



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 90–102

Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 90–102

<https://mmi.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-1-90-102>

Научная статья

УДК 514.86+533+537

Численное исследование влияния параметров дисперсных частиц на осаждение твердой фазы электрически заряженной полидисперсной газозвеси

А. Л. Тукмаков, Д. А. Тукмаков[✉]

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Россия, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

Тукмаков Алексей Львович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, tukmakov@imm.knc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8570-4140>

Тукмаков Дмитрий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, tukmakovda@imm.knc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0335-8548>

Аннотация. Работа посвящена исследованию закономерностей осаждения частиц дисперсной фазы электрически заряженной запыленной среды, движущейся в канале, на пластину-электрод. Целью исследования является выявление влияния размера дисперсных включений и плотности материала частиц на процесс оседания фракций полидисперсной газозвеси на поверхности пластины-электрода. При моделировании динамики газозвеси применялась математическая модель движения многоскоростной и многотемпературной полидисперсной двухфазной среды, учитывающая межфазное силовое взаимодействие и межфазный теплообмен. При описании силового взаимодействия учитывалась сила Стокса. Математическая модель динамики двухфазной среды дополнялась граничными условиями. Система уравнений решалась явным конечно-разностным методом Мак-Кормака, имеющим второй порядок точности. Для получения монотонного численного решения применялась схема коррекции сеточной функции. Для потенциала электрического поля на боковых поверхностях определялись значения потенциала, на открытых концах канала для потенциала электрического поля предполагались однородные граничные условия Неймана. В работе рассматривались газозвеси, дисперсная фаза которых содержит три фракции. При одинаковом размере фракции газозвеси отличались плотностью материала частиц фракций. При одинаковой плотности материала частиц фракции твердой фазы газозвеси имели различный размер дисперсных включений. В результате численного моделирования было выявлено, каким образом плотность материала дисперсной фазы и размер частиц оказывают влияние на процесс осаждения фракций дисперсной фазы двухкомпонентной смеси. Из расчетов следует, что при одинаковом размере частиц более интенсивно осаждаются частицы с большей плотностью материала, а при одинаковой плотности материала частиц более интенсивно осаждаются частицы с большим линейным размером.

Ключевые слова: численное моделирование, газозвесь, вязкий газ, электрическое поле

Благодарности: Математическая модель динамики электрически заряженного аэрозоля в канале разработана в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН, расчеты влияния свойств дисперсной фазы на осаждение аэрозоля в канале выполнены при поддержке гранта Президента РФ № МК-297.2020.1.

Для цитирования: Тукмаков А. Л., Тукмаков Д. А. Численное исследование влияния параметров дисперсных частиц на осаждение твердой фазы электрически заряженной полидисперсной газозвеси // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика.



Механика. Информатика. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 90–102. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-1-90-102>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

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

A. L. Tukmakov, D. A. Tukmakov✉

Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, 2/31 Lobachevsky St., Kazan 420111, Russia

Aleksey L. Tukmakov, tukmakov@imm.knc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8570-4140>

Dmytry A. Tukmakov, tukmakovda@imm.knc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0335-8548>

Abstract. The work is devoted to the study of the laws governing the deposition of particles of the dispersed phase of an electrically charged dusty medium moving in a channel onto an electrode plate. The aim of the study is to reveal the influence of the size of dispersed inclusions and the density of the material of particles on the process of settling of fractions of a polydisperse gas suspension on the surface of the electrode plate. When modeling the dynamics of a gas suspension, a mathematical model of the motion of a multi-speed and multi-temperature polydisperse two-phase medium was used, taking into account the interphase force interaction and interphase heat transfer. When describing the force interaction, the Stokes force was taken into account. The mathematical model of the dynamics of a two-phase medium was supplemented with boundary conditions. The system of equations was solved by the McCormack explicit finite-difference method having the second order of accuracy. To obtain a monotonic numerical solution, a grid function correction scheme was applied. For the potential of the electric field on the lateral surfaces, the values of the potential were determined; at the open ends of the channel for the potential of the electric field, uniform Neumann boundary conditions were assumed. The paper considered gas suspension, the dispersed phase of which contains three fractions. At the same size, the gas suspension fractions differed in the material density of the particles of the fractions. At the same density of the material of particles, the fractions of the solid phase of the gas suspension had different sizes of dispersed inclusions. As a result of numerical modeling, it was revealed how the density of the material of the dispersed phase and the size of the particles affect the process of precipitation of fractions of the dispersed phase of the two-component mixture. From calculations it follows that with the same particle size, particles with a higher density of the material are deposited more intensively, and with the same density of the particle material, particles with a large linear size are deposited more intensively.

Keywords: numerical simulation, gas suspension, viscous gas, electric field

Acknowledgements: The mathematical model of the dynamics of an electrically charged aerosol in the channel was developed within the framework of the state assignment of the FRC KazanSC of RAS, calculations of the effect of the properties of the dispersed phase on the deposition of aerosol in the channel were carried out at the expense of the grant of the President of the Russian Federation No. МК-297.2020.1.

For citation: 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. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 90–102 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-1-90-102>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Одним из разделов современной механики жидкости и газа является механика неоднородных сред. В случае если компоненты таких сред имеют различное агрегатное состояние, то такие среды называют многофазными [1–24]. В ряде приложений, таких как напыление на поверхности покрытий, а также очистка промышленных выбросов, возникает необходимость исследования динамики дисперсных потоков, движущихся как под действием аэродинамических сил, так и под влиянием сил электрической природы. Так как аэрозоли являются гетерогенными смесями — содержат компоненты с различными агрегатными состояниями, для моделирования таких процессов необходимо применение механики многофазных сред. Общая теория гидродинамики многофазных сред представлена в работе [1], монографии [2, 3] посвящены методике численного моделирования ударно-волновой динамики газозвесей. В статье [4] представлена математическая модель течения электрически заряженной запыленной среды, реализующая континуальный подход в моделировании многофазных сред [1]. Работа [5] посвящена сопоставлению аналитических расчетов динамики газозвеси с численными расчетами, проведенными на основе математической модели, учитывающей вязкость несущей среды. В работе [6] проводилось экспериментальное исследование массопереноса дисперсной компоненты пылевой плазмы применительно к напылению покрытий на поверхности. В статье [7] осуществлено численное моделирование динамики нестационарных течений пылевой плазмы без учета влияния вязкости несущей среды. В работе [8] исследовано влияние нелинейностей теплофизических параметров и фазовых переходов плавления и испарения на электрические и тепловые процессы при нагреве металлического электрода сильноточным импульсом. В работе [9] исследована динамика пылевых взвесей в горных выработках и разработана математическая модель процесса пылеподавления. В публикации [10] теоретически и экспериментально исследовано улавливание мелкодисперсных аэрозолей волокнистыми фильтрами, выявлено, что при повышении скорости потока процесс улавливания дисперсных частиц волокнистыми фильтрами существенно ухудшается. Статья [11] посвящена усовершенствованию технологии электрических фильтров, очищающих газы от выбросов промышленных предприятий от дисперсных примесей. В статье [12] проводится сопоставление экспериментального исследования и численных расчетов течения запыленной электрически заряженной двухфазной среды в канале без учета взаимного силового влияния компонент смеси. В работе [13] экспериментально исследовано формирование самосогласованных структур в пылевой плазме. В статье [14] получено точное решение для стационарной одномерной модели динамики пузырьковых сред. В работе [15] представлен обзор теоретических и экспериментальных работ по изучению влияния дисперсных частиц на динамику газа. Данная работа посвящена выявлению закономерностей осаждения фракций полидисперсной газозвеси, движущейся в канале, на пластину, к которой приложен электрический потенциал.



1. Математическая модель

Предполагается что дисперсная фаза газозвеси состоит из нескольких фракций, отличающихся плотностью и теплоемкостью материала, а также размером частиц. Для каждой из компонент смеси решалась система уравнений, включавшая в себя уравнения неразрывности (1), уравнения сохранения компонент импульса газа (2) и импульса фракций дисперсной фазы (3), уравнения сохранения полной энергии газа (4) и уравнения сохранения тепловой энергии фракций дисперсной фазы (5) [4,25–29]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial y} = 0 \quad (i = 1 \dots n), \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_1 V_1^k)}{\partial t} + \nabla^i (\rho_1 V_1^k V_1^i + \delta_{ik} p - \tau_{ik}) = - \sum_{j=2}^n F_{jk} + \sum_{j=2}^n \alpha_j \nabla^k p \quad (i, k = 1, 2), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_j V_j^k)}{\partial t} + \nabla^i (\rho_j V_j^k V_j^i) = F_{jk} - \alpha_j \nabla^k p \quad (j = 2, \dots, n, \quad i, k = 1, 2), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial e_1}{\partial t} + \nabla^i (V_1^i (e_1 + p - \tau_{ki}) - V_1 \tau_{ki} - \lambda \nabla^i T) = \\ & = - \sum_{j=2}^n Q_j - \sum_{j=2}^n |F_{jk}| (V_1^k - V_j^k) \left(\sum_{j=2}^n \alpha_j \right) (p V_1^k) \quad (j = 2, \dots, n, \quad i, k = 1, 2), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial e_j}{\partial t} + \nabla^k (e_j V_j^k) = Q_j \quad (j = 2, \dots, n, \quad i, k = 1, 2), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} p &= (\gamma - 1)(e_1 - \rho(u_1^2 + v_1^2)/2), \quad e_1 = \rho_1(I + (u_1^2 + v_1^2)/2), \\ \tau_{11} &= \mu \left(2 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} - \frac{2}{3} D \right), \quad \tau_{22} = \mu \left(2 \frac{\partial v_1}{\partial x_2} - \frac{2}{3} D \right), \quad \tau_{12} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right), \\ D &= \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_1}{\partial x_2} \right), \quad \rho_j = \alpha_j \rho_{j0}, \quad e_j = \rho_j C_{pj} T_j. \end{aligned}$$

Математическая модель позволяет моделировать электрическое поле, генерируемое как электрическим зарядом фракций дисперсной компоненты газозвеси, так и внешними потенциалами, приложенными к моделируемой области [25–28, 30]. Несущая среда описывалась как вязкий, сжимаемый, теплопроводный газ [31]. Модель полидисперсной газозвеси учитывает тепловое и силовое взаимодействие газа и фракций дисперсной фазы. В уравнениях применяются следующие обозначения: ρ_j — плотности (для несущей среды плотность газа, а для фракций дисперсной фазы «средние плотности»), u_j, v_j — составляющие векторов скорости V_j , e_j и T_j энергия и температура компонент смеси. Индекс «1» относится к физическим величинам несущей среды (газа), индекс « j » ($j > 1$) — к физическим величинам фракций дисперсной компоненты смеси. Здесь λ, μ, γ — коэффициенты теплопроводности, вязкости и постоянная адиабаты для несущей газообразной среды, $I = RT_1/(\gamma - 1)$ — внутренняя энергия несущей среды (R — газовая постоянная), $\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{22}$ — составляющие тензора вязких напряжений несущей среды. Составляющие вектора межфазного силового взаимодействия j -ой фракции $F_{x_{1j}}, F_{x_{2j}}$ и тепловой поток с поверхности j -ой фракции дисперсной фазы Q_j определяются законами межфазного взаимодействия.



Здесь α_j — объемное содержание; C_{pj} , ρ_{j0} — удельная теплоемкость и физическая плотность вещества твердых частиц j -ой фракции дисперсной фазы, r_j — радиус частиц j -ой фракции дисперсной фазы, предполагается, что все частицы имеют сферическую форму. Компоненты силового межфазного взаимодействия между газовой компонентой смеси и j -ой фракцией — F_{xj} и F_{yj} — определяются следующим образом [1, 2]:

$$F_{x1j} = \frac{3\alpha}{8r_j} C_{dj} \rho_1 \sqrt{(u_1 - u_j)^2 + ((v_1 - v_j)^2 (u_1 - u_j) + F_{Ex1j}},$$

$$F_{x2j} = \frac{3\alpha}{8r_j} C_{dj} \rho \sqrt{(u_1 - u_j)^2 + ((v_1 - v_j)^2 (v_1 - v_j) + F_{Ex2j}}.$$

Межфазный теплообмен описывается выражением

$$Q_j = 6\alpha_j \lambda \text{Nu}_{1j} (T_1 - T_j) / (2r_j)^2.$$

Математические модели аэродинамики запыленных и газочапельных сред представлены в работе [2]. Силовое взаимодействие компонент смеси задается коэффициентом сопротивления C_{dj} . Тепловое и силовое взаимодействие составляющих газозвеси определяются [2] относительным числом Маха M_{1j} , относительным числом Рейнольдса Re_{1j} , относительным числом Нуссельта Nu_{1j} и числом Прандтля Pr_1 :

$$C_{dj} = C_{dj}^0 \phi(M_{1j}) \eta(\alpha_j), \quad C_{dj}^0 = \frac{24}{\text{Re}_{1j}} + \frac{4}{\text{Re}_{1j}^{0.5}} + 0.4,$$

$$\phi(M_{1j}) = 1 + \exp\left(-\frac{0.427}{M_{1j}^{0.63}}\right), \quad \eta(\alpha_j) = (1 - \alpha_j)^{-2.5},$$

$$\text{Re}_{1j} = r_j \rho_1 |V_1 - V_j| / \mu, \quad M_{1j} = |V_1 - V_j|, \quad \text{Pr}_1 = c_{p1} \mu (\lambda)^{-1},$$

$$\text{Nu}_{1j} = 2 \exp(-M_{1j}) + 0.459 \text{Re}_{1j}^{0.55} \text{Pr}_1^{0.33},$$

$V_j = [u_j, v_j]$, $j = 1, n$ — векторы скоростей несущей среды и фракций дисперсной компоненты. Для скорости несущей среды задавались однородные граничные условия Неймана в начале канала и на выходе из канала, а также однородные граничные условия Дирихле на стенках канала. Для составляющих скорости фракций твердой компоненты смеси на входе и выходе из канала задавались однородные граничные условия Неймана. На верхней (к верхней стенке приложен положительный потенциал) поверхности канала для вертикальных составляющих скоростей фракций дисперсной фазы ставились однородные граничные условия Дирихле, на нижней поверхности канала для вертикальных составляющих скоростей фракций дисперсной фазы применялись однородные граничные условия Неймана на нижней стенке канала. Такая постановка граничных условий для вертикальных составляющих скоростей фракций дисперсной фазы позволяет описать поглощение пластиной-электродом частиц газозвеси. Для всех продольных составляющих скорости фракций дисперсной фазы на боковых поверхностях задавались однородные граничные условия Дирихле. Для остальных искомым функций на всех границах ставились однородные граничные условия Неймана. На входе в канал задавались начальные объемные содержания фракций втекающей в канал дисперсной фазы. Система уравнений динамики двухкомпонентной смеси решалась явным конечно-разностным методом Мак-Кормака [31]



второго порядка точности с применением схемы нелинейной коррекции сеточной функции [32, 33].

Составляющие силы Кулона, действующие на единицу объема j -ой фракции дисперсной фазы, определяются через ее удельный заряд, среднюю плотность фракции твердой компоненты смеси и напряженность электрического поля [4, 30]:

$$F_{Ex1j} = -\alpha_j \rho_{j0} q_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x_1}, \quad F_{Ex2j} = -\alpha_j \rho_{j0} q_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x_2}.$$

Потенциал электрического поля в расчетной области определяется из решения уравнения Пуассона [30]:

$$\Delta \varphi = - \sum_{j=2}^n \frac{\rho_j q_0}{\epsilon_0}, \tag{6}$$

где q_0 — удельный заряд единицы массы твердой компоненты смеси, φ — потенциал электрического поля, ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха. Уравнение Пуассона, описывающее потенциал электрического поля, решалось методом конечных разностей с помощью итерационной схемы метода установления [34] на газодинамической расчетной сетке. Данная постановка численных расчетов вызвана необходимостью определения значения потенциала электрического поля при вычислении сил межфазного взаимодействия при описании динамики дисперсной и несущей компонент смеси, а также необходимостью вычисления значений средней плотности дисперсной фазы в узлах при решении уравнения Пуассона. Для потенциала электрического поля задавались однородные граничные условия Неймана на всех границах, кроме пластин-электродов, на которых задавались значения потенциалов.

2. Результаты расчетов

На рис. 1 схематично изображен канал с текущей по нему газозвесью, к стенкам канала приложены потенциалы различных знаков. Общая протяженность канала составляет $L = 1$ м. Высота канала $h = 0.1$ м. В работе предполагалось, что к нижней стенке канала приложен отрицательный потенциал — $\varphi_1 = -25000$ В, а к верхней стенке положительный потенциал — $\varphi_2 = 25000$ В: пространственное распределение потенциала электрического поля изображено на рис. 2.

Удельный массовый заряд дисперсной фазы составляет $q_0 = 10^{-3}$ Кл/кг. Общее объемное содержание дисперсной фазы $\alpha = \sum_{j=2}^n \alpha_j = 99 \cdot 10^{-6}$. В расчетах предполагалось, что $\alpha_2 = \dots = \alpha_4 = 0.00033$. Скорость втекающего в канал двухфазного потока

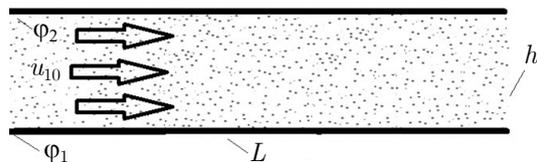


Рис. 1. Схематичное изображение канала с текущей по нему запыленной средой
Fig. 1. Schematic image of the channel with the dusty medium flowing through it

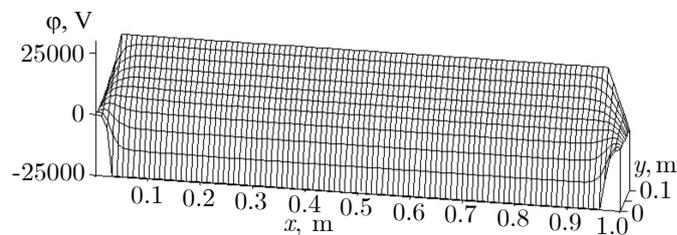


Рис. 2. Пространственное распределение потенциала электрического поля
Fig. 2. Spatial distribution of the electric field potential

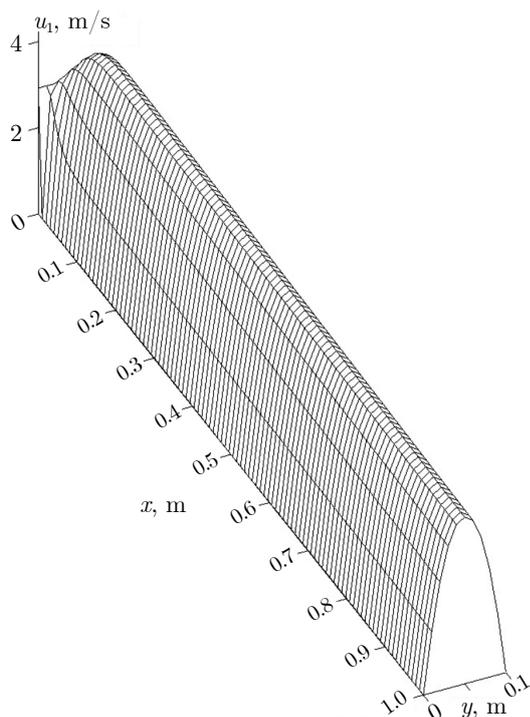


Рис. 3. Пространственное распределение продольной составляющей скорости газа в канале
Fig. 3. Spatial distribution of the longitudinal component of the gas velocity in the channel

вызванное осаждением частиц на пластину-электрод (рис. 5, а). Уменьшение объемного содержания фракций дисперсной фазы газозвеси вблизи нижней стенки канала происходит пропорционально размеру частиц. Временные зависимости объема осажденных на нижней стенке канала частиц для различных фракций дисперсной

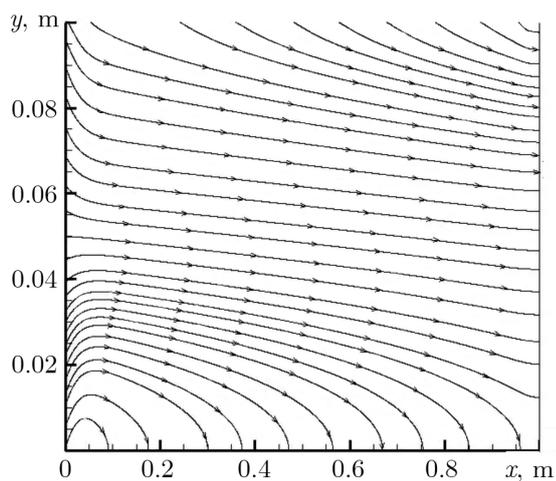


Рис. 4. Линии тока скорости фракции дисперсной компоненты смеси ($\rho_{30} = 1850 \text{ кг/м}^3$, $d = 4 \text{ мкм}$), $t = 51 \text{ мс}$

Fig. 4. Streamlines of the velocity of the fraction of the dispersed component of the mixture ($\rho_{30} = 1850 \text{ кг/м}^3$, $d = 4 \text{ мкм}$), $t = 51 \text{ мс}$

составляла $u_{10} = 4 \text{ м/с}$. Полученное численными расчетами пространственное распределение продольной составляющей скорости несущей среды представлено на рис. 3. Наибольшего значения продольная составляющая скорости газа u_1 достигает на оси симметрии канала. Распределение линий тока скорости одной из фракций дисперсной компоненты смеси (с размером частиц $d = 4 \text{ мкм}$ и плотностью материала фракции $\rho_{30} = 1850 \text{ кг/м}^3$) демонстрирует, что вблизи нижней поверхности канала скорость частиц направлена на пластину-электрод (рис. 4). На рис. 5, а, б изображены результаты численных расчетов осаждения на пластину фракций полидисперсной твердой фазы запыленной среды с одинаковой физической плотностью материала фракций и различными размерами частиц. Вблизи нижней стенки канала наблюдается уменьшение объемного содержания фракций относительно начальных объемных содержаний на входе в канал ($\alpha_{i0} = 0.00033$; $i = 2, 3, 4$), вызванное осаждением частиц на пластину-электрод (рис. 5, а). Уменьшение объемного содержания фракций дисперсной фазы газозвеси вблизи нижней стенки канала происходит пропорционально размеру частиц. Временные зависимости объема осажденных на нижней стенке канала частиц для различных фракций дисперсной фазы демонстрируют увеличение интенсивности осаждения при увеличении размера частиц (рис. 5, б).

Выявленные закономерности можно объяснить тем, что увеличение размера частиц дисперсной фракции приводит к увеличению площади соприкосновения частицы и газа в квадратичной пропорции, тогда как масса частицы увеличивается в кубической пропорции. В моделируемом процессе сила Кулона, приложенная к частице, пропорциональна массе частицы, т. е. увеличивается в кубической пропорции при увеличении размера частицы.

Рассмотрим влияние плотности материала вещества электрически заряженной запыленной среды на процесс напыления фракций дисперсной фазы газозвеси на пластину-электрод (рис. 6, а, б).

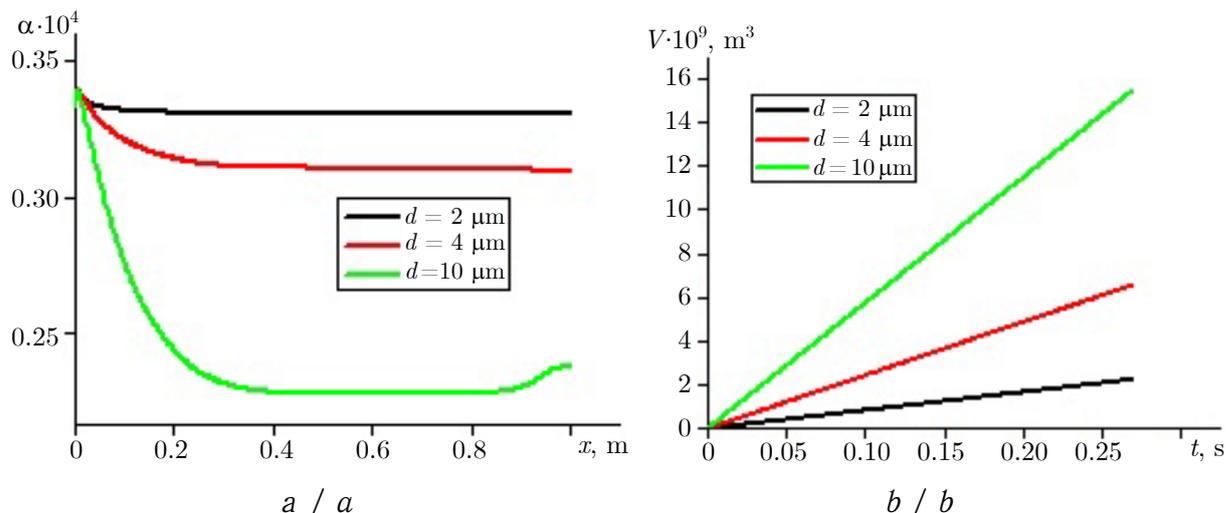


Рис. 5. Пространственное распределение объемного содержания фракций дисперсной фазы с плотностью материала $\rho_{i0} = 1850 \text{ кг/м}^3$, $i = 2, 3, 4$ вблизи нижней стенки ($y = 0.002 \text{ м}$, момент времени $t = 51 \text{ мс}$) (а). Временная зависимость объема фракций дисперсной фазы, осажденной на нижнюю стенку, (б) (цвет online)

Fig. 5. Spatial distribution of the volumetric content of the dispersed phase fractions with the material density $\rho_{i0} = 1850 \text{ кг/м}^3$, $i = 2, 3, 4$ near the lower channel wall ($y = 0.002 \text{ м}$, time point $t = 51 \text{ мс}$) (a). Temporal dependence of the volume of fractions of the dispersed phase deposited on the lower channel wall (b) (color online)

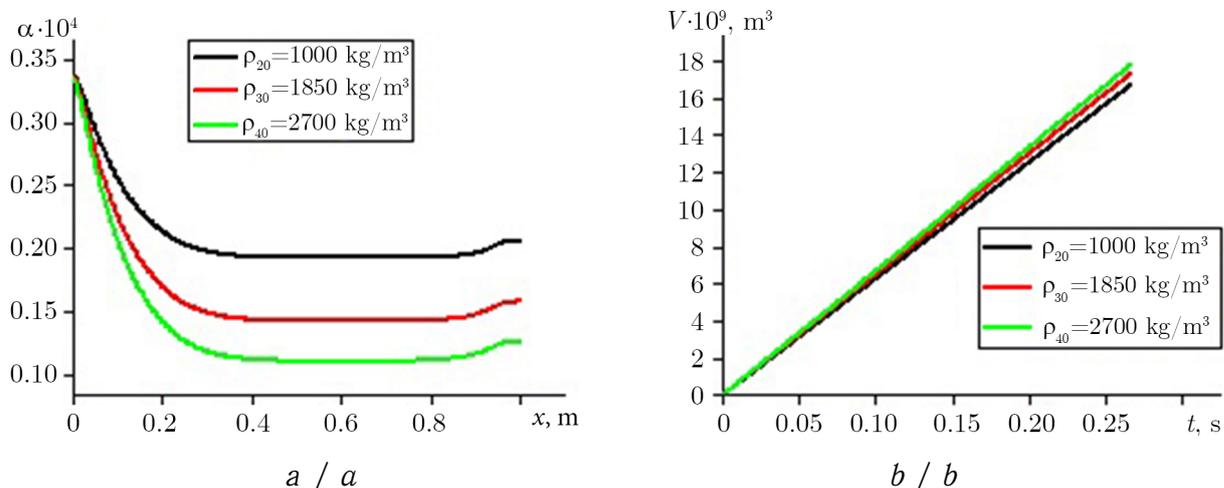


Рис. 6. Пространственное распределение объемного содержания фракций дисперсной фазы с диаметром частиц $d = 20 \text{ мкм}$ вблизи нижней стенки канала ($y = 0.002 \text{ м}$, момент времени $t = 51 \text{ мс}$) (а). Временная зависимость объема фракций дисперсной фазы с диаметром частиц $d = 20 \text{ мкм}$, осажденных на нижнюю стенку, (б) (цвет online)

Fig. 6. Spatial distribution of the volumetric content of dispersed phase fractions with a particle diameter $d = 20 \mu\text{м}$ near the lower channel wall ($y = 0.002 \text{ м}$, time $t = 51 \text{ мс}$) (a). Time dependence of the volume of dispersed phase fractions with a particle diameter $d = 20 \mu\text{м}$ deposited on the lower channel wall (b) (color online)



При одинаковом размере частиц ($d = 20$ мкм) фракции с более плотным материалом дисперсных включений имеют меньшее объемное содержание вблизи электрода ($y = 0.002$) (рис. 6, а). Фракции частиц с более плотным материалом имеют большую скорость напыления на поверхность нижней стенки канала (рис. 6, б). Выявленные особенности осаждения на поверхность пластины полидисперсной газозвеси связаны с тем, что при одинаковом размере частиц более плотные частицы имеют большую массу, по этой причине такие частицы испытывают большее воздействие силы Кулона при одинаковой площади взаимодействия с газом.

Выводы

В работе численно моделировался процесс осаждения на пластину-электрод электрически заряженной полидисперсной запыленной среды. Исследовано влияние плотности материала частиц и их размера на процесс осаждения фракций дисперсной фазы двухкомпонентной смеси. Частицы больших размеров осаждаются более интенсивно. При одинаковом размере частиц более интенсивно осаждаются частицы с большей плотностью материала. Мелкодисперсные частицы более подвержены воздействию аэродинамических сил, по этой причине сносятся потоком газа и осаждаются на пластину-электрод менее интенсивно, тогда как динамика крупнодисперсных частиц в большей степени определяется электрическим полем.

Список литературы

1. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. Москва : Наука, 1978. 336 с.
2. Кутушев А. Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. Санкт-Петербург : Недра, 2003. 284 с.
3. Федоров А. В., Фомин В. М., Хмель Т. А. Волновые процессы в газозвесах частиц металлов. Новосибирск : Параллель, 2015. 301 с.
4. Тукмаков А. Л. Численная модель электрогазодинамики аэродисперсной системы на основе уравнений движения двухскоростной двухтемпературной газозвеси // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 4. С. 112–120. <https://doi.org/10.15372/PMTF20150411>
5. Hayakawa H., Takada S., Garzo V. Kinetic theory of shear thickening for a moderately dense gas-solid suspension: From discontinuous thickening to continuous thickening // Physical Review E. 2017. Vol. 96, iss. 4. 042903. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.042903>
6. Зинченко С. П., Толмачёв Г. Н. О накоплении продуктов распыления сегнетоэлектрической мишени в плазме тлеющего высокочастотного разряда // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 53–56.
7. Дикалюк А. С., Суржигов С. Т. Численное моделирование разреженной пылевой плазмы в нормальном тлеющем разряде // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, вып. 5. С. 611–619.
8. Арутюнян Р. В. Математическое моделирование тепло- и электропереноса при воздействии сильнотоочного импульса на электрод // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2016. Т. 16, вып. 2. С. 138–144. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2016-16-2-138-144>
9. Косарев Н. П., Макаров В. Н., Угольников А. В., Макаров Н. В., Дылдин Г. П. Шахтная аэрология пылевых аэрозолей в условиях гидровихревой коагуляции // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. Вып. 4 (60). С. 155–165. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-4-155-165>
10. Кириш А. А., Макавеев П. Ю., Кириш В. А. Улавливание металлических аэрозольных наночастиц при высокой температуре // Коллоидный журнал. 2020. Т. 82, № 2. С. 163–170. <https://doi.org/10.31857/S0023291220020056>



11. *Балашов А. М.* Способ повышения эффективности электрофильтров для очистки выбросов предприятий металлургического комплекса // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 58-5. С. 88–91. <https://doi.org/10.18411/lj-02-2020-108>
12. *Tada 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.063>
13. *Jaiswal S., Hall T., LeBlanc S., Mukherjee R., Thomas E.* Effect of magnetic field on the phase transition in a dusty plasma // Physics of Plasmas. 2017. Vol. 24, iss. 11. 113703. <https://doi.org/10.1063/1.5003972>
14. *Шагапов В. Ш., Галимзянов М. Н., Агишева У. О.* Уединенные волны в газожидкостной пузырьковой смеси // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 232–240. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2020-20-2-232-240>
15. *Вараксин А. Ю.* Влияние частиц на турбулентность несущего потока газа // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, вып. 3. С. 441–466. <https://doi.org/10.7868/S0040364415030199>
16. *Ватузов Д. Н., Пуринг С. М.* Методика подбора и расчета аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. Т. 6, № 2 (23). С. 14–18. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2016.02.3>
17. *Мешалкина М. Н., Цветков В. А., Попов Б. И.* Обнаружение пожароопасной ситуации по контролю газовыделений и наночастиц аэрозолей // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2015. № 2 (14). С. 27–33.
18. *Кутушев А. Г., Родионов С. П.* Взаимодействие слабых ударных волн со слоем порошкообразной среды // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 3. С. 131–140.
19. *Харитонов В. П.* Динамика конвективных температурных волн в сплошной пористой среде // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2013. № 3. С. 3–11.
20. *Михайленко К. И., Кулешов В. С.* Математическое моделирование скоростной неравномерности потока газа за пористой преградой // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20, № 6. С. 46–58.
21. *Фомин В. М., Федоров А. В.* Развитие исследований по механике реагирующих гомогенных и гетерогенных сред в ИТПМ СО РАН // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 2. С. 92–101.
22. *Моисеева К. М., Крайнов А. Ю.* Влияние состава угольной пыли на скорость распространения фронта горения по аэрозвеси с неоднородным распределением частиц // Компьютерные исследования и моделирование. 2018. Т. 10, № 2. С. 221–230. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2018-10-2-221-230>
23. *Кривенко И. В., Смирнова М. А.* Моделирование воздействия электромагнитного излучения на природные аэрозоли // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2019. Т. 22, № 4. С. 64–79. <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2019.4.5>
24. *Дмитриев А. В., Дмитриева О. С., Мадышев И. Н.* Определение эффективности тепломассопереноса на контактной ступени струйно-пленочного устройства // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, № 3. С. 685–690.
25. *Тукмаков А. Л., Тукмаков Д. А.* Динамика заряженной газозвеси с начальным пространственно неравномерным распределением средней плотности дисперсной фазы при переходе к равновесному состоянию // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55, вып. 4. С. 509–512. <https://doi.org/10.7868/S004036441703022X>
26. *Тукмаков А. Л., Тукмаков Д. А.* Генерация акустического возмущения движущейся заряженной газозвесью // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91, № 5. С. 1207–1213.
27. *Тукмаков А. Л., Кашапов Н. Ф., Тукмаков Д. А., Фазльяхматов М. Г.* Процесс осаждения заряженной полидисперсной газозвеси на поверхность пластины в элек-



- трическом поле // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56, вып. 4. С. 498–502. <https://doi.org/10.31857/S000523100002724-0>
28. Тукмаков Д. А. Численное моделирование колебаний электрически заряженной гетерогенной среды, обусловленных межкомпонентным взаимодействием // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2019. Т. 27, № 3. С. 73–85. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2019-27-3-73-85>
29. Тукмаков Д. А. Численное исследование влияния свойств газовой составляющей взвеси твердых частиц на разлет сжатого объема газовой взвеси в двухкомпонентной среде // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93, № 2. С. 304–310.
30. Сальянов Ф. А. Основы физики низкотемпературной плазмы, плазменных аппаратов и технологий. Москва : Наука, 1997. 240 с.
31. Fletcher C. A. Computation Techniques for Fluid Dynamics. Berlin etc. : Springer-Verlang, 1988. 502 p.
32. Тукмаков А. Л. Численное моделирование процесса волновой сепарации твердых частиц при резонансных колебаниях газа в закрытой трубе // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 3. С. 342–349.
33. Музафаров И. Ф., Утюжников С. В. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа // Математическое моделирование. 1993. Т. 5, № 3. С. 74–83.
34. Крылов В. И., Бобков В. В., Монастырский П. И. Вычислительные методы : в 2 т. Москва : Наука, 1977. Т. 2. 401 с.

References

1. Nigmatulin R. I. *Osnovy mekhaniki geterogennykh sred* [Fundamentals of the Mechanics of Heterogeneous Media]. Moscow, Nauka, 1978. 336 p. (in Russian).
2. Kutushev A. G. *Matematicheskoe modelirovanie volnovykh protsessov v aerodispersnykh i poroshkoobraznykh sredakh* [Mathematical Modeling of Wave Processes in Aerodispersed and Powdery Media]. St. Petersburg, Nedra, 2003. 284 p. (in Russian).
3. Fedorov A. V., Fomin V. M., Khmel T. A. *Volnovye protsessy v gazovzvesyakh chastits metallov* [Wave Processes in Gas-suspension of Metal Particles]. Novosibirsk, Parallel', 2015. 301 p. (in Russian).
4. Tukmakov A. L. Numerical model of the electro-gas-dynamics of a gas–particle system based on the equations of motion of a two-velocity two-temperature gas–particle mixture. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, vol. 56, no. 4, pp. 636–643. <https://doi.org/10.1134/S0021894415040112>
5. Hayakawa H., Takada S., Garzó V. Kinetic theory of shear thickening for a moderately dense gas-solid suspension: From discontinuous thickening to continuous thickening. *Physical Review E*, 2017, vol. 96, iss. 4, 042903. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.042903>
6. Zinchenko S. P., Tolmachev G. N. Accumulation of sputtering products of a ferroelectric target in the high-frequency glow discharge plasma. *Prikladnaya fizika*, 2012, no. 5, pp. 53–56 (in Russian).
7. Dikalyuk A. S., Surzhikov S. T. Numerical simulation of rarefied dusty plasma in a normal glow discharge. *High Temperature*, 2012, vol. 50, no. 5, pp. 571–578. <https://doi.org/10.1134/S0018151X12040050>
8. Arutyunyan R. V. Simulation of the temperature and electric fields by high-current pulse to the electrode. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2016, vol. 16, iss. 2, pp. 138–144 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2016-16-2-138-144>
9. Kosarev N. P., Makarov V. N., Ugolnikov A. V., Makarov N. V., Dyldin G. P. Mine aerology of dust aerosols under conditions of hydro-vortex coagulation. *News of the Ural State Mining University*, 2020, iss. 4 (60), pp. 155–165 (in Russian). <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-4-155-165>



10. Kirsh A. A., Makaveev P. Yu., Kirsh V. A. Collection of metal aerosol nanoparticles at high temperature. *Colloid Journal*, 2020, vol. 82, no. 2, pp. 122–129. <https://doi.org/10.1134/S1061933X20020052>
11. Balashov A. M. A way to increase the efficiency of electrostatic precipitators for cleaning emissions from metallurgical complex enterprises. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the Development of Science and Education], 2020, no. 58–5, pp. 88–91 (in Russian). <https://doi.org/10.18411/lj-02-2020-108>
12. Tada 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, pp. 778–787. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.063>
13. Jaiswal S., Hall T., LeBlanc S., Mukherjee R., Thomas E. Effect of magnetic field on the phase transition in a dusty plasma. *Physics of Plasmas*, 2017, vol. 24, iss. 11, 113703. <https://doi.org/10.1063/1.5003972>
14. Shagapov V. Sh., Galimzyanov M. N., Agisheva U. O. Solitary waves in a gas–liquid bubble mixture. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 232–240 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2020-20-2-232-240>
15. Varaksin A. Yu. Effect of particles on carrier gas flow turbulence. *High Temperature*, 2015, vol. 53, no. 3, pp. 423–444. <https://doi.org/10.1134/S0018151X15030207>
16. Vatuzov D. N., Puring S. M. Method of selection and calculation devices air cleaning from condensed aerosols. *Urban Construction and Architecture*, 2016, vol. 6, no. 2 (23), pp. 14–18 (in Russian). <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2016.02.3>
17. Meshalkina M. N., Tsvetkov V. A., Popov B. I. Detection of fire situations by control of gassing and aerosol nanoparticles. *Natural and Technological Risks (Physics-Mathematical and Applied Aspects)*, 2015, no. 2 (14), pp. 27–33 (in Russian).
18. Kutushev A. G., Rodionov S. P. Interaction of weak shock waves with a layer of a powdered medium. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2000, vol. 36, no. 3, pp. 405–413.
19. Kharitonov V. P. Dynamics of convective thermal waves in a porous continuum. *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, pp. 283–290. <https://doi.org/10.1134/S0015462813030010>
20. Mikhailenko K. I., Kuleshov V. S. Numerical modelling of inhomogeneity scale of a flow rate behind the porous barrier. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies], 2015, vol. 20, no. 6, pp. 46–58 (in Russian).
21. Fomin V. M., Fedorov A. V. Research in mechanics of reacting homogeneous and heterogeneous media at the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 223–231. <https://doi.org/10.1134/S0010508215020069>
22. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu. The influence of the coal dust composition on the propagation speed of the combustion front of the coal dust with an inhomogeneous particle distribution in the air. *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 221–230 (in Russian). <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2018-10-2-221-230>
23. Krivenko I. V., Smirnova M. A. Modeling the effects of electromagnetic radiation on natural aerosols. *Matematicheskaya fizika i komp'yuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2019, vol. 22, no. 4, pp. 64–79 (in Russian). <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2019.4.5>
24. Dmitrieva O. S., Madyshev I. N., Dmitriev A. V. Determination of the heat and mass transfer efficiency at the contact stage of a jet-film facility. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 3, pp. 651–656. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1612-z>
25. Tукмаков А. Л., Тукмаков Д. А. 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 Temperature*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 491–495. <https://doi.org/10.1134/S0018151X17030221>



26. Tukmakov A. L., Tukmakov D. A. Generation of Acoustic Disturbances by a Moving Charged Gas Suspension. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 5, pp. 1141–1147. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1842-8>
27. Tukmakov A. L., Tukmakov D. A., Kashapov N. F., Fazlyyakhmatov M. G. Process of the Deposition of Charged Polydisperse Gas Suspension on the Plate Surface in an Electrical Field. *High Temperature*, 2018, vol. 56, no. 4, pp. 481–485. <https://doi.org/10.1134/S0018151X18040193>
28. Tukmakov D. A. Numerical simulation of oscillations of an electrically charged heterogeneous medium due to inter-component interaction. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 73–85 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2019-27-3-73-85>
29. 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. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2020, vol. 93, no. 2, pp. 291–297. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02120-9>
30. Salyanov F. A. *Osnovy fiziki nizkotemperaturnoy plazmy, plazmennyykh apparatov i tekhnologij* [Fundamentals of Low-Temperature Plasma Physics, Plasma Devices and Technologies]. Moscow, Nauka, 1997. 240 p. (in Russian).
31. Fletcher C. A. *Computation Techniques for Fluid Dynamics*. Berlin etc., Springer-Verlang, 1988. 502 p.
32. Tukmakov A. L. Numerical simulation of the process of wave separation of solid particles in resonance gas vibrations in the closed pipe. *Acoustical Physics*, 2009, vol. 55, no. 3, pp. 345–352. <https://doi.org/10.1134/S1063771009030099>
33. Muzafarov I. F., Utyuzhnikov S. V. Application of compact difference schemes to the study of unsteady flows of a compressible gas. *Matematicheskoe modelirovanie*, 1993, vol. 5, no. 3, pp. 74–83 (in Russian).
34. Krylov V. I., Bobkov V. V., Monastyrnyi P. I. *Vychislitel'nye metody* [Computational Methods: in 2 vols.]. Moscow, Nauka, 1977. Vol. 2. 401 p. (in Russian).

Поступила в редакцию / Received 26.06.2021

Принята к публикации / Accepted 22.09.2021

Опубликована / Published 31.03.2022