



РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

УДК 51.72:533:537

Численное исследование влияния электрического заряда дисперсной фазы на распространение ударной волны из чистого газа в запылённую среду

Д. А. Тукмаков, А. А. Ахунов

Тукмаков Дмитрий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Федерального исследовательского центра Казанского научного центра Российской академии наук, tukmakovDA@imm.knc.ru

Ахунов Адель Айратович, аспирант Казанского национального исследовательского технического университета имени А. Н. Туполева, white-bars95@yandex.ru

Рассматривается распространение ударной волны из чистого газа в гетерогенную смесь, состоящую из твердых частиц, взвешенных в газе и имеющих электрический заряд. Применяемая математическая модель учитывает скоростное и тепловое взаимодействие несущей и дисперсной компонент смеси. Силовое взаимодействие частиц и газа описывалось силой аэродинамического сопротивления. Несущая среда описывалась как вязкий сжимаемый теплопроводный газ. Уравнения математической модели решались явным конечно-разностным методом второго порядка точности с применением схемы нелинейной коррекции сеточной функции. Система уравнений математической модели дополнялась граничными и начальными условиями для искомых функций, описывающих динамику несущей и дисперсной компонент смеси. В результате численного моделирования было выявлено, что в электрически заряженной газозвеси наблюдается отличие в давлении и скорости газа, «средней плотности» и скорости дисперсной компоненты от аналогичных величин в газозвеси с электрически нейтральной дисперсной компонентой. При этом на участках канала, где значение «средней плотности» в электрически заряженной газозвеси больше, чем в нейтральной, наблюдается рост давления и уменьшение скорости несущей среды.

Ключевые слова: многофазные среды, межфазное взаимодействие, ударные волны, уравнение Навье – Стокса, сила Кулона.

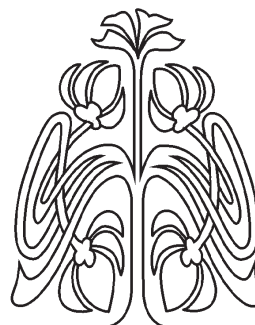
Поступила в редакцию: 27.11.2019 / Принята: 15.01.2020 / Опубликовано: 31.08.2020

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

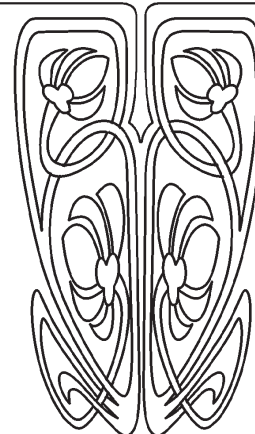
DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-183-192>

Введение

Многие природные явления и промышленные технологии связаны с течениями неоднородных сред [1–18], в частности, процессы, связанные с течением аэрозолей и запылённых сред, встречаются в горной и химической промышленности, аэрокосмических технологиях и т.д. В ряде случаев возникает необходимость исследования динамики дисперсных потоков, движущихся как под действием аэродинамических сил, так и под влиянием сил электрической природы [10–18].



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





В данной статье используется ряд известных из литературы результатов методологии математического моделирования динамики неоднородных сред. Общая теория гидродинамики многофазных сред представлена в работе [1], работы [3–5] посвящены методике численного моделирования ударно-волновой динамики газовзвесей. В монографии [2] представлены линеаризованные математические модели двухфазных потоков, также методами математического моделирования исследуется распространение акустических волн в аэрозолях. Работа [6] посвящена аналитическому расчёту динамики одиночных частиц, в то время как в работе [7] проводится обзор экспериментальных и теоретических результатов по исследованию влияния концентрации частиц на интенсивность взаимодействия несущей и дисперсной фазы. Статьи [8] и [9] посвящены соответственно математическому моделированию двухфазных потоков в стационарной постановке и экспериментальному исследованию течений газовзвесей в трубах. В статье [12] проводится сопоставление экспериментального исследования и численных расчётов течения запылённой электрически заряженной двухфазной среды в канале без учета взаимообратного силового влияния компонент смеси. В работе [13] проводилось экспериментальное исследование массопереноса дисперсной компоненты пылевой плазмы применительно к напылению покрытий на поверхности. В статье [14] осуществлено численное моделирование динамики нестационарных течений пылевой плазмы без учета влияния вязкости несущей среды. В работе [16] обсуждается применение электрически заряженных запылённых сред в целях нанесения покрытий на окрашиваемые поверхности.

Применяемая в данной работе методика моделирования нестационарных течений неоднородной среды описывает электрически заряженную газовзвесь с вязкой, сжимаемой и теплопроводной несущей средой, при этом учитывается силовое взаимодействие компонент смеси и межкомпонентный теплообмен. Учет взаимодействия компонент позволяет исследовать эффекты, связанные с взаимообратным влиянием фаз газовзвеси, что является актуальным для моделирования динамики газовых взвесей. Предполагается, что все включения дисперсной фазы имеют одинаковый размер и состав, при этом со стороны несущей среды частицы находятся под действием силы аэродинамического сопротивления [1, 2]. При описании движения

электрически заряженной многофазной среды учитывается сила Кулона [19], действующая со стороны электрического поля, которое создано распределенным зарядом дисперсной компоненты газовзвеси.

В ряде работ [10, 11, 17] проводилось исследование распространения ударных волн из чистого газа в газовзвеси, а также из газовзвесей в чистый газ, изучалось влияние дисперсной фазы на параметры ударно-волнового течения. В работах [14, 18] исследовалась генерация акустических импульсов в газе, вызванных движением электрически заряженной дисперсной компоненты двухфазной среды.

Целью данной работы является исследование влияния электрического заряда дисперсной компоненты газовзвеси на параметры несущей среды при распространении ударной волны из чистого газа в запылённую среду.

1. Математическая модель

Для описания движения неоднородной среды применяется система уравнений динамики многоскоростной и многотемпературной газовзвеси со скоростным скольжением фаз и межфазным теплообменом. Одним из наиболее важных параметров дисперсной компоненты гетерогенной смеси является «средняя плотность», представляющая собой произведение объемного содержания дисперсной компоненты на физическую плотность материала дисперсной фазы [1–4]. Физическая плотность материала дисперсных включений в процессе течения многофазной среды не изменяется. При этом объемное содержание является функцией временной и пространственных переменных. Движение несущей среды описывается системой уравнений Навье – Стокса для сжимаемого теплопроводного газа с учетом межфазного силового взаимодействия и теплообмена:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla^i (\rho_i \mathbf{V}_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_1 V_1^k}{\partial t} + \nabla^i (\rho_1 V_1^k V_1^i + \delta_{ik} p - \tau_{ik}) = -F_k + \alpha \nabla^k p, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_2 V_2^k}{\partial t} + \nabla^i (\rho_2 V_2^i V_2^k) = F_k - \alpha \nabla^k p, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (e_1)}{\partial t} + \nabla^i (V_1^i (e_1 + p - \tau_{ii}) - V_1^k \tau_{ki} - \lambda \nabla^i T) = \\ = -Q - |F_k| (V_1^k - V_2^k) + \alpha \nabla^k (p V_1^k), \quad (4) \end{aligned}$$



$$\frac{\partial(e_2)}{\partial t} + \nabla^k (e_2 V_2^k) = Q, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} = \rho_2 q_0, \quad (6)$$

$$V_i = [u_i, v_i]; \quad i, k = 1, 2.$$

Тензор вязких напряжений несущей среды вычисляется следующим образом [20]:

$$\tau_{x_1 x_1} = \mu \left(2 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} - \frac{2}{3} D \right), \quad \tau_{x_2 x_2} = \mu \left(2 \frac{\partial v_1}{\partial x_2} - \frac{2}{3} D \right),$$

$$\tau_{x_1 x_2} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right), \quad D = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_1}{\partial x_2}.$$

Межфазное силовое взаимодействие описывается уравнениями [1, 3, 15]:

$$F_{x_1} = \frac{3}{4} \frac{\alpha}{(2r)} C_d \rho_1 \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} (u_1 - u_2) - \alpha q_0 \rho_{20} \frac{\partial \varphi}{\partial x_1},$$

$$F_{x_2} = \frac{3}{4} \frac{\alpha}{(2r)} C_d \rho_1 \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} (v_1 - v_2) - \alpha q_0 \rho_{20} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2}.$$

Компоненты вектора межфазного силового взаимодействия включают в себя силу аэродинамического сопротивления [1–3], так как наиболее существенное влияние на межфазное силовое взаимодействие оказывает сила аэродинамического сопротивления [1–3], также при описании динамики частиц учитывается сила Кулона [19]. Здесь p, ρ_1, u_1, v_1 – давление, плотность, декартовы составляющие скорости несущей среды в направлении осей x_1 и x_2 соответственно; T_1, e_1 – температура и полная энергия газа; $\rho_2, T_2, e_2, u_2, v_2$ – средняя плотность, температура, внутренняя энергия, декартовы составляющие скорости дисперсной фазы; F_k – составляющие вектора силового взаимодействия дисперсной фазы и несущей среды, $k = 1, 2$; Q – тепловой поток между дисперсной фазой и несущей средой [1–3]; λ и μ – теплопроводность и вязкость несущей среды соответственно. Температура несущей среды находится из уравнения $T_1 = (\gamma - 1) (e_1 / \rho_1 - 0.5 (u_1^2 + v_1^2)) / R$, где R – газовая постоянная несущей фазы, γ – постоянная адиабаты. Внутренняя энергия взвешенной в газе дисперсной фазы определяется как $e_2 = \rho_2 C_p T_2$, где C_p – удельная теплоемкость единицы массы вещества дисперсной фазы. Тепловой поток

между компонентами смеси описывается выражением $Q = 6\alpha Nu_{12} \lambda (T_1 - T_2) / (2r)^2$. Число Нуссельта определяется с помощью известной аппроксимации в зависимости от относительных чисел Маха, Рейнольдса и от числа Прандтля [2, 3]:

$$M_{12} = |\bar{V}_1 - \bar{V}_2| / c, \quad Re_{12} = \rho_1 |\bar{V}_1 - \bar{V}_2| 2r / \mu,$$

$$Pr = \gamma C_p \mu / \lambda,$$

$$Nu_{12} = 2 \exp(-M_{12}) + 0.459 Re_{12}^{0.55} Pr^{0.33},$$

$$0 \leq M_{12} \leq 2, \quad 0 \leq Re_{12} < 2 \cdot 10^5.$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления вычислялся с использованием следующего выражения [1, 3]:

$$C_d = \frac{24}{Re_{12}} + \frac{4}{Re_{12}^{0.5}} + 0.4.$$

Здесь c – скорость звука, вычисляемая из уравнения: $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = 342$ м/с, где $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса воздуха, теплопроводность несущей среды предполагалась равной $\lambda = 0.02553$ Вт/(м·К), динамическая вязкость несущей среды – $\mu = 1.72 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\gamma = 1.4, R = 8.31$ Дж/(моль·К).

Составляющие силы Кулона на единицу объема газозвеси определяются через ее удельный заряд, объемную плотность твердой фазы и напряженность электрического поля. Потенциал электрического поля в расчетной области определяется из решения уравнения Пуассона. В правой части уравнения Пуассона содержится плотность заряда газозвеси, отнесенная к абсолютной диэлектрической проницаемости несущей среды [19]:

$$\operatorname{div} E = \frac{\rho_{zt}}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad E = -\nabla \varphi, \quad \Delta^2 \varphi = -\frac{\rho_{zt}}{\varepsilon \varepsilon_0},$$

$$\rho_{zt} = \alpha \rho_{20} \cdot q_0 = \rho_2 \cdot q_0, \quad \varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \Phi / \text{м}, \quad \varepsilon = 1.$$

где q_0 – удельный заряд единицы массы твердой фракции, φ – потенциал электрического поля.

Система уравнений динамики многофазной среды (1)–(4) решалась явным конечно-разностным методом Мак-Кормака [20, 21]. Шаг по времени вычислялся, исходя из условия Куранта – Фридрихса – Леви [20]. Монотонность решения достигалась с помощью применения схемы коррекции [22] после перехода с n -го на новый временной слой $-t = t^{n+1}$.



При расчете ударно-волновых течений двухфазной смеси для составляющих скорости несущей среды и дисперсной компоненты задавались однородные граничные условия Дирихле на закрытых концах моделируемого канала $x = 0$ и $x = L$. Для остальных динамических функций гетерогенной смеси и для составляющих векторов скоростей несущей и дисперсной фазы на

$$\begin{aligned}
 u_1(t, 1, j) &= 0, & u_2(t, 1, j) &= 0, \\
 v_1(t, 1, j) &= 0, & v_2(t, 1, j) &= 0, \\
 u_1(t, N_x, j) &= 0, & u_2(t, N_x, j) &= 0, \\
 v_1(t, N_x, j) &= 0, & v_2(t, N_x, j) &= 0, \\
 u_1(t, i, 1) &= u_1(t, i, 2), & u_2(t, i, 1) &= u_2(t, i, 2), \\
 v_1(t, i, 1) &= v_1(t, i, 2), & v_2(t, i, 1) &= v_2(t, i, 2), \\
 u_1(t, i, N_y) &= u_1(t, i, N_y - 1), & u_2(t, i, N_y) &= u_2(t, i, N_y - 1), \\
 v_1(t, i, N_y) &= v_1(t, i, N_y - 1), & v_2(t, i, N_y) &= v_2(t, i, N_y - 1), \\
 \rho_1(t, 1, j) &= \rho_1(t, 2, j), & \rho_2(t, 1, j) &= \rho_2(t, 2, j), \\
 \rho_1(t, N_x, j) &= \rho_1(t, N_x - 1, j), & \rho_2(t, N_x, j) &= \rho_2(t, N_x - 1, j), \\
 \rho_1(t, i, 1) &= \rho_1(t, i, 2), & \rho_2(t, i, 1) &= \rho_2(t, i, 2), \\
 \rho_1(t, i, N_y) &= \rho_1(t, i, N_y - 1), & \rho_2(t, i, N_y) &= \rho_2(t, i, N_y - 1), \\
 e_1(t, 1, j) &= e_1(t, 2, j), & e_2(t, 1, j) &= e_2(t, 2, j), \\
 e_1(t, N_x, j) &= e_1(t, N_x - 1, j), & e_2(t, N_x, j) &= e_2(t, N_x - 1, j), \\
 e_1(t, i, 1) &= e_1(t, i, 2), & e_2(t, i, 1) &= e_2(t, i, 2), \\
 e_1(t, i, N_y) &= e_1(t, i, N_y - 1), & e_2(t, i, N_y) &= e_2(t, i, N_y - 1).
 \end{aligned}$$

Примененная в данной работе математическая модель может быть использована для расчёта двумерных течений вязкого газа, но так как для составляющих скорости на боковых поверхностях задавались однородные граничные условия Неймана, то поперечные составляющие тензора вязких напряжений в моделируемом процессе отсутствовали.

Уравнение Пуассона [19, 23], описывающее потенциал электрического поля (6), решалось методом конечных разностей с помощью итерационной схемы метода установления [23] на сгенерированной для газодинамических расчетов сетке с целью учесть влияние силы Кулона при решении уравнений динамики двухфазной среды, а также учесть распределение «средней

боковых поверхностях канала задавались однородные граничные условия Неймана, согласно методике конечно-разностного моделирования динамики сжимаемого теплопроводного газа [20] и методике моделирования динамики, взвешенной в сжимаемом теплопроводном газе, дисперсной компоненты с изменяющейся «средней плотностью» и энергией [3, 4]:

плотности» дисперсной фазы в узлах разбиения физической области при решении уравнения Пуассона. Для потенциала внутреннего электрического поля газозвеси задавались однородные граничные условия Неймана в той части канала, которая заполнена электрически заряженной дисперсной компонентой газозвеси, и однородные граничные условия Дирихле в той части канала, в которой расположен однородный газ:

$$\begin{aligned}
 \varphi(1, j) &= 0, & \varphi(N_x, j) &= \varphi(N_x - 1, j), \\
 \varphi(i, 1) &= 0, & \varphi(i, N_y) &= \varphi(i, N_y - 1).
 \end{aligned}$$

Такая постановка граничных условий связана с тем, что если граница области проводящая, то нормальная составляющая тока равна нулю:



$$\vec{j}_n = \tau \vec{E}_n = -\tau \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$$

(здесь τ – коэффициент проводимости), следовательно $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$.

Алгоритм численного решения системы уравнений математической модели был реализован на языке Fortran.

В работе [10] было проведено сопоставление результатов расчётов нестационарных течений неоднородной среды, проведенных описанной выше методикой моделирования, с известными из литературы результатами численного моделирования, в которых применялся метод крупных частиц [3]. Также результаты расчётов ударно-волновых течений запыленной среды явным конечно-разностным методом Мак-Кормака были сопоставлены с результатами физического эксперимента [11]. Сопоставление расчётов течений многофазных сред с численными расчетами, проведенными на основе другой методики моделирования и результатами физического эксперимента, показали приемлемое соответствие.

2. Результаты расчетов

В данной работе численно моделировалось распространение прямого скачка уплотнения, движущегося из чистого газа в запылённую среду. Моделируемая ударная труба представляет собой канал, разделённый на две части: в левой части канала находится газ, сжатый до большего давления, чем газ в правой части канала. При этом правая часть канала содержит гетерогенную среду – газ с взвешенными в нём твердыми частицами. В расчётах предполагалось, что давление газа в камерах высокого и низкого давлений равно $p_2 = 196$ КПа и $p_1 = 98$ КПа соответственно. Дисперсная фаза в камере низкого давления имела объёмное содержание $\alpha = 0.0005$ и истинную плотность материала $\rho_{20} = 1850$ кг/м³. Длина канала составляла $L = 10$ м, ширина канала составляла $h = 0.1$ м; предполагалось, что все частицы дисперсной фазы имеют электрический заряд одинакового знака с удельным массовым зарядом $q_0 = 0.001$ Кл/кг. Из работ [3, 4, 17] следует, что в процессе движения ударной волны по запылённой среде в направлении движения ударной волны происходит увеличение концентрации частиц дисперсной фазы. Распространение ударной волны из чистого газа в газозвесь характеризу-

ется значительным уменьшением концентрации частиц за волной сжатия, распространяющейся в запылённую среду, и увеличением концентрации частиц вблизи переднего края ударной волны.

В начальный момент времени распределение давления, плотности и температуры газа, а также объёмного содержания частиц дисперсной фазы задавались следующими условиями:

$$0 < x < 5, p = 196 \text{ КПа}, \rho_1 = 2.408 \text{ кг/м}^3, \\ T_1 = 293 \text{ К}, \alpha = 0;$$

$$x \geq 5, p = 98 \text{ КПа}, \rho_1 = 1.204 \text{ кг/м}^3, \\ T_1 = 293 \text{ К}, \alpha = 0.0005.$$

Так как несущая среда моделируется как термодинамически идеальный газ, то количественные изменения в давлении газа учитывают изменения плотности и температуры несущей среды и в целом отражают процессы ударно-волнового течения газовой компоненты запылённой среды. На рис. 1 представлено пространственное распределение давления газа при распространении ударной волны в газозвесах с электрически нейтральной и заряженной дисперсной компонентой. Видно, что на участке между волной сжатия и волной разряжения в электрически заряженной газозвеси наблюдается область, где давление газа отличается от давления газа при прохождении ударной волны из чистого газа в нейтральную газозвесь. На рис. 1 можно наблюдать, что в данной области давление газа в электрически заряженной газозвеси больше, а затем меньше, чем давление газа в электрически нейтральной газозвеси (в направлении движения ударной волны). Сила Кулона воздействует на дисперсную компоненту газозвеси в направлении из камеры низкого давления, заполненной запылённой средой, в камеру высокого давления (рис. 2). Максимальное значение продольной составляющей удельной силы Кулона наблюдается на границе запылённой среды и чистого газа.

На рис. 3 представлено распределение продольной составляющей скорости несущей среды вблизи контакта ударной волны и невозмущенного газа. В процессе распространения ударной волны в камеру низкого давления происходит увеличение скорости спутного потока газа. При этом ускорение спутного потока происходит по мере продвижения ударной волны.

На рис. 4 изображены распределения «средней плотности» твердой фазы для газозвесей с электрически заряженной и нейтральной дисперсными компонентами вдоль продольной

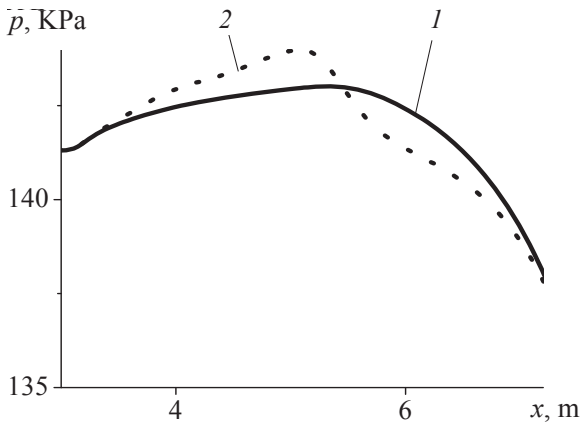


Рис. 1. Пространственное распределение давления в направлении продольной координаты для запылённых сред с диаметром частиц $d = 100$ мкм. Кривая 2 – электрически заряженная газовзвесь, кривая 1 – электрически нейтральная газовзвесь. Момент времени $t = 10.3$ мс
 Fig. 1. Spatial distribution of the pressure in the direction of the longitudinal coordinate for dusty media with a particle diameter of $d = 100$ μm . Curve 2 is an electrically charged gas suspension, curve 1 is an electrically neutral gas suspension. The time instant is $t = 10.3$ ms

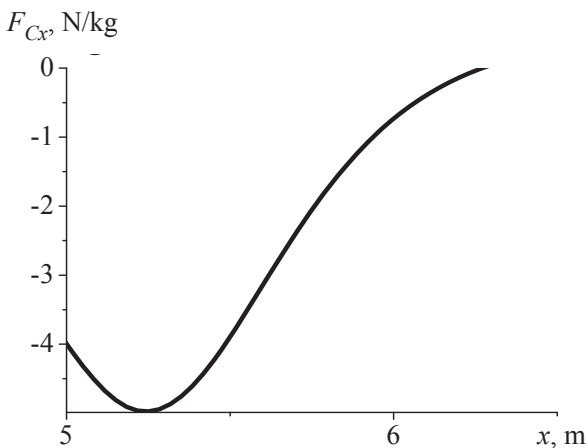


Рис. 2. Распределение продольной составляющей удельной силы Кулона вдоль канала на единицу массы дисперсной компоненты газовзвеси
 Fig. 2. Distribution of the specific Coulomb force in the channel along the longitudinal coordinate per unit mass of the dispersed component of the gas suspension

координаты. Процесс массопереноса дисперсной компоненты смеси в направлении движения газа для электрически заряженной газовзвеси более длительный. В связи с этим в области контакта чистого газа и запылённой среды «средняя плотность» дисперсной фазы выше. На участке увеличения «средней плотности» значение этой величины в электрически заряженной газовзвеси меньше, чем в нейтральной. При этом продоль-

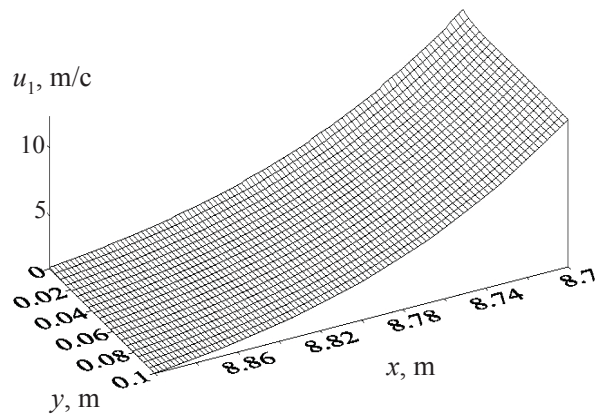


Рис. 3. Пространственное распределение продольной составляющей скорости газа на одном из участков канала. Момент времени $t = 10.3$ мс
 Fig. 3. Spatial distribution of the longitudinal component of the gas velocity in one of the channel sections. The time instant is $t = 10.3$ ms

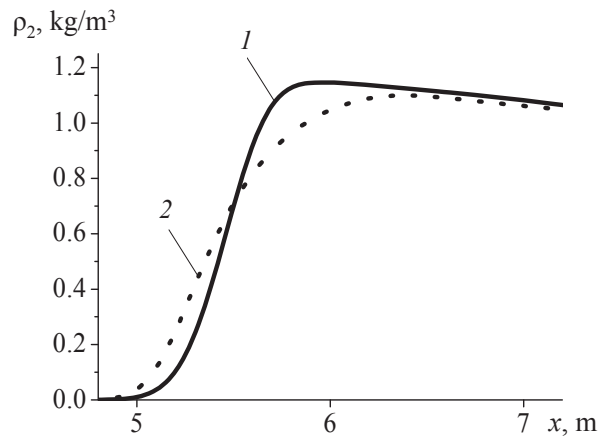


Рис. 4. Пространственное распределение «средней плотности» дисперсной компоненты смеси в направлении продольной координаты. Кривая 2 – электрически заряженная газовзвесь, кривая 1 – электрически нейтральная газовзвесь. Момент времени $t = 10.3$ мс
 Fig. 4. Spatial distribution of the “average density” of the dispersed component of the mixture in the direction of the longitudinal coordinate. Curve 2 is an electrically charged gas suspension, curve 1 is an electrically neutral gas suspension. The time instant is $t = 10.3$ ms

ная составляющая скорости несущей среды в процессе распространения ударной волны из чистого газа в электрически заряженную газовзвесь также имеет участки со значениями отличными от значения скорости несущей среды в электрически нейтральной газовзвеси (рис. 5, а).

Для давления газа и «средней плотности» дисперсной фазы отличие от аналогичных параметров нейтральной газовзвеси заключается

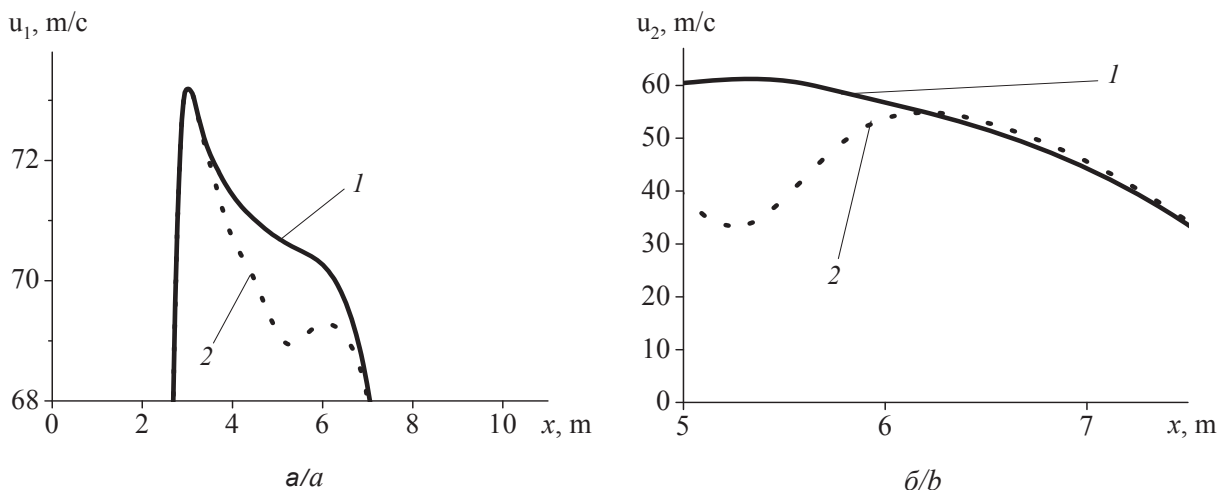


Рис. 5. Пространственное распределение продольных составляющих скоростей несущей среды (а) и дисперсной компоненты (б) в направлении продольной координаты. Кривая 2 – электрически заряженная газовзвесь, кривая 1 – электрически нейтральная газовзвесь, момент времени $t = 10.3$ мс

Fig. 5. Spatial distribution of the longitudinal components of the velocities of the carrier medium (a) and the dispersed component (b) in the direction of the longitudinal coordinate. Curve 2 is an electrically charged gas suspension, curve 1 is an electrically neutral gas suspension, the time instant is $t = 10.3$ ms

в том, что значения этих величин для электрически заряженной газовзвеси больше на участке контакта газа и запылённой среды, а на участке уплотнения «средней плотности» меньше (см. рис. 1, 4); для скорости газа на указанных участках в направлении движения ударной волны наблюдается сначала уменьшение, а затем увеличение (см. рис. 5, а). Данная закономерность может объясняться тем, что в процессе движения ударной волны по запылённой среде вследствие межфазного взаимодействия на участке с большей «средней плотностью» дисперсной фазы скорость несущей среды уменьшается, в результате чего происходит переход кинетической энергии газа в потенциальную, т. е. увеличивается давление газа. Для нейтральной и заряженной газовзвесей скорость дисперсной компоненты имеет меньшее значение, чем скорость газа (см. рис. 5, б). При этом в электрически заряженной газовзвеси вблизи контакта запылённой среды и чистого газа скорость движения дисперсной фазы существенно ниже, чем скорость движения дисперсной фазы в нейтральной запылённой среде: $u_2 = 61$ м/с и $u_2 = 33$ м/с в нейтральной и заряженной газовзвесах соответственно.

Выводы

Проведены численные эксперименты по распространению ударной волны из чистого газа в запылённую среду с электрически нейтральной и заряженной дисперсными компонентами.

Было выявлено, что в электрически заряженной газовзвеси наблюдается отличие давления и скорости газа, «средней плотности» и скорости дисперсной компоненты от аналогичных величин в газовзвеси с электрически нейтральной дисперсной компонентой. При этом на участках канала, где значение «средней плотности» в электрически заряженной газовзвеси больше, чем в нейтральной, наблюдается рост давления и уменьшение скорости несущей среды. Данная закономерность может быть объяснена переходом кинетической энергии газа в потенциальную энергию при уменьшении скорости движения газа вследствие межфазного взаимодействия на участке канала, где концентрация частиц дисперсной фазы в электрически заряженной запылённой среде больше, чем в нейтральной. Отличие в распределении «средней плотности» дисперсной фазы электрически нейтральной и заряженной газовзвесей может быть вызвано тем, что действие силы Кулона направлено противоположно движению ударной волны: из запылённой среды в чистый газ, так как все частицы дисперсной фазы имеют одинаковый по знаку электрический заряд. Вследствие чего скорость частиц дисперсной компоненты электрически заряженной газовзвеси имеет меньшее значение, чем скорость частиц для электрически нейтральной газовзвеси. Таким образом, концентрация частиц дисперсной фазы в электрически заряженной газовзвеси в зоне контакта газа и



запылённой среды выше, чем в нейтральной. По этой причине наблюдается отличие в распределении физических параметров компонент смеси в ударно-волновом течении для электрически заряженной и нейтральной газовзвесей. Выявленные различия давления и скорости несущей среды при распространении ударной волны из чистого газа в нейтральную и электрически заряженную запылённые среды вызваны силовым взаимодействием газовой и твердой компоненты гетерогенной смеси, твердая компонента которой испытывает на себе воздействие как аэродинамических сил, так и сил, вызванных электрическим полем.

Список литературы

1. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред : в 2 ч. М. : Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
2. Губайдуллин Д. А. Динамика двухфазных парогазо-капельных сред. Казань : Изд-во Казан. матем. о-ва, 1998. 153 с.
3. Кутушев А. Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. СПб. : Недра, 2003. 284 с.
4. Федоров А. В., Фомин В. М., Хмель Т. А. Волновые процессы в газовзвешах частиц металлов. Новосибирск : Параллель, 2015. 300 с.
5. Sadin D. V. TVD scheme for stiff problems of wave dynamics of heterogeneous media of nonhyperbolic nonconservative type // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2016. Vol. 56, № 12. P. 2068–2078. DOI: 10.1134/S0965542516120137
6. Varaksin A. Y., Protasov M. V., Yatsenko V. P. Analysis of the deposition processes of solid particles onto channel walls // High Temperature. 2013. Vol. 51, № 5. P. 665–672. DOI: 10.1134/S0018151X13050210
7. Varaksin A. Y. Clusterization of particles in turbulent and vortex two-phase flows // High Temperature. 2014. Vol. 52, № 5. P. 752–769. DOI: 10.1134/S0018151X14050204
8. 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 // Thermophysics and Aeromechanics. 2013. Vol. 20, № 1. P. 79–86. DOI: 10.1134/S0869864313010071
9. Zhuoqing A., Jesse Z. Correlating the apparent viscosity with gas-solid suspension flow in straight pipelines // Powder Technology. 2019. March 1. Vol. 345. P. 346–351. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.12.098
10. Gubaidullin D. A., Tukmakov D. A. Numerical investigation of the evolution of a shock wave in a gas suspension with consideration for the nonuniform distribution of the particles // Mathematical Models and Computer Simulations. 2015. Vol. 7, iss. 3, P. 246–253. DOI: 10.1134/S2070048215030072
11. Nigmatulin R. I., Gubaidullin D. A., Tukmakov D. A. Shock Wave Dispersion of Gas-Particle Mixtures // Doklady Physics. 2016. Vol. 61, № 2. P. 70–73. DOI: 10.1134/S1028335816020038
12. Tada Y., Yoshioka S., Takimoto A., Hayashi Y. Heat transfer enhancement in a gas–solid suspension flow by applying electric field // Inter. J. of Heat and Mass Transfer. 2016. February. Vol. 93. P. 778–787. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.063
13. Zinchenko S. P., Tolmachev G. N. Accumulation of products of ferroelectric target sputtering in the plasma of an rf glow discharge // Plasma Physics Reports. 2013. Vol. 39, № 13. P. 1096–1098. DOI: 10.1134/S1063780X13050176
14. Dikalyuk A. S., Surzhikov S. T. Numerical simulation of rarefied dusty plasma in a normal glow discharge // High Temperature. 2012. Vol. 50, № 5. P. 571–578. DOI: 10.1134/S0018151X12040050
15. 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, iss. 5. P. 1141–1147. DOI: 10.1007/s10891-018-1842-8
16. Панюшкин В. В., Пашин М. М. Измерение заряда порошка, наносимого распылителями с внешней зарядкой // Лакокрасочные материалы и их применение. 1984. № 2. С. 25–27.
17. Gubaidullin D. A., Tukmakov D. A. Influence of the disperse phase properties on characteristics of the shock wave passing the direct shock from pure gas in the gas mixture // Russian Aeronautics. 2017. Vol. 60, № 3. P. 457–462. DOI: 10.3103/S1068799817030205
18. Тукмаков Д. А. Численное моделирование колебаний электрически заряженной гетерогенной среды, обусловленных межкомпонентным взаимодействием // Известия вузов. ПНД. 2019. Т. 27, № 3. С. 73–85. DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-3-73-85
19. Сальянов Ф. А. Основы физики низкотемпературной плазмы, плазменных аппаратов и технологий. М. : Наука, 1997. 240 с.
20. Fletcher C. A. Computation Techniques for Fluid Dynamics. Berlin, etc. : Springer-Verlang, 1988. 502 p.
21. Тукмаков А. Л. Численное моделирование акустических течений при резонансных колебаниях газа в закрытой трубе // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2006. № 4. С. 33–36.
22. 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.
23. Крылов В. И., Бобков В. В., Монастырский П. И. Вычислительные методы : в 2 т. М. : Наука, 1977. Т. 2. 401 с.

Образец для цитирования:

Тукмаков Д. А., Ахунов А. А. Численное исследование влияния электрического заряда дисперсной фазы на распространение ударной волны из чистого газа в запылённую среду // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 3. С. 183–192. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-183-192>



Numerical Study of the Influence of the Electric Charge of a Dispersed Phase on the Propagation of a Shock Wave from Homogeneous Gas to a Dusty Medium

D. A. Tukmakov, A. A. Ahunov

Dmety A. Tukmakov, <https://orcid.org/0000-0002-0335-8548>, Federal Research Center of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2/31 Lobachevsky St., Kazan 420111, Russia, tukmakovDA@imm.knc.ru

Adel A. Ahunov, <https://orcid.org/0000-0001-9216-4675>, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev–KAI, 10 K. Marx St., Kazan 420111, Russia, white-bars95@yandex.ru

Background and Objectives: The currents of heterogeneous media occur in nature and in industrial technologies. In this paper, we consider the propagation of shock waves from pure gas to a heterogeneous mixture consisting of particles suspended in gas and having an electric charge. A mathematical model is used which takes into account the difference between the velocity and temperature of the components of the mixture. The force of aerodynamic drag describes interphase force interaction.

Materials and Methods: The carrier medium is described as a viscous compressible heat conducting gas. The equations of the mathematical model are solved by an explicit method of finite differences of second order accuracy, using a nonlinear correction of the mesh function obtained using a numerical method. The system of equations of the mathematical model is supplemented with boundary conditions. **Results:** Due to numerical modeling, it has been found that in the electrically charged gas slurry there is a difference in the pressure and velocity of the gas, the “average density”, and the velocity of the dispersed component from similar values in the gas slurry to the electrically neutral dispersed component. In addition, in the regions of the channel where the “average density” in the electrically charged gas slurry is greater than in the neutral gas slurry, there is an increase in pressure and a decrease in the velocity of the carrier medium. It is also apparent from the calculations that the particle velocity of the dispersed component of the electrically charged gas suspension of the particles is less than the particle velocity of the neutral gas suspension. Thus, the concentration of dispersed phase particles in the electrically charged gas slurry in the gas/dust contact zone is higher, resulting in a difference in the velocity and pressure distribution relative to that observed in the electrically neutral gas slurry. **Conclusions:** The revealed differences in the parameters of the carrier medium during the propagation of a shock wave from a pure gas into a neutral and electrically charged dusty medium arise due to the force interaction of the gas and solid components of a heterogeneous mixture. The differences were caused by the effect of Coulomb force on the dispersed component of the mixture.

Keywords: multiphase media, interphase interaction, shock waves, Navier–Stokes equation, Coulomb force.

Received: 27.11.2019 / Accepted: 15.01.2020 /
Published: 31.08.2020

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

References

1. Nigmatulin R. I. *Dinamika mnogofaznykh sred: v 2 ch.* [The dynamics of multiphase media: in 2 parts]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 2 pt. 464 p. (in Russian).
2. Gubaidullin D. A. *Dinamika dvukhfaznykh parogazokapel'nykh sred* [Dynamics of two-phase vapor-gas-droplet media]. Kazan, Izd-vo Kazan. Matem. o-va, 1998. 153 p. (in Russian).
3. Kutushev A. G. *Matematicheskoe modelirovanie volnovykh protsessov v aerodispersnykh i poroshkobraznykh sredakh* [Mathematical modeling of wave processes in aerodispersed and powdery media]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2003. 284 p. (in Russian).
4. Fedorov A. V., Fomin V. M., Khmel T. A. *Volnovye processy v gazovzvesyakh chastits metallov* [Wave processes in gas-suspended particles of metals]. Novosibirsk, Parallel Publ., 2015. 301 p. (in Russian).
5. Sadin D. V. TVD scheme for stiff problems of wave dynamics of heterogeneous media of nonhyperbolic nonconservative type. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2016, vol. 56, no. 12, pp. 2068–2078. DOI: 10.1134 / S0965542516120137
6. Varaksin A. Y., Protasov M. V., Yatsenko V. P. Analysis of the deposition processes of solid particles onto channel walls. *High Temperature*, 2013, vol. 51, no. 5, pp. 665–672. DOI: 10.1134 / S0018151X13050210
7. Varaksin A. Y. Clusterization of particles in turbulent and vortex two-phase flows. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 5, pp. 752–769. DOI: 10.1134 / S0018151X14050204
8. 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. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 79–86. DOI: 10.1134 / S0869864313010071
9. Zhuoqing A., Jesse Z. Correlating the apparent viscosity with gas-solid suspension flow in straight pipelines. *Powder Technology*, 2019, March 1, vol. 345, pp. 346–351. DOI: 10.1016 / j.powtec.2018.12.098
10. Gubaidullin D. A., Tukmakov D. A. Numerical investigation of the evolution of a shock wave in a gas suspension with consideration for the nonuniform distribution of the particles. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2015, vol. 7, iss. 3, pp. 246–253. DOI: 10.1134 / S2070048215030072
11. Nigmatulin R. I., Gubaidullin D. A., Tukmakov D. A. Shock Wave Dispersion of Gas-Particle Mixtures. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, no. 2, pp. 70–73. DOI: 10.1134 / S1028335816020038
12. Tadaa Y., Yoshioka S., Takimoto A., Hayashi Y. Heat transfer enhancement in a gas – solid suspension flow by applying electric field. *Inter. J. of Heat and Mass Transfer*, 2016, February, vol. 93, pp. 778–787. DOI: 10.1016 / j.ijheatmasstransfer.2015.09.063
13. Zinchenko S. P., Tolmachev G. N. Accumulation of products of ferroelectric target sputtering in the plasma



- of an rf glow discharge. *Plasma Physics Reports*, 2013, vol. 39, no. 13, p. 1096–1098. DOI: 10.1134/S1063780X13050176
14. 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. DOI: 10.1134/S0018151X12040050
15. 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, iss. 5, pp. 1141–1147. DOI: 10.1007/s10891-018-1842-8
16. Panyushkin V. V., Pashin M. M. Measurement of the charge of the powder applied by sprayers with external charging. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye* [Paintwork materials and their application], 1984, no. 2, pp. 25–27 (in Russian).
17. Gubaidullin D. A., Tukmakov D. A. Influence of the disperse phase properties on characteristics of the shock wave passing the direct shock from pure gas in the gas mixture. *Russian Aeronautics*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 457–462. DOI: 10.3103/S1068799817030205
18. 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). DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-3-73-85
19. Salyanov F. A. *Osnovy fiziki nizkotemperaturnoj plazmy, plazmennyykh apparatov i tekhnologii* [Fundamentals of low-temperature plasma physics, plasma devices and technologies]. Moscow, Nauka Publ., 1997. 240 p. (in Russian).
20. Fletcher C. A. *Computation Techniques for Fluid Dynamics*. Berlin, etc., Springer-Verlag, 1988. 502 p.
21. Tukmakov A. L. Numerical modeling of acoustic flows during resonant gas oscillations in a closed pipe. *Aviatsionnaya tekhnika* [News of higher educational institutions. Aircraft technology], 2006, no. 4, pp. 33–36 (in Russian).
22. Muzafarov I. F., Utyuzhnikov S. V. Application of compact difference schemes to the study of unsteady flows of a compressible gas. *Matematicheskoe modelirovaniye* [Mathematical Modeling], 1993, vol. 5, no. 3, pp. 74–83 (in Russian).
23. Krylov V. I., Bobkov V. V., Monastic P. I. *Vychislitel'nye metody: v 2 t.* [Computational Methods: in 2 vols.] Moscow, Nauka Publ., 1977, vol. 2. 401 p. (in Russian).

Cite this article as:

Tukmakov D. A., Ahunov A. A. Numerical Study of the Influence of the Electric Charge of a Dispersed Phase on the Propagation of a Shock Wave from Homogeneous Gas to a Dusty Medium. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 183–192 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-183-192>
