

УДК 533.27, 51-72

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА ДИСПЕРСНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ПРОЦЕСС РАЗЛЁТА ГАЗОВЗВЕСИ В ВАКУУМ*

Д. А. Тукмаков¹, Н. А. Тукмакова²

¹ Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр» РАН, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д.2/31

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

E-mail: tukmakovDA@imm.knc.ru, nadejdatukmakova@yandex.ru

В работе моделируется течение однородного газа и неоднородной среды. Целью работы является изучение влияния размера частиц дисперсной компоненты смеси на истечение дисперсной среды в вакуум и выявление отличий от процесса истечения в вакуум однородного газа. Математическая модель, примененная в данной работе, реализует континуальную методологию моделирования течения неоднородной среды, такого рода методика моделирования движения смеси предполагает решение полной гидродинамической системы уравнений движения для каждой из компонент смеси, системы уравнений движения компонент смеси связаны слагаемыми, отвечающими за межфазное силовое и тепловое взаимодействие. Система уравнений включает уравнения непрерывности для плотности несущей среды и «средней плотности» дисперсной компоненты смеси. Для описания сохранения импульса несущей среды решалось уравнение Навье-Стокса, для дисперсной компоненты смеси также записывалось уравнение сохранения импульса с учетом слагаемых отвечающих за межкомпонентное взаимодействие. Уравнения сохранения энергии компонент смеси решались с учётом межкомпонентного теплообмена. Система уравнений математической модели дополненная краевыми условиями решалась явным конечно-разностным методом второго порядка точности. В результате моделирования выявлены отличия в распределении параметров сплошной среды при распространении в вакуум чистого газа и газовой взвеси частиц. Также выявлено влияние размера частиц дисперсной фазы на процесс истечение несущей среды и дисперсной компоненты газозвеси в вакуум.

Ключевые слова: газозвесь, уравнение Навье-Стокса, численное моделирование, межкомпонентное взаимодействие

© Тукмаков Д. А., Тукмакова Н. А., 2020

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00442 «Особенности и эффекты волновой динамики многофазных сред».

Введение

Течения неоднородных сред встречаются как в естественной природе, так и в технике. В ряде монографий представлена методология моделирования течений многофазных сред, смесей в которых компоненты имеют различное агрегатное состояние в том числе газовзвесей – аэрозолей и запылённых сред [1-4]. Теоретическому и экспериментальному исследованию динамики газовзвесей посвящены публикации в периодических изданиях [5-15]. В работе [5] аналитически моделировался процесс аспирации в двумерной области без учета взаимообратного влияния несущей и дисперсной среды, предполагалось, что динамика дисперсной компоненты не оказывает влияние на движение несущей среды. Одновременно с этим следует отметить, что анализ теоретических и экспериментальных исследований динамики аэрозолей указывает, что процессы межфазного взаимодействия приводят к существенным отличиям характеристик течений однородных сред и дисперсных смесей. В данной работе исследуется влияние дисперсной компоненты на течение двухфазного потока. Необходимость подобных теоретических исследований для промышленности связана с тем, что наличие дисперсных включений оказывает значительное влияние на характер процессов и рабочие характеристики устройств в которых используются потоки неоднородных сред.

Методика исследования

Движение несущей компоненты смеси описывается одномерной нестационарной системой уравнений динамики сплошной среды, включающей в себя: сохранения массы (1) Навье-Стокса [16,17] (2) и уравнением сохранения полной энергии (3) для сжимаемого теплопроводного газа с включением слагаемых отвечающих за силовое взаимодействие и теплообмен между компонентами смеси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}([e + p - \tau]u - \lambda \frac{\partial T_1}{\partial x}) = -Q - |F|(u - u_1) + \alpha \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \right), \quad (3)$$

Тензор вязких напряжений несущей среды – τ и давление газа – p описываются выражениями:

$$\tau = \frac{4}{3}\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad p = (\gamma - 1)(e - \rho(u^2)/2).$$

Динамика дисперсной компоненты смеси описывается системой уравнений, включающей в себя - уравнение сохранения «средней плотности» [2] (произведения физической плотности материала частиц и объемного содержания дисперсной фазы) (4), изменяющегося на различных участках физической области вместе с движением частиц аэрозоля; уравнениями сохранения импульса (5) и энергии (6), записанными с учетом теплообмена и обмена импульсом с несущей компонентой:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 u_1^2) = -F - \alpha \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial e_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(e_1 u_1) = Q, \quad (6)$$

$$F_S = \frac{3\alpha}{8r} C_d \rho_1 |u - u_1| (u - u_1),$$

$$F_A = \alpha \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u}{\partial x} \right),$$

$$F_{am} = 0.5 \alpha \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u_1}{\partial t} - u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \right),$$

$$F = F_S + F_A + F_{am},$$

$$\rho_1 = \alpha \rho_{10}, e_1 = \rho_1 C_{p1} T_1.$$

Здесь p, ρ, u – давление, плотность, скорость несущей среды; T, e – температура и полная энергия газа; $\rho_1, \rho_{10}, T_1, e_1, u_1$ – средняя плотность дисперсной фазы газозвеси и физическая плотность материала частиц, температура и энергия, скорость дисперсной фазы. Температура несущей среды находится из уравнения $T = (\gamma - 1)(e/\rho - 0.5u^2)/R$, где R – газовая постоянная несущей фазы. Силовое взаимодействие несущей и дисперсной фазы учитывает силу Стокса – F_S , динамическую силу Архимеда – F_A и силу присоединенных масс – F_{am} . Математическая модель предполагает монодисперсный состав твердой фазы газозвеси – все частицы имеют одинаковый размер и одинаковые физические свойства: плотность и теплоемкость материала. Энергия взвешенной в газе дисперсной фазы определяется как $e_1 = \rho_1 C_{p1} T_1$, где C_{p1} – удельная теплоемкость единицы массы вещества из которого состоят частицы. В уравнение тепловой энергии для дисперсной фазы входит тепловой поток между газом и частицей $Q = \alpha^T 4\pi r^2 (T - T_1)n$, здесь α^T – коэффициент теплообмена на поверхности частица-несущая среда, n – концентрация частиц.

Параметры межфазного взаимодействия описаны в работе [2]:

$$C_d = C_d^0 \phi(M_1) \varphi(\alpha), C_d^0 = \frac{24}{Re_1} + \frac{4}{Re_1^{0.5}} + 0.4,$$

$$\phi(M_1) = 1 + \exp\left(-\frac{0.427}{M_1^{0.63}}\right), \varphi(\alpha) = (1 - \alpha)^{-2.5},$$

$$Re = \rho u D / \mu, Re_1 = r \rho |u - u_1| / \mu, M_1 = |u - u_1| / c.$$

Здесь D – характерный размер системы.

Система уравнений движения двухфазной двухтемпературной двухскоростной монодисперсной смеси (1)-(6) в матричном виде имеет вид [14]:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} = H,$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho_1 \\ \rho u \\ \rho_1 u_1 \\ e \\ e_1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho_1 u_1 \\ \rho u^2 + p - \tau \\ \rho_1 u_1^2 \\ (e + p - \tau)u - \lambda \frac{\partial T_1}{\partial x} \\ e_1 u_1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -F + \alpha \frac{\partial p}{\partial x} \\ F - \alpha \frac{\partial p}{\partial x} \\ -Q - |F|(u - u_1) + \alpha \frac{\partial pu}{\partial x} \\ Q \end{bmatrix}.$$

Алгоритм явного конечно-разностного метода Мак-Кормака [16] для нелинейной системы (7) может быть записан в виде:

$$q_j^* = q_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (E_{j+1}^n - E_j^n) + \Delta t H_j^n,$$

$$q_j^{n+1} = 0.5(q_j^* + q_j^n) - 0.5 \frac{\Delta t}{\Delta x} (E_j^n - E_{j-1}^n) + 0.5 \Delta t H_j^n.$$

Здесь $\Delta t, \Delta x$ – соответственно шаги по временной и пространственным координатам; j, n – индекс узлов по координатам и t .

На правой границе расчетной области задавались однородные граничные условия Неймана для динамических функций двухфазной среды, на левой границе расчетной области задавались граничные условия Дирихле для составляющих скорости и граничные условия Неймана для остальных динамических функций [2, 16, 17]:

$$\begin{aligned} u(t, N) &= u(t, N-1), u_1(t, N) = u_1(t, N), \\ \rho_1(t, N) &= \rho_1(t, N-1), \rho_1(t, N) = \rho_1(t, N-1), \\ e(t, N) &= e(t, N-1), e_1(t, N) = e_1(t, N-1), \\ u(t, 1) &= 0, u_1(t, 1) = 0, \\ \rho(t, 1) &= \rho(t, 2), \rho_1(t, 1) = \rho_1(t, 2), \\ e(t, 1) &= e(t, 2), e_1(t, 1) = e_1(t, 2). \end{aligned}$$

В начальный момент времени компоненты смеси покоились:

$$u(0, i) = 0, u_1(0, i) = 0.$$

Для искомым функций в моделируемой области течения задавались начальные значения: $e(0, i) = e_0, e_1(0, i) = e_{10}, \rho(0, i) = \rho_0, \rho_1(0, i) = \rho_{10}$ в левой половине канала ($x < L/2$) и в правой половине канала ($x \geq L/2$): $e(0, i) = 0, e_1(0, i) = 0, \rho(0, i) = 0, \rho_1(0, i) = 0$. Численное решение проводилось на равномерной сетке с количеством узлов вдоль оси x – $N = 1000$. Шаг по времени вычислялся исходя из условия

Куранта-Фридрихса-Леви [16]. Алгоритм численного решения системы уравнений математической модели был реализован на языке Fortran. Используемая в работе методика математического моделирования динамики неоднородных сред тестировалась сопоставлением с численными расчётами динамики газовзвесей известными из литературы [2,12] и результатами физических экспериментов [11,13].

Начальное объёмное содержание вещества дисперсной фазы – $\alpha = 0.001$, физическая плотность вещества дисперсной фазы – $\rho_{10} = 2500 \text{ кг/м}^3$. Начальное давление и температура газа $p=98 \text{ кПа}$ и $T=293 \text{ К}$, $L=1 \text{ м}$.

Результаты расчётов

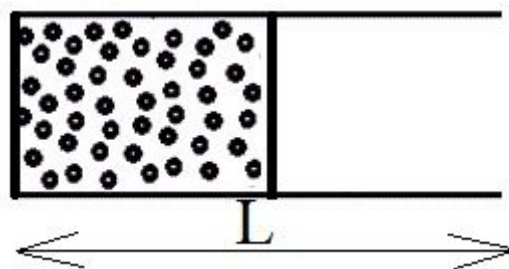


Рис. 1. Схематичное изображение канала с запылённой средой

На рис.1 представлено схематичное изображение ударной трубы с камерой низкого давления из которой откачен газ.

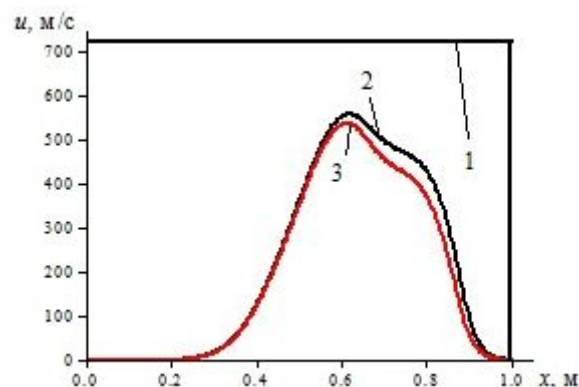


Рис. 2. Распределение скорости в аналитическом решении – кривая 1; в численном решении для однородного вязкого газа – кривая 2; в численном решении для газовзвеси с диаметром частиц – $d=200 \text{ мкм}$ – кривая 3

Из рис.2 следует, что значения скорости при разлёте в вакуум в невязком газе [18] (725 м/с) больше чем в вязком газе (557 м/с), при этом в вязком газе с дисперсной компонентой скорость спутного потока еще ниже (530 м/с). Численные расчёты для разлёта чистого газа и газовзвеси в вакуум имеют отличия. Учёт межкомпонентного взаимодействия между несущей средой и дисперсной компонентой приводит к тому, что у результатов расчётов численной модели газовзвеси более низкие скорости спутного потока газа.

Рассмотрим влияние дисперсности частиц твердой компоненты смеси на процесс разлёта газозвеси в вакуум.

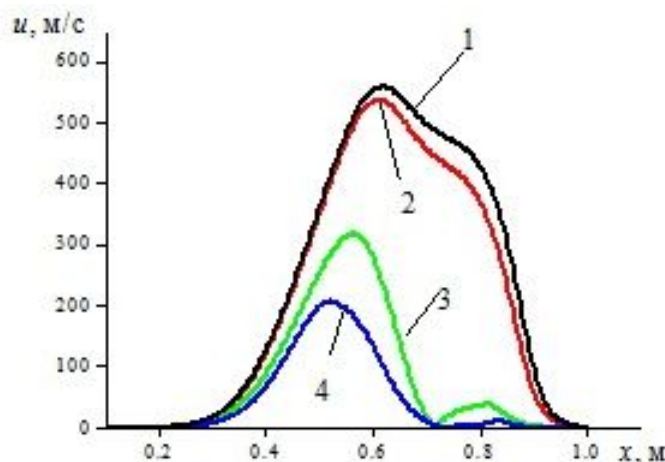


Рис. 3. Численно рассчитанные пространственные распределения скорости газа при разлёте в вакуум – однородного вязкого газа – кривая 1; вязкого газа с дисперсной компонентой частиц диаметром $d=200$ мкм – кривая 2; вязкого газа с дисперсной компонентой частиц диаметром $d=20$ мкм – кривая 3; вязкого газа с дисперсной компонентой частиц диаметром $d=2$ мкм – кривая 4

При последовательном уменьшении размера частиц (рис.3) происходит уменьшение достигаемой спутным потокам газа скорости. Что можно объяснить более интенсивным взаимодействием несущей среды и дисперсной компоненты в газозвесах с меньшим размером частиц. Также замедляется и процесс истечения газовой компоненты смеси в вакуум, для крупнодисперсных частиц распределение давления близко к распределению давления в течении однородного газа, в газозвесах с уменьшением размера частиц происходит замедление течения газа (рис.4).

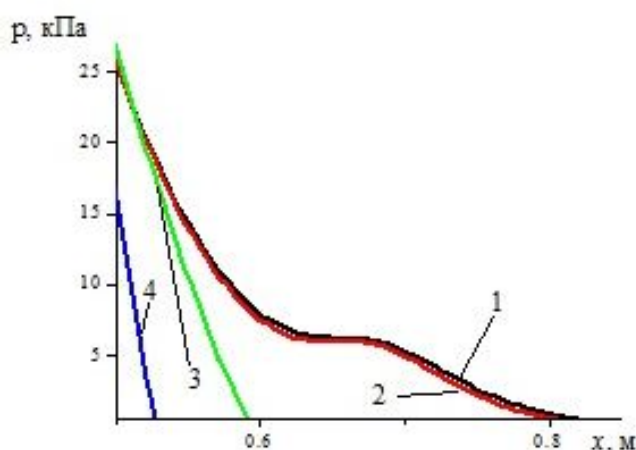


Рис. 4. Пространственное распределение давления газа при разлёте в вакуум – чистого газа – кривая 1; газозвеси с частицами диаметром $d=200$ мкм – кривая 2; газозвеси с частицами диаметром $d=20$ мкм – кривая 3; газозвеси с частицами диаметром $d=2$ мкм – кривая 4

Интенсивность скоростного скольжения компонент смеси в процессе разлёта газозвеси в вакуум возрастает при увеличении размера частиц (рис.5.)

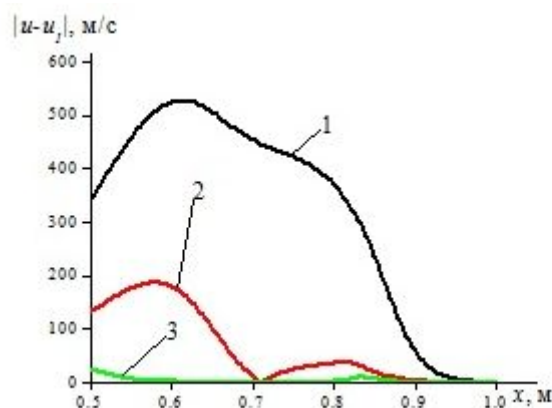


Рис. 5. Пространственное распределение величины межфазного скоростного скольжения при разлёте в вакуум газозвеси с дисперсность частиц $d=200$ мкм – кривая 1; с дисперсность частиц $d=20$ мкм – кривая 2; с дисперсность частиц $d=2$ мкм – кривая 3

Связано это с тем, что более крупные частицы имеют большую инерционность.

При этом уменьшение размера частиц замедляет массоперенос дисперсной компоненты газозвеси в вакуум (рис.6).

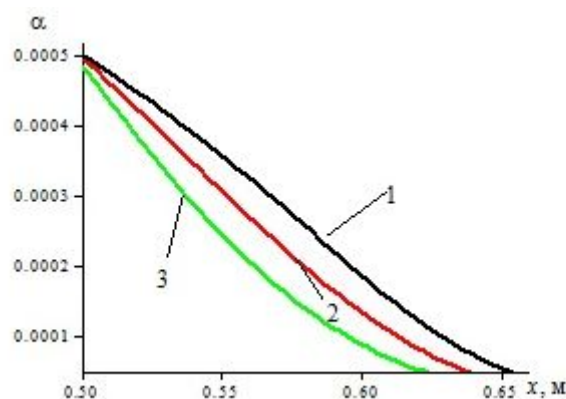


Рис. 6. Пространственное распределение объёмного содержания дисперсной фазы газозвеси при разлёте в вакуум газозвеси с дисперсность частиц $d=200$ мкм – кривая 1; с дисперсность частиц $d=20$ мкм – кривая 2; с дисперсность частиц $d=2$ мкм – кривая 3

Заключение

Выявленные закономерности можно объяснить тем, что в данной математической модели дисперсная фаза состоящей из частиц сферической формы. Кратное уменьшение размера частиц приводит к трехкратному увеличению количества части и двукратному уменьшению площади поверхности одной частицы. Таким образом, происходит кратное увеличение площади контакта несущей и дисперсной фазы двухфазной

среды и соответственно увеличивается интенсивность межфазного взаимодействия. В результате численного моделирования разлёта газовзвеси в вакуум было обнаружено, что процесс истечения неоднородной среды имеет существенные различия от истечения в вакуум чистого газа. Численное моделирование выявило следующие закономерности: 1) Уменьшение размера частиц дисперсной компоненты газовзвеси приводит к уменьшению скорости спутного потока газа. Процесс истечения газовой и дисперсной компонент смеси в газовзвесах с меньшим размером частиц имеет большую длительность. 2) Для крупнодисперсных газовзвесей истечение неоднородной среды в вакуум имеет существенное сходство с процессом истечения чистого в вакуум однородного газа. 3) Интенсивность межфазного скоростного скольжения в процессе разлёта газовзвеси в вакуум прямо пропорциональна линейному размеру дисперсных включений.

Список литературы/References

- [1] Нигматулин Р.И., *Основы механики гетерогенных сред*, Москва, Наука, 1978. [Nigmatulin R. I., *Osnovy mekhaniki geterogennyh sred*, Moskva, 1978].
- [2] Кутушев А.Г., *Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах*, Недра, Санкт-Петербург, 2003. [Kutushev A. G., *Matematicheskoe modelirovanie volnovykh processov v aerodispersnyh i poroshkoobraznyh sredah*, Nedra, Sankt-Peterburg, 2003].
- [3] Стернин Л.Е., *Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами*, Машиностроение, М., 1980. [Sternin L. E., *Dvuhfaznye mono – i polidispersnye techeniya gaza s chasticami*, Mashinostroenie, M., 1980].
- [4] Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А., *Волновые процессы в газовзвесах частиц металлов*, Новосибирск, 2015. [Fedorov A. V., Fomin V. M., Hmel' T. A., *Volnovye processy v gazovzvesyah chastic metallov*, Novosibirsk, 2015].
- [5] Ванюнина М.В. и др., “Аспирация аэрозоля в цилиндрический пробоотборник из низкоскоростного нисходящего потока и из неподвижной среды”, *Прикладная механика и техническая физика*, **46**:2 (2005), 122–129. [Vanyunina M. V. et al., “Aerosol aspiration into a cylindrical sampler from a low-velocity downward flow and from calm air”, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, **46**:2 (2005), 250–256].
- [6] Веревкин А. А., Циркунов Ю. М., “Течение дисперсной примеси в сопле Лавая и рабочей секции двухфазной гиперзвуковой ударной трубы”, *Прикладная механика и техническая физика*, **49**:5 (2008), 102–113. [Verevkin A. A., Tsirkunov Y. M., “There are no two-phase hypersonic shock tunnels for the dispersed phase”, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, **49**:5 (2008), 789–798 pp.].
- [7] Вараксин Ю. А., Протасов М. В., Яценко В. П., “Анализ механизмов осаждения твердых частиц на стенки каналов”, *Теплофизика высоких температур*, 2013, № 5, 738–746. [Varaksin A. Y., Protasov M. V., Yatsenko V. P., “Analysis of the deposited processes of solid particles”, *High Temperature*, 2013, № 5, 665–672].
- [8] Арефьев К. Ю., Воронецкий А. В., Сучков С. А., “Расчетное исследование особенностей дробления и испарения капель в газодинамических течениях с циклическими ударными волнами”, *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 10, 17–30. [Aref'ev K. Y., Voroneckij A. V., Suchkov S. A., “Raschetnoe issledovanie osobennostej drobleniya i ispareniya kapel' v gazodinamicheskikh techeniyah s ciklicheskimimi udarnymi volnami”, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, 2015, № 10, 17–30].
- [9] Hishida M., Fujiwara T., Wolanski P., “Fundamentals of rotating detonations”, *Shock Waves*, **19**:1 (2009), 1–10.
- [10] Тукмаков А.Л., “Численное моделирование дрейфа твердых частиц при резонансных колебаниях газа в открытом канале”, *Акустический журнал*, 2009, № 2, 247–255. [Tukmakov A. L., “Computer simulation of the liquid channel caused by the resonance of the open channel”, *Acoustical Physics*, **2** (2009), 253-260].

- [11] Гельфанд Б. Е. и др., “Ударные волны при разлете сжатого объема газозвеси твердых частиц”, *Доклады АН СССР*, **281**:5 (1985), 1113–1116. [Gel'fand B. E. i dr., “Udarnye volny pri razlete szhatogo ob"ema gazovzvеси tverdyh chastic”, *Doklady AN SSSR*, **281**:5 (1985), 1113–1116].
- [12] Губайдуллин Д. А., Тукмаков Д. А., “Численное исследование эволюции ударной волны в газозвеси с учетом неравномерного распределения частиц”, *Математическое моделирование*, **26**:10 (2014), 109–119. [Gubaidullin D. A., Tukmakov D. A., “Numerical research of evolution of the shock wave in gas-particles suspension with account uneven distribution of particles”, *Mathematical Models and Computer Simulations*, **7**:3 (2015), 246–253].
- [13] Нигматулин Р. И., Губайдуллин Д. А., Тукмаков Д. А., “Ударно-волновой разлет газозвесей”, *Доклады академии наук*, **466**:4 (2016), 418–421. [Nigmatulin R. I., Gubaidullin D. A., Tukmakov D. A., “Shock wave dispersion of gas – particle mixtures”, *Doklady Physics*, **61**:2 (2016), 70–73].
- [14] Tukmakov D. A., “Numerical study of polydisperse aerosol dynamics with the drops destruction”, *Lobachevskii Journal of Mathematics*, **40**:6 (2019), 824–827.
- [15] Тукмаков Д. А., “Численное моделирование ударно-волновых течений в газозвеси с неоднородной концентрацией дисперсной фазы”, *Авиационная техника*, 2019, № 1, 54–59. [Tukmakov D. A., “Numerical simulation of shock-wave flows in a gas suspension with inhomogeneous concentration of the dispersed phase”, *Russian Aeronautics*, 2019, № 1, 59–65].
- [16] Fletcher C. A., *Computation Techniques for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [17] Ковеня В. М., Тарнавский Г. А., Черный С. Г., *Применение метода расщепления в задачах аэродинамики*, Наука, Новосибирск, 1990. [Kovenya V. M., Tarnavskij G. A., Chernyj S. G., *Primenenie metoda rasshchepleniya v zadachah aerodinamiki*, Nauka, Novosibirsk, 1990].
- [18] Черный Г. Г., *Газовая динамика*, Наука, М., 1988. [Chernyj G. G., *Gazovaya dinamika*, Nauka, Moskva, 1988].

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. Москва. 1978.
- [2] Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. Санкт-Петербург. 2003.
- [3] Стернин Л.Е. Двухфазные моно – и полидисперсные течения газа с частицами. Москва. 1980.
- [4] Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Волновые процессы в газозвесах частиц металлов. Новосибирск. 2015.
- [5] Ванюнина М.В., Галеев Р.С., Зарипов Ш.Х., Скворцов Э.В. Аспирация аэрозоля в цилиндрический пробоотборник из низкоскоростного нисходящего потока и из неподвижной среды // Прикладная механика и техническая физика, 2005, №2, С.122-129.
- [6] Веревкин А.А., Циркунов Ю.М. Течение дисперсной примеси в сопле Лавалья и рабочей секции двухфазной гиперзвуковой ударной трубы// Прикладная механика и техническая физика, 2008, №5, С. 102-113.
- [7] Вараксин Ю.А., Протасов М.В., Яценко В.П. Анализ механизмов осаждения твердых частиц на стенки каналов // Теплофизика высоких температур, 2013, № 5, С. 738-746.
- [8] Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В., Сучков С.А. Расчетное исследование особенностей дробления и испарения капель в газодинамических течениях с циклическими ударными волнами; Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2015, №10, С. 17-30.
- [9] Hishida M., Fujiwara T., Wolanski P. Fundamentals of rotating detonations // Shock Waves, 2009, V. 19, I.1, P. 1-10.
- [10] Тукмаков А.Л. Численное моделирование дрейфа твердых частиц при резонансных колебаниях газа в открытом канале // Акустический журнал, 2009, № 2, С. 247-255;

- [11] Гельфанд Б. Е. и др. Ударные волны при разлете сжатого объема газозвеси твердых частиц // Доклады АН СССР, 1985, Том 281, № 5, С. 1113- 1116.
- [12] Губайдуллин Д.А., Тукмаков Д.А. Численное исследование эволюции ударной волны в газозвеси с учетом неравномерного распределения частиц// Математическое моделирование, 2014, №10, С. 109-119.
- [13] Нигматулин Р.И., Губайдуллин Д.А., Тукмаков Д.А. Ударно-волновой разлет газозвесей // Доклады академии наук, 2016, Том 466, № 4, 418-421.
- [14] Tukmakov D.A. Numerical study of polydisperse aerosol dynamics with the drops destruction // Lobachevskii Journal of Mathematics, 2019, N 6, P. 824-827.
- [15] Тукмаков Д.А. Численное моделирование ударно-волновых течений в газозвеси с неоднородной концентрацией дисперсной фазы // Авиационная техника, 2019, №1, С. 54-59.
- [16] Fletcher, C.A., Computation Techniques for Fluid Dynamics. Berlin. 1988.
- [17] Ковеня В.М., Тарнавский Г.А., Черный С.Г. Применение метода расщепления в задачах аэродинамики. Новосибирск. 1990.
- [18] Черный Г.Г. Газовая динамика. Москва. 1988.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 06.03.2020

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-30-1-109-119

PACS: 47.35.+i, 43.28.Bj

NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF DISPERSED INCLUSIONS SIZE ON THE GAS-SUSPENSION SPLITTING PROCESS IN VACUUM¹

D. A. Tukmakov¹, N. A. Tukmakova²

¹ Federal Research Center Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 420111

² Kazan, st. Lobachevsky h. 2/31, Russia; Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev, 420111, Kazan, st. K. Marx, h. 10; Russia

E-mail: tukmakovDA@imm.knc.ru, nadejdatukmakova@yandex.ru

The work simulates the flow of a homogeneous gas and an inhomogeneous medium. The aim of the work is to study the influence of the particle size of the dispersed component of the mixture on the outflow of the dispersed medium into vacuum and to identify differences from the process of outflow of a homogeneous gas into the vacuum. The mathematical model used in this work implements a continuous methodology for modeling the flow of an inhomogeneous medium, this kind of methodology for modeling the mixture motion involves solving the complete hydrodynamic system of equations of motion for each of the components of the mixture, the systems of equations of motion of the components of the mixture are connected by terms responsible for the interphase force and thermal interaction. The system of equations includes continuity equations for the density of the carrier medium and the "average density" of the dispersed component of the mixture. To describe the momentum conservation of the carrier medium, the Navier-Stokes equation was solved; for the dispersed component of the mixture, the equation of momentum conservation was also written taking into account the terms responsible for the intercomponent interaction. The energy conservation equations for the mixture components were solved taking into account inter-component heat transfer. The system of equations of the mathematical model supplemented by boundary conditions was solved by an explicit finite-difference method of the second order of accuracy. As a result of the simulation, differences in the distribution of the parameters of a continuous medium during the propagation of pure gas and gas suspension of particles into a vacuum are revealed.

Key words: gas suspension, Navier-Stokes equation, numerical simulation, intercomponent interaction.

© Tukmakov D. A., Tukmakova N. A. , 2020

¹This work was supported by the RFBR grant No. 19-01-00442 "Features and effects of wave dynamics of multiphase media".