave reflective elements // Nauch.-Tekh. Vestn. Povolzhya, 2023, no. 8, pp. 10–14. (in Russian)
23. *Vatuzov D.N.* Theoretical prerequisites for the creation of air purification devices in tubes and slot channels from highly dispersed droplet aerosol // Gradostr. i Arkhit., 2016, vol.25, no. 4, pp. 40–43. (in Russian)

24. *Ferreira R., Falco D., Oliveira V., Pinto A.* 1D+ 3D two-phase flow numerical model of a proton exchange membrane fuel cell // *Appl. Energy*, 2017, vol. 203, pp. 474–495.
25. *Alkhedhair A., Jahn I., Gurgenci H., Guan Z., He S., Lu Y.* Numerical simulation of water spray in natural draft dry cooling towers with a new nozzle representation approach // *Appl. Thermal Engng.*, 2016, vol. 98, pp. 924–935.
26. *Yan X., Zhou Y., Diao H., Gu H., Li Y.* Development of mathematical model for aerosol deposition under jet condition // *Annals of Nuclear Energy*, 2020, vol. 142.
27. *Tukmakov A.L.* Model of motion and sedimentation of a charged gas suspension in an electric field // *J. of Engng. Phys.&Thermophys.*, 2014, vol. 87, no. 1, pp. 38–47.
28. *Nigmatulin R.I., Gubaidullin D.A., Tukmakov D.A.* Shock wave dispersion of gas–particle mixtures // *Dokl. Phys.*, 2016, vol. 61, no. 2, pp. 70–73.
29. *Tukmakov A.L., Tukmakov D.A.* Dynamics of a charged gas suspension with an initial spatially nonuniform distribution of the average dispersed phase density during the transition to the equilibrium state // *High Temp.*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 491–495.
30. *Tukmakov D.A.* Numerical investigation of the influence of properties of the gas component of a suspension of solid particles on the spreading of a compressed gas–suspension volume in a binary medium // *J. of Engng. Phys.&Thermophys.*, 2020, vol. 93, no. 2, pp. 291–297.
31. *Tukmakov A.L., Tukmakov D.A.* Numerical study of the influence of the parameters of dispersed particles on the deposition of the solid phase of an electrically charged polydisperse gas suspension // *Izv. Saratov. Univ.. Novaya ser. Ser.: Matem. Mekh. Inform.*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 90–102. (in Russian)
32. *Gubajdullin D.A., Tukmakov D.A.* Numerical study of the effect of polydispersity on the mass transfer of the dispersed phase during the passage of a shock wave through a gas suspension // *Fluid Dyn.*, 2023, vol. 58, no. 7, pp. 1373–1383.
33. *Fletcher C.A.* *Computation Techniques for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer, 1988. 502 p.
34. *Muzafarov I.F., Utyuzhnikov S.V.* Application of compact difference schemes to the study of unsteady compressible gas flows // *Matem. Modelir.*, 1993, no. 3, pp. 74–83. (in Russian)