

DOI: [10.7242/1999-6691/2020.13.3.22](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.3.22)

УДК 532.5,533.2

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ НА ГЕНЕРАЦИЮ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА, ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ ОСАЖДЕНИИ АЭРОЗОЛЯ

Д.А. Тукмаков

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр» РАН, Казань, Российская Федерация

Рассматриваются нестационарные процессы в неоднородной среде. Динамика неоднородных сред во многом определяется эффектами, вызванными межфазным взаимодействием, интенсивность которого зависит от свойств дисперсной фазы. Целью данной статьи является изучение влияния объёмного содержания, плотности материала дисперсной фазы и размера частиц аэрозоля на движение несущей среды. Объектом исследования являются аэрозоли – газокапельные и запылённые среды. Как правило, движение смеси инициируется движением несущей фазы. Здесь несущей средой является газ, течение в нем возникает вследствие осаждения частиц газозвеси. Численно оценивается влияние дисперсной фазы двухфазной смеси на движение газа при гравитационном осаждении аэрозоля. Математическая модель состоит из уравнений динамики несущей среды и уравнений динамики дисперсной компоненты. Предполагается, что дисперсная компонента смеси осаждается в стоковом режиме. Система уравнений динамики несущей среды состоит из уравнения неразрывности, уравнений сохранения импульса и энергии. Несущая среда (газ) описывается как вязкая, сжимаемая и теплопроводная. Межфазное взаимодействие определяется силой Стокса. Также в математической модели учитывается межфазный теплообмен. Уравнения математической модели интегрируются явным конечно-разностным методом Мак-Кормака с погрешностью второго порядка, для получения монотонного численного решения применяется схема нелинейной коррекции сеточной функции, позволяющая преодолеть численную осцилляцию в найденном решении. Уравнения математической модели дополняются начальными и краевыми условиями. Приведённые данные численных расчётов демонстрируют формирование течения газа при гравитационном осаждении дисперсной фазы. Также при моделировании гравитационного осаждения аэрозоля происходит неравномерное распределение давления газа, обусловленное течением несущей среды. Численное моделирование выявило, что, в зависимости от параметров дисперсной компоненты газозвеси, интенсивность течения газа различна.

Ключевые слова: численное моделирование, динамика многофазных сред, вязкий газ, межфазное взаимодействие

NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF DISPERSED PHASE PARAMETERS ON THE GAS FLOW GENERATION FORMED BY GRAVITATIONAL DEPOSITION OF AEROSOL

D.A. Tukmakov

Federal Research Center Kazan Scientific Center RAS, Kazan, Russian Federation

In this paper, non-stationary processes in an inhomogeneous medium are investigated. The dynamics of inhomogeneous media is largely determined by the effects caused by interfacial interaction, the intensity of which depends on the properties of a dispersed phase. The goal is to study the effect of volumetric content, density of the dispersed phase material and the size of aerosol particles on the motion of the carrier medium. The object of study are aerosols – gas-droplet and dusty environments. As a rule, the movement of the mixture is initiated by the movement of the carrier phase. This study addresses the flow of gas arising from the deposition of particles of a gas suspension. The effect of the dispersed phase of a two-phase mixture on gas motion during gravitational aerosol deposition is investigated numerically. The mathematical model consists of equations describing the dynamics of a carrier medium and those describing the dynamics of a dispersed component. It has been assumed that the dispersed component of the mixture is deposited in the Stokes regime. The system of equations of the dynamics of a carrier medium involves continuity, momentum, and energy equations. The carrier medium is described as a viscous, compressible and heat-conducting gas. Interfacial interaction is determined by the Stokes force. The mathematical model takes into account interphase heat transfer. The equations of the mathematical model are integrated by the explicit finite-difference McCormack method with a second-order error. A nonlinear correction of the grid function is used to obtain a monotonous numerical solution, which makes it possible to overcome the numerical oscillation in the resulting solution. The equations are supplemented by initial and boundary conditions. Numerical calculations of the gravitational deposition of a dispersed phase have shown the formation of a gas flow, and simulations of the gravitational deposition of an aerosol have revealed an uneven distribution of gas pressure caused by the flow of the carrier medium. Numerical modeling demonstrates that, depending on the parameters of the dispersed component of the gas suspension, different intensities of the gas flow can be observed.

Key words: numerical simulation, dynamics of multiphase media, viscous gas, interphase interaction

1. Введение

Многие процессы в природе и технике связаны с динамикой неоднородных сред [1–21]. В монографиях [1–4] изложены результаты разработки математических моделей динамики газокапельных, запылённых сред и суспензий, то есть смесей, в которых компоненты имеют различные агрегатные состояния. В случае различного агрегатного состояния компонент такие смеси именуется многофазными средами. Особенностью движения многофазных сред являются взаимобратные эффекты, когда взаимодействие компонент смеси определяет движение всей смеси в целом [4–6, 9, 12, 16]. Понимание и описание этих эффектов является одной из важных задач механики жидкости и газа. Так, публикация [6] посвящена

численному изучению влияния межфазного взаимодействия на отражение ударной волны от твердой поверхности в газозвеси. В работе [7] численно исследуется нестационарное течение запыленной среды в гиперзвуковой ударной трубе без учёта влияния дисперсной фазы на течение несущей среды; рассматриваются закономерности распределения концентрации дисперсной фазы смеси. Работа [8] содержит теоретический анализ динамики и осаждения одиночных частиц в газе. В статье [9] в стационарной постановке математически моделируются потоки двухфазной среды. В [10] экспериментально исследуется влияние физических полей на процесс осаждения дисперсной фазы аэрозоля; на основе анализа результатов экспериментов выведены теоретические зависимости. Экспериментальному определению количественных показателей осаждения дисперсной фазы металлических аэрозолей на твердых поверхностях применительно к технологическим процессам ядерной энергетики посвящена статья [11]. В [12] экспериментально исследуется влияние акустических полей на осаждение дисперсной фазы аэрозоля. Моделирование динамики двухфазной смеси с целью выявления закономерностей перераспределения концентрации дисперсной фазы на объектах горной промышленности содержит работа [13]. В статье [14] экспериментально и теоретически, но без учёта влияния аэродинамических полей, рассматриваются факторы, влияющие на процесс осаждения аэрозолей при движении продуктов горения по каналам систем противодымной вентиляции. Перенос дисперсных частиц в процессе двухфазной фильтрации в пористой среде численно моделируется в [15]. В работе [16] изучается движение несущей среды — несжимаемой жидкости, при осаждении частиц суспензии. При помощи континуальной математической модели двухкомпонентной суспензии выявлено, что при осаждении частиц формируется течение жидкости, моделируется осаждение дисперсной компоненты суспензии для различных параметров смеси, когда несущая среда несжимаема.

В предлагаемой вниманию читателя работе рассматривается генерация течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа вследствие гравитационного осаждения частиц аэрозоля. Целью работы является выяснение влияния различных параметров дисперсной компоненты (объёмного содержания, размера частиц и плотности материала осаждающейся твёрдой фазы) на интенсивность взаимобратных процессов в газовой взвеси частиц в сжимаемом газе. Новизна работы заключается в применении континуальной модели динамики многофазных сред в исследовании гравитационного осаждения аэрозоля.

2. Методика исследования

Для описания течения двухфазной смеси применяется система уравнений динамики двухскоростной и двухтемпературной газозвеси со скоростным и температурным взаимодействием фаз. Математическая модель включает в себя уравнения движения несущей среды и дисперсной фазы.

Движение несущей среды описывается одномерной системой уравнений Навье–Стокса для сжимаемого теплопроводного газа с учётом межфазного силового взаимодействия и теплообмена:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_1 u_1^2 + p - \tau) = -F + \alpha \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(e_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left((e_1 + p - \tau) u_1 - \lambda \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) = Q - |F| (u_1 - u_2) - \alpha \left(\frac{\partial(p u_1)}{\partial y} \right). \quad (3)$$

В систему входят уравнение неразрывности (1), уравнение сохранения импульса (2), уравнение сохранения энергии (3), в которых обозначено: p , ρ_1 , u_1 — давление, плотность, скорость газа; T_1 , e_1 — температура и полная энергия газа; α , u_2 — объёмное содержание и скорость дисперсной фазы; τ — тензор вязких напряжений несущей среды; λ — коэффициент теплопроводности газа; F и Q — соответственно, межфазное силовое взаимодействие и межфазный теплообмен.

Для дисперсной компоненты среды вводится понятие «средней плотности» [1] — произведение физической плотности материала частиц (постоянной величины) и объёмного содержания дисперсной фазы, являющегося функцией временной и пространственной переменных. Динамика дисперсной компоненты представляется системой уравнений:

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_2 u_2^2) = F - \alpha \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(e_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(e_2 u_2) = -Q. \quad (6)$$

Здесь уравнение (4) описывает непрерывность «средней плотности» дисперсной фазы, уравнения (5) и (6) являются законами сохранения импульса и тепловой энергии дисперсной фазы, при этом ρ_2 , e_2 — средняя плотность и внутренняя энергия дисперсной фазы. Математическая модель течения двухфазной смеси предполагает монодисперсный состав твёрдой фазы газозвеси, то есть все частицы имеют одинаковый размер и одинаковые физические свойства (плотность и теплоёмкость) [4, 5].

Кроме перечисленных обозначений, в уравнениях (1)–(6) используются следующие выражения [1, 4, 5]:

$$\rho_2 = \alpha_2 \rho_{20}, \quad (7)$$

$$e_2 = \rho_2 C_p T_2, \quad (8)$$

$$T_1 = (\gamma - 1)(e_1 / \rho_1 - 0,5u_1^2), \quad (9)$$

$$\tau = \frac{4}{3} \mu \frac{\partial u_1}{\partial y}, \quad (10)$$

$$p = \rho_1 R T_1, \quad p = (\gamma - 1)(e_1 - 0,5\rho_1 u_1^2), \quad (11)$$

$$F = \frac{3\alpha}{4d} C_d \rho_1 |u_1 - u_2| (u_1 - u_2), \quad (12)$$

$$Q = 6\alpha\lambda \text{Nu}_{12} (T_1 - T_2) / (d^2), \quad (13)$$

$$C_d = \frac{24}{\text{Re}_{12}} + \frac{4}{\text{Re}_{12}^{0,5}} + 0,4. \quad (14)$$

В выражении для средней плотности (7) параметр ρ_{20} есть физическая плотность дисперсной фазы; выражение для тепловой энергии дисперсной фазы (8) входят C_p — удельная теплоемкость единицы массы вещества, из которого состоят частицы, и T_2 — температура дисперсной фазы; уравнение (9) связывает температуру газа с его скоростью; а выражение (10) — это тензор вязких напряжений газовой компоненты смеси; из уравнения (11) определяется давление несущей среды; в выражения (9)–(11) входят газовая постоянная несущей среды R , а также вязкость μ и постоянная адиабаты газа γ [22]; взаимодействие несущей и дисперсной фаз описывается уравнениями (12) и (13), при этом силовое (12) учитывает силу Стокса, воздействующую на частицы дисперсной фазы, а в тепловое (13) входит относительное число Нуссельта Nu_{12} , определяемое с помощью известной аппроксимации в зависимости от относительных чисел Маха — $\text{M}_{12} = |u_1 - u_2|/c$, Рейнольдса — $\text{Re}_{12} = \rho_1 |u_1 - u_2| d / \mu$, Прандтля — $\text{Pr} = \gamma C_p \mu / \lambda$ [4, 5]: $\text{Nu}_{12} = 2 \exp(-\text{M}_{12}) + 0,459 \text{Re}_{12}^{0,55} \text{Pr}^{0,33}$; в выражениях для межкомпонентного (12) и теплового (13) взаимодействия, а также в выражении (14) для коэффициента сопротивления частиц C_d параметр d обозначает диаметр частиц. Выражения для межфазного взаимодействия справедливы в широком диапазоне значений относительных чисел Маха и Рейнольдса:

$$0 < \text{M}_{10} < 2, \quad 0 < \text{Re}_{10} < 2 \cdot 10^5.$$

На сферические частицы аэрозоля действует сила тяжести, пропорциональная массе частицы. С учётом закона Архимеда она равна:

$$G = \frac{1}{6} d^3 \pi g (\rho_{20} - \rho_1).$$

Здесь g — ускорение свободного падения. Под действием силы G частицы начинают двигаться, однако при этом, согласно закону Стокса, на них оказывает влияние сила сопротивления среды F_s , пропорциональная их скорости u_2 , диаметру d и вязкости среды μ : $F_s = -3\pi d \mu u_2$. По причине того, что сила сопротивления среды F_s уравновешивает силу тяжести G , частица движется с постоянной скоростью

седиментации. В таком случае скорость гравитационного осаждения частиц аэрозоля u_{20} (15) определяется следующим образом [3]:

$$u_{20} = \frac{gd^2(\rho_1 - \rho_{20})}{18\mu}. \quad (15)$$

При математическом моделировании считалось, что скорость дисперсной фазы внутри моделируемой области распределена равномерно и равна скорости гравитационного осаждения:

$$u_2(y, t) = u_{20} = \text{const}.$$

Система уравнений дополнялась соответствующими граничными условиями. Граничные условия задавались исходя из предположения, что аэрозоль осаждается в закрытой ёмкости. На границах расчётной области полагались однородные граничные условия Дирихле для скорости несущей и дисперсной фаз и однородные граничные условия Неймана для остальных функций [4]:

$$\begin{aligned} u_1(t, 0) = u_2(t, 0) = 0, \quad u_1(t, L) = u_2(t, L) = 0, \\ \frac{\partial \rho_1}{\partial y} = \frac{\partial \rho_2}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial e_1}{\partial y} = \frac{\partial e_2}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (y = 0, L). \end{aligned}$$

Для сеточной функции на сетке с числом узлов N граничные условия записывались в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_1(t, 1) = 0, \quad u_1(t, N) = 0, \\ u_2(t, 1) = 0, \quad u_2(t, N) = 0, \\ e_1(t, 1) = e_1(t, 2), \quad e_2(t, 1) = e_2(t, 2), \\ \rho_1(t, 1) = \rho_1(t, 2), \quad \rho_2(t, 1) = \rho_2(t, 2), \\ e_1(t, N) = e_1(t, N-1), \quad e_2(t, N) = e_2(t, N-1), \\ \rho_1(t, N) = \rho_1(t, N-1), \quad \rho_2(t, N) = \rho_2(t, N-1), \\ p_1(t, 1) = p(t, 2), \quad p(t, N) = p(t, N-1). \end{aligned}$$

Система уравнений (1)–(6) интегрировалась явным конечно-разностным методом Мак-Кормака с погрешностью второго порядка. Рассмотрим применение этого численного метода на примере скалярного нелинейного уравнения в частных производных:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial a(f)}{\partial x} = c(f). \quad (16)$$

Алгоритм его решения явным конечно-разностным методом Мак-Кормака [22, 23] имеет вид:

$$f_j^* = f_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_{j+1}^n - a_j^n) + \Delta t c_j^n, \quad (17)$$

$$f_j^{n+1} = 0,5(f_j^n + f_j^*) - 0,5 \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_j^* - a_{j-1}^*) + 0,5 \Delta t c_j^*. \quad (18)$$

Здесь: n — номер итерации по временной координате; Δx — шаг по пространственному направлению; Δt — шаг по времени; a_j^* и c_j^* являются функциями f_j^* . Для получения монотонного численного решения к сеточной функции на каждом временном шаге применяется схема нелинейной коррекции [24]. Алгоритм коррекции осуществляется последовательно во всех узлах и, на примере функции f , заключается в следующем: если выполняются условия $(\delta f_{j-1/2} \cdot \delta f_{j+1/2}) < 0$ или $(\delta f_{j+1/2} \cdot \delta f_{j+3/2}) < 0$, то функция f в j -м узле равна: $\tilde{f}_j = f_j + \kappa(\delta f_{j+1/2} - \delta f_{j-1/2})$. В противном случае $\tilde{f}_j = f_j$. Также использованы обозначения:

$$\delta f_{j-1/2} = f_j - f_{j-1}, \quad \delta f_{j+1/2} = f_{j+1} - f_j, \quad \delta f_{j+3/2} = f_{j+2} - f_{j+1},$$

где \tilde{f}_j — значение функции в j -м узле после перехода на $(n+1)$ -й временной слой по схеме Мак-Кормака; κ — коэффициент коррекции.

3. Результаты расчётов

На рисунке 1 схематично изображено гравитационное осаждение аэрозоля. Начальное давление и температура газа составляли $p_0 = 98142$ Па и $T_0 = 293$ К. Расчёты выполнены для частиц диаметром $d = 100$ мкм и физической плотности их материала $\rho_{20} = 2500$ кг/м³. Предполагалось, что в начальный момент времени газ покоится, а дисперсная фаза осаждается с равномерной скоростью внутри закрытой ёмкости. При равномерном гравитационном осаждении аэрозоля за счёт массопереноса дисперсной фазы от верхней стенки к нижней, то есть вдоль направления движения частиц, средняя плотность меньше на верхней стенке и больше на нижней стенке (по сравнению с начальным моментом времени, см. Рис. 2). Следует отметить, что в континуальных моделях динамики многофазных смесей дисперсная компонента описывается как сплошная среда, а не набор дискретных частиц, поэтому моделируемый массоперенос дисперсной компоненты происходит не одномоментно.

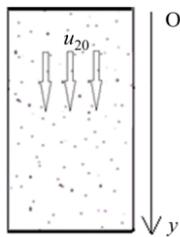


Рис. 1. Схематичное изображение моделируемого процесса

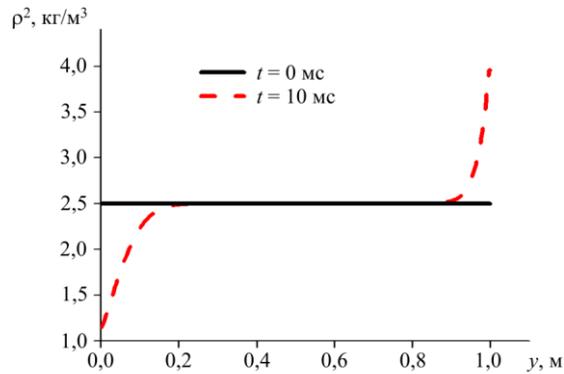


Рис. 2. Пространственное распределение средней плотности дисперсной фазы при гравитационном осаждении аэрозоля; диаметр частиц $d = 100$ мкм и физическая плотность их материала $\rho_{20} = 2500$ кг/м³

В процессе гравитационного осаждения дисперсной фазы аэрозоля формируется течение несущей среды — газа (Рис. 3а). Движение газа направлено противоположно движению осаждающихся частиц аэрозоля. При этом вследствие течения газа, инициируемого осаждением дисперсной фазы, образуются неравномерные пространственные распределения давления, плотности и температуры газа (Рис. 3б, Рис. 4а, б). Численные результаты расчёта демонстрируют, что при гравитационном осаждении аэрозоля происходит увеличение давления, плотности и температуры газа в направлении движения дисперсной компоненты смеси.

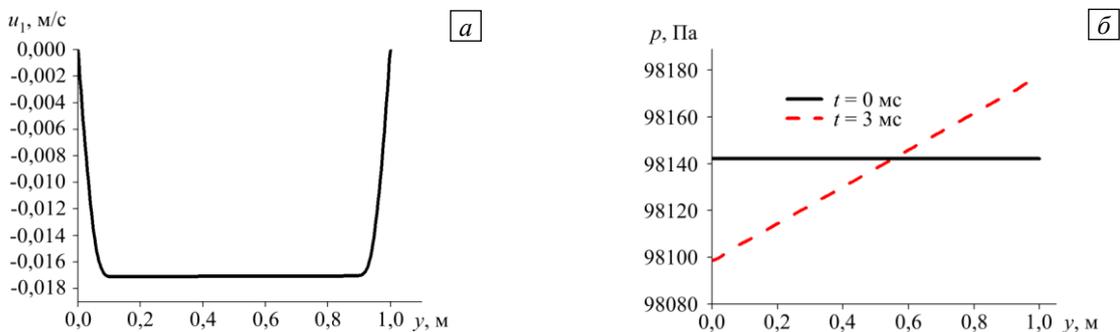


Рис. 3. Пространственное распределение скорости (в момент времени $t = 3$ мс) (а) и давления (б) газа для объёмного содержания дисперсной фазы $\alpha = 0,001$; диаметр частиц $d = 100$ мкм и физическая плотность их материала $\rho_{20} = 2500$ кг/м³

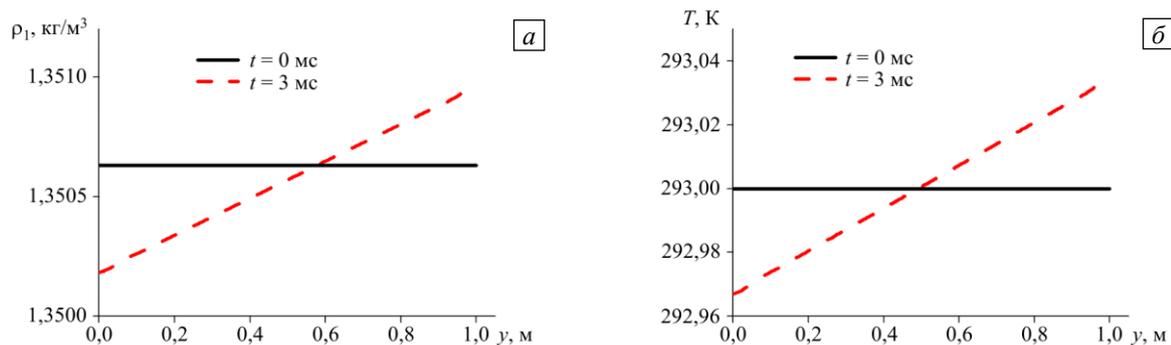


Рис. 4. Пространственное распределение плотности (а) и температуры (б) газа в процессе осаждения аэрозоля с объёмным содержанием дисперсной фазы $\alpha = 0,001$; диаметр частиц $d = 100$ мкм и физическая плотность материала частиц $\rho_{20} = 2500$ кг/м³

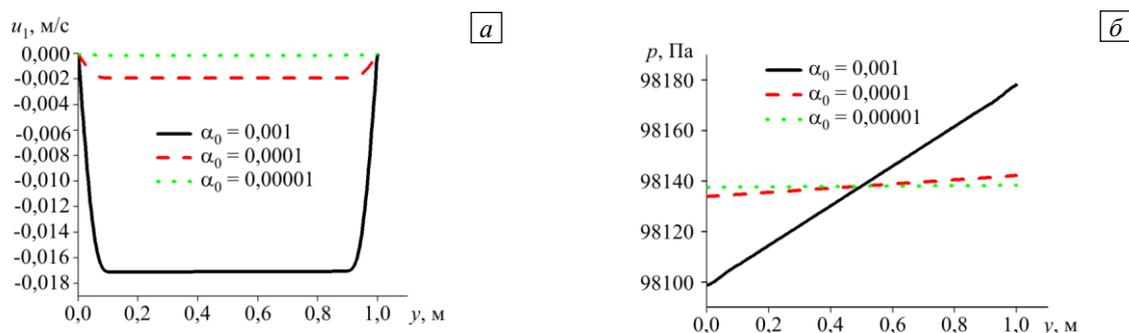


Рис. 5. Пространственное распределение скорости (а) и давления (б) газа для различных начальных объёмных содержаний дисперсной фазы в момент времени $t = 3$ мс; диаметр частиц $d = 100$ мкм и физическая плотность материала частиц $\rho_{20} = 2500$ кг/м³

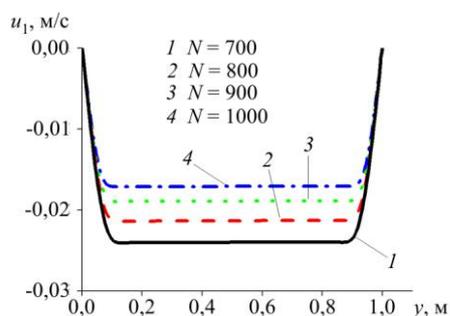


Рис. 6. Пространственное распределение скорости газа, полученное в момент времени $t = 3$ мс на расчётных сетках с различным числом узлов N : 1000 (кривая 1); 900 (2); 800 (3); 700 (4); диаметр частиц $d = 100$ мкм и физическая плотность материала частиц $\rho_{20} = 2500$ кг/м³

Установленные численно скорости и давления газовой компоненты смеси при гравитационном осаждении частиц в аэрозолях с различными начальными объёмными содержаниями дисперсной фазы представлены на рисунке 5. Различным начальным объёмным содержаниям дисперсной фазы α (0,001; 0,0001; 0,00001) (соответствуют следующие максимальные значения значения модуля скорости движения газа $|u_{1m}|$, м/с: $17 \cdot 10^{-3}$; $19 \cdot 10^{-4}$; 10^{-4} , и перепада давления Δp , Па: 79; 9; 1. Уменьшение начального объёмного содержания дисперсной фазы аэрозоля приводит к тому, что интенсивность течения газа при гравитационном осаждении дисперсной фазы снижается.

Также при моделировании гравитационного осаждения аэрозоля с фиксированными величинами объёмного содержания дисперсной фазы, диаметром частиц и физической плотности материала дисперсной фазы исследовалась сеточная сходимость при различных равномерных разбиениях расчётной области. Для сетки с количеством узлов $N = 700; 800; 900; 1000$, максимальные значения скоростей газа $|u_1|$, соответственно, составляют (в м/с): 0,024; 0,021; 0,0185; 0,017. Таким образом, при расчётах на последовательности измельчающихся сеток отличие в значении максимальной величины скорости газа уменьшается (см. Рис. 6).

Рассмотрим влияние параметров дисперсной фазы аэрозоля на интенсивность течения газа, формирующегося при осаждении твёрдой фазы смеси. При одинаковой плотности материала частиц скорость осаждения, согласно формуле (7), пропорциональна квадрату диаметра осаждающейся частицы. Следовательно, более крупные частицы при одинаковой начальной концентрации и плотности частиц разгоняются до больших скоростей и генерируют более интенсивное течение газа (Рис. 7а).

Так, максимальные значения скорости потока газа составляют, соответственно, 0,01 и 0,017 м/с для частиц с дисперсностью 60 и 100 мкм. Перепад давления в ёмкости с осаждающимся аэрозолем также увеличивается при осаждении более крупных частиц (Рис. 7б). При этом следует учитывать, что при сферической форме частиц кратное уменьшение размера частицы приводит к трёхкратному увеличению количества частиц и двукратному уменьшению площади одной частицы. Таким образом, кратное уменьшение размера частиц приводит к кратному увеличению площади взаимодействия газа и дисперсной фазы. В результате интенсивность межфазного взаимодействия для более мелких частиц играет более существенную роль, чем для крупных.

Согласно выражению (7), скорость стокового осаждения дисперсной компоненты газозвеси линейно зависит от плотности осаждающихся дисперсных включений. При этом площадь поверхности взаимодействия компонент смеси обуславливается линейным размером частиц. При одинаковых размерах дисперсных включений частицы, имеющие большую плотность материала, обладают большей скоростью осаждения. За счёт этого происходит увеличение как скорости течения газа, так и интенсивности перепада давления в ёмкости с осаждающимся аэрозолем (Рис. 8).

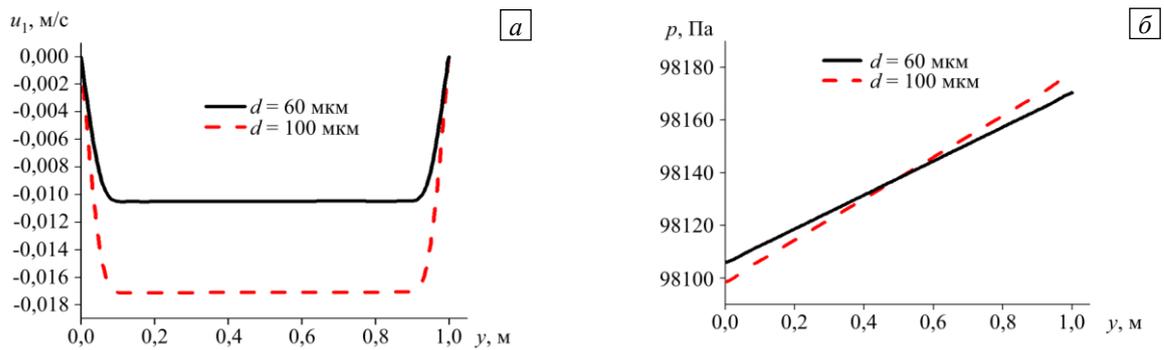


Рис. 7. Пространственные распределение скорости (а) и давления (б) газа, полученные в момент времени $t = 3$ мс; для частиц с физической плотностью материала $\rho_{20} = 2500$ кг/м³ и объёмным содержанием дисперсной фазы $\alpha = 0,001$

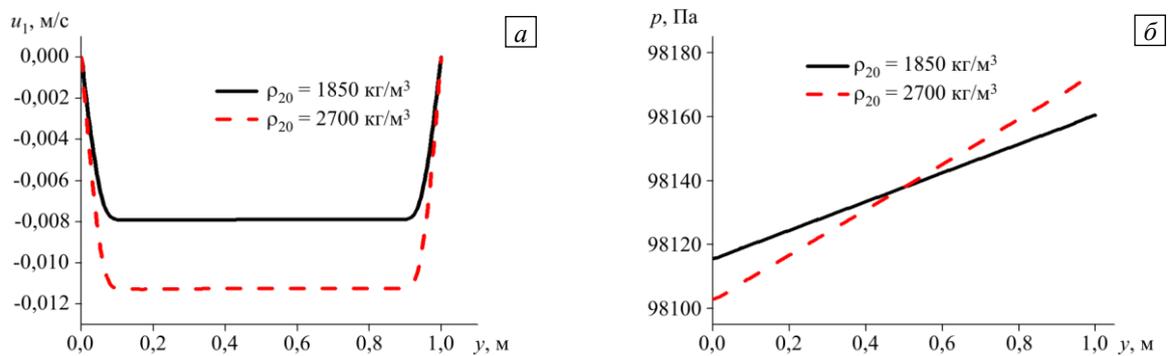


Рис. 8. Пространственные распределение скорости (а) и давления (б) газа, полученные в момент времени $t = 3$ мс для частиц диаметром $d = 60$ мкм и объёмным содержанием дисперсной фазы $\alpha = 0,001$

4. Заключение

В работе численно моделировался процесс генерации течения газа, являющегося несущей для аэрозоля средой, при гравитационном осаждении частиц аэрозоля в закрытой ёмкости. Выявлено, что при одинаковом размере и плотности частиц интенсивность течения, возникающего в газе вследствие осаждения дисперсной фазы смеси, зависит от объёмного содержания частиц дисперсной фазы. Также результаты численных расчётов показали, что интенсивность течения газа зависит от плотности материала и дисперсности осаждающихся частиц. За счёт большей скорости осаждения частицы, имеющие более крупный размер и большую плотность материала, возбуждают в несущей среде более интенсивное течение.

Литература

1. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
2. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами / Под ред. Л.Е. Стернина. М.: Машиностроение, 1980. 176 с.
3. Ходаков Г.С., Юдкин Ю.П. Седиментационный анализ высокодисперсных систем. М.: Химия, 1981. 192 с.

4. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. СПб.: Недра, 2003. 284 с.
5. Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Волновые процессы в газозвесах частиц металлов. Новосибирск: Параллель, 2015. 301 с.
6. Беляев П.Е., Клиначева Н.Л. Влияние экранирующего слоя газозвеси на силовое воздействие ударной волны на жёсткую стенку // Вестник ЮУрГУ. Математика. Механика. Физика. 2016. Т. 8, № 4. С. 49-55. <https://doi.org/10.14529/mmph160406>
7. Веревкин А.А., Циркунов Ю.М. Течение дисперсной примеси в сопле Лаваля и рабочей секции двухфазной гиперзвуковой ударной трубы // ПМТФ. 2008. Т. 49, № 5. С. 102-113. (English version <https://doi.org/10.1007/s10808-008-0099-y>)
8. Вараксин А.Ю., Протасов М.В., Яценко В.П. Анализ механизмов осаждения твердых частиц на стенки каналов // ТВТ. 2013. Т. 51, № 5. С. 738-746. <https://doi.org/10.7868/S0040364413050219>
9. Глазунов А.А., Дьяченко Н.Н., Дьяченко Л.И. Численное исследование течения ультрадисперсных частиц оксида алюминия в сопле ракетного двигателя твердого топлива // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 1. С. 81-88. (English version <https://doi.org/10.1134/S0869864313010071>)
10. Степкина М.Ю., Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Скорости осаждения мелкодисперсных аэрозолей в акустическом и электрическом поле // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 3. С. 62-68.
11. Крупнова Т.В., Саркулов М.К., Уманский А.А., Тутукин А.В. Экспериментальные исследования параметров и константы осаждения аэрозолей свинца // Инновации в атомной энергетике: сб. докл. конф. молодых специалистов. Москва, 1-3 октября 2019 г. М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2019. С. 326-330.
12. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р. Экспериментальное исследование осаждения аэрозолей в частично заполненной открытой трубе в резонансном режиме // Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВСМПС'2019). Алушта, Крым, 24-31 мая 2019. М.: Изд-во МАИ, 2019. С. 452-453.
13. Лисаков С.А., Сидоренко А.И., Сытин Е.В. Моделирование запыленности в тупиковой выработке угольной шахты // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 4-1(28). С. 200-213.
14. Кузьмин А.А., Кузьмина Т.А., Пермьяков А.А. Осаждение аэрозолей в каналах систем противодымной вентиляции // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 3(51). С. 90-95.
15. Никифоров А.И., Садовников Р.В., Никифоров Г.А. О переносе дисперсных частиц двухфазным фильтрационным потоком // Вычисл. мех. сплош. сред. 2013. Т. 6, № 1. С. 47-53. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.1.6>
16. Невский Ю.А., Осипцов А.Н. Моделирование гравитационной конвекции суспензий // ПЖТФ. 2009. Т. 35, № 7. С. 98-105. (English version <https://doi.org/10.1134/S1063785009040154>)
17. Тукмаков Д.А. Numerical study of polydisperse aerosol dynamics with the drops destruction // Lobachevskii J. Math. 2019. Vol. 40. P. 824-827. <https://doi.org/10.1134/S1995080219060234>
18. Тукмаков Д.А. Численное моделирование ударно-волновых течений в газозвеси с неоднородной концентрацией дисперсной фазы // Изв. вузов. Авиационная техника. 2019. № 1. С. 54-59. (English version <https://doi.org/10.3103/S1068799819010082>)
19. Губайдуллин Д.А., Тукмаков Д.А. Численное исследование влияния дробления дисперсной фазы на процесс распространения ударной волны из чистого газа в аэрозоль // ТВТ. 2019. Т. 57, № 6. С. 909-913. <https://doi.org/10.1134/S0040364419060097>
20. Тукмаков Д.А. Численное исследование скоростного скольжения фаз при прохождении ударной волны малой интенсивности из чистого газа в запылённую среду // Многофазные системы. 2019. Т. 14, № 2. С. 125-131. <https://doi.org/10.21662/mfs2019.2.017>
21. Тукмаков Д.А. Теоретическое исследование релаксации интенсивности скачка давления на фронте ударной волны в газозвеси // ФиППТиТ. 2019. № 3. С. 3-11.
22. Fletcher C.A.J. Computation techniques for fluid dynamics. Springer, 1988. 502 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-97071-9>
23. Тукмаков А.Л. Численное моделирование акустических течений при резонансных колебаниях газа в закрытой трубе // Изв. вузов. Авиационная техника. 2006. № 4. С. 33-36.
24. Музафаров И.Ф., Утужников С.В. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа // Матем. моделирование. 1993. Т. 5, № 3. С. 74-83.

References

1. Nigmatulin R.I. *Osnovy mekhaniki geterogennykh sred* [Fundamentals of the mechanics of heterogeneous media]. Moscow, Nauka, 1978. 336 p.
2. Sternin L.E. (ed.) *Dvukhfaznyye mono- i polidispersnyye techeniya gaza s chastitsami* [Two-phase mono- and polydisperse gas flows with particles]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1980. 176 p.
3. Khodakov G.S., Yudkin Yu.P. *Sedimentatsionnyy analiz vysokodispersnykh sistem* [Sedimentation analysis of highly dispersed systems]. Moscow, Khimiya, 1981. 192 p.
4. Kutushev A.G. *Matematicheskoye modelirovaniye volnovykh protsessov v aerodispersnykh i poroshkoobraznykh sredakh* [Mathematical modeling of wave processes in aerodispersed and powdery media] St. Petersburg, Nedra, 2003. 284 p.
5. Fedorov A.V., Fomin V.M., Khmel' T.A. *Volnovyye protsessy v gazozvesyakh chastits metallov* [Wave processes in gas-suspended particles of metals]. Novosibirsk, Parallel', 2015. 301 p.
6. Belyaev P.E., Klinacheva N.L. Impact of gas suspension shielding layer on the force effect of shock waves on a rigid wall. *Vestnik YuUrGU. Matematika. Mekhanika. Fizika – Bulletin of the South Ural State University. Mathematics. Mechanics. Physics*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 49-55. <https://doi.org/10.14529/mmph160406>

7. Verevkin A.A., Tsirkunov Yu.M. Flow of a dispersed phase in the Laval nozzle and in the test section of a two-phase hypersonic shock tunnel. *J. Appl. Mech. Tech. Phy.*, 2008, vol. 49, pp. 789-798. <https://doi.org/10.1007/s10808-008-0099-y>
8. Varaksin A.Yu., Protasov M.V., Yatsenko V.P. Analysis of the deposition processes of solid particles onto channel walls. *High Temp.*, 2013, vol. 51, pp. 665-672. <https://doi.org/10.1134/S0018151X13050210>
9. Glazunov A.A., Dyachenko N.N., Dyachenko L.I. *Numerical investigation of the flow of ultradisperse particles of the aluminum oxide in the solid-fuel rocket engine nozzle*. *Thermophys. Aeromech.*, 2013, vol. 20, pp. 79-86. <https://doi.org/10.1134/S0869864313010071>
10. Stepkina M.Yu., Kudryashova O.B., Antonnikova A.A. Sedimentation rates of fine aerosols in acoustic and electric field. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 62-68.
11. Krupnova T.V., Sarkulov M.K., Umanskiy A.A., Tutukin A.V. *Innovations in nuclear energy, Moscow, 1-3 Oktober 2019. Moscow, Izd-vo AO «NIKIET», 2019, pp. 326-330.*
12. Gubaydullin D.A., Zaripov R.G., Tkachenko L.A., Shaydullin L.R. *Proc. of the XXI International conference on computational mechanics and modern applied software systems (CMMASS'2019). Alushta, Crimea, 24-31 May, 2019. Moscow, Izd-vo MAI, 2019, pp. 452-453.*
13. Lisakov S.A., Sidorenko A.I., Sypin E.V. Simulation of dustiness in the blind drift of coal mine. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik – South-Siberian Scientific Bulletin*, 2019, no. 4-1(28), pp. 200-213.
14. Kuzmin A.A., Kuzmina T.A., Permyakov A.A. Aerosols deposition in smoke ventilation systems channels. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere – Problems of risk management in the technosphere*, 2019, no. 3(51), pp. 90-95.
15. Nikiforov A.I., Sadovnikov R.V., Nikiforov G.A. About transport of dispersed particles by a two-phase filtration flow. *Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 47-53. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.1.6>
16. Nevskii Yu.A., Osiptsov A.N. Modeling gravitational convection in suspensions. *Tech. Phys. Lett.*, 2009, vol. 35, pp. 340-343. <https://doi.org/10.1134/S1063785009040154>
17. Tukmakov D.A. Numerical study of polydisperse aerosol dynamics with the drops destruction. *Lobachevskii J. Math.*, 2019, vol. 40, pp. 824-827. <https://doi.org/10.1134/S1995080219060234>
18. Tukmakov D.A. Numerical simulation of shock-wave flows in a gas suspension with inhomogeneous concentration of the dispersed phase. *Russ. Aeronaut.*, 2019, vol. 62, pp. 59-65. <https://doi.org/10.3103/S1068799819010082>
19. Gubaidullin D.A., Tukmakov D.A. Numerical study of the influence of the breakup of dispersed phase on the distribution of a shock wave from pure gas into aerosol. *High Temp.*, 2019, vol. 57, pp. 899-903. <https://doi.org/10.1134/S0018151X19060099>
20. Tukmakov D.A. Numerical study of velocity slip of phases during the passage of a shock wave of low intensity from a pure gas to a dusty medium. *Mnogofaznyye sistemy – Multiphase Systems*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 125-131. <https://doi.org/10.21662/mfs2019.2.017>
21. Tukmakov D.A. Theoretical study of relaxation of the intensity of a pressure jump at the front of a shock wave in a gas suspension. *FiPPTIT – Fundamental and Applied Problems of Technics and technology*, 2019, no. 3, pp.3-11.
22. Fletcher C.A.J. *Computation techniques for fluid dynamics*. Springer, 1988. 502 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-97071-9>
23. Tukmakov A.L. Numerical simulation of acoustic flows at resonance gas oscillations in a closed tube. *Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika – Russ. Aeronaut.*, 2006, no. 4, pp. 33-36.
24. Muzafarov I.F., Utyuzhnikov S.V. *Primeneniye kompaktnykh raznostnykh skhem k issledovaniyu nestatsionarnykh techeniy szhimayemogo gaza [Application of compact difference schemes to the study of unsteady flows of a compressible gas]*. *Matem. modelirovaniye*, 1993, vol. 5, no. 3, pp. 74-83.

Поступила в редакцию 10.06.2020; после доработки 09.07.2020; принята к опубликованию 20.07.2020