



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2024.2.3>

УДК 501,533, 004.021
ББК 22.253.34

Дата поступления статьи: 15.03.2024
Дата принятия статьи: 20.05.2024

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОНОДИСПЕРСНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ, ДВИЖУЩЕЙСЯ ПОД УГЛОМ К ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛЕНИЯ ОДНОРОДНОГО ГАЗА И ГАЗОВЗВЕСИ¹

Дмитрий Алексеевич Тукмаков

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник
лаборатории механики сплошной среды,
Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»
tukmakovda@imm.knc.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0335-8548>
ул. Лобачевского, 2, 420111 г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе на основе континуальной методики динамики неоднородных сред численно моделировалось взаимодействие ударной волны, распространяющейся из однородного газа, с газовзвесью. Несущая среда описывалась, как вязкий, сжимаемый теплопроводный газ. Система уравнений математической модели интегрировалась конечно-разностным методом. Рассматривались большие объемные содержания дисперсной фазы. Исследовано влияние межфазного взаимодействия на процесс распространения ударной волны.

Ключевые слова: численное моделирование, многофазные среды, континуальная модель, газовзвеси, ударные волны.

Введение

Тукмаков Д.А., 2024

Одним из разделов математической физики являются математические модели механики жидкости и газа, в том числе динамика неоднородных сред. Отличие динамики неоднородных сред от классической гидродинамики [7; 8] в том, что в неоднородных средах на динамику смеси оказывают влияние параметры их компонент. В монографии [10] представлена общая теория динамики неоднородных и многофазных сред, описываются различные методы моделирования течений. В работе [4] исследованы проблемы движения двухфазных сред — газожидкостных сред с большими скоростями.

Изложены теоретические основы, расчетные методы и прикладные задачи. В [18] рассмотрены вопросы математического моделирования ударно-волновых процессов в многофазных средах. Получены уравнения и найдена структура ударной волны в смеси газов и двухфазной смеси. В монографии [6] в одномерном приближении, без учета вязкости среды, разработаны математические модели и проведены численные расчеты динамики запыленных, газокапельных и порошковых сред. В монографии [19] изложены математические модели, численные алгоритмы моделирования и приведены результаты расчетов ударно-волновых и детонационных процессов в газовзвесах металлических частиц. В статье [2] разработана математическая модель газодинамических процессов в пробоотборнике и проведены численные исследования коэффициента аспирации и полей концентрации частиц для задачи отбора аэрозоля из движущегося газа. В исследовании [1] разработана двумерная модель течения газопылевой среды в вакууме. Рассмотрены различные геометрии течений. В публикации [5] исследованы и реализованы разностная схема типа TVD и метод «крупных частиц» для решения математических моделей механики гетерогенных сред с различными скоростями. Рассмотрена задача об отражении ударной волны от стенки в неоднородной по концентрации смеси. В статье [11] методами механики многофазных сред исследовано взаимодействие гомогенных и гетерогенных детонационных волн в смесях алюминия в кислороде и водорода с облаком капель воды. Определены основные механизмы взаимодействия — распространение ослабленной детонационной волны и срыв детонации. В публикации [21] разработан численный алгоритм решения задачи Римана для моделей сжимаемого двухфазного потока, содержащих неконсервативные слагаемые, отвечающие за взаимодействие фаз. В работе [22] рассмотрена одномерная численная модель динамики газокапельной среды на основе гибридного Эйлера-Лагранжевого подхода с целью исследования взаимодействия распространяющихся ударных волн и дисперсной фазы — испаряющихся капель воды. Принимается двухсторонняя связь для межфазного обмена массой, импульсом и энергией. В статье [3] изучены особенности отражения и преломления акустической волны, проходящей через границу двух многофракционных газовзвесей под прямым углом. Получены формулы для вычисления импеданса многофракционной газовзвеси, коэффициентов отражения и преломления. На данный момент существует несколько подходов в моделировании течений неоднородных сред [2; 10]. Анализ литературы демонстрирует, что в динамике неоднородных сред — газовзвесей важное значение имеет исследование межфазного взаимодействия. Целью данного исследования является изучение влияния межфазного взаимодействия на динамику несущей среды при прохождении ударной волны из газа под углом к поверхности, разделяющей однородный газ и газовзвесь. Учет физико-механических процессов межфазного взаимодействия, протекающих в газодисперсных средах, позволяет выявить закономерности динамики неоднородных сред, отличающиеся от классической газовой динамики. Актуальность работы связана с исследованием технологий экранирования промышленных взрывов аэрозольными завесами [6]. В литературе существует несколько подходов моделирования течений неоднородных сред. Для описания течений неоднородных сред можно моделировать течение несущей среды без учета воздействия дисперсной фазы, при этом динамика дисперсных включений описывается с учетом динамики несущей среды [2]. Учет влияния дисперсной фазы на динамику несущей среды [3; 5; 11; 21; 22] при больших объемных содержаниях дисперсной фазы может оказывать существенное влияние на динамику несущей среды. Равновесный подход предполагает моделирование динамики неоднородной среды как однородной жидкости или газа с учетом коэффи-

циентов, учитывающих неоднородность. Также применяется диффузионный подход, в котором плотности компонент смеси интегрируются отдельными уравнениями, при этом уравнения сохранения импульса и энергии решаются для всей смеси. Для неоднородных сред с большим объемным содержанием дисперсной фазы применяется континуальный подход моделирования, в котором динамика каждой компоненты смеси описывается полной системой динамики сплошной среды с учетом межфазного обмена импульсом и теплообмена. В данной работе для моделирование течения газозвеси применялся программный комплекс, реализующий континуальную методику моделирования динамики неоднородных сред [12]. Новизна исследования заключается в том, что учет межфазного взаимодействия проводится к задаче моделирования распространения ударной волны из газа в газозвесь с существенным объемным содержанием дисперсной фазы под углом к поверхности, разделяющей однородный газ и газозвесь. Несущая среда описывалась, как вязкий сжимаемый теплопроводный газ. Математическая модель учитывала силы межфазного обмена импульсом — динамическую силу Архимеда, силу присоединенных масс, силу аэродинамического сопротивления.

1. Математическая модель и численный алгоритм

Движение несущей среды описывается системой уравнений Навье — Стокса с учетом межфазного силового взаимодействия и теплообмена [12–17]:

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

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv - \tau_{xy}) = -F_x + \alpha \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv + p - \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 + p - \tau_{yy}) = -F_y + \alpha \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}([e + p - \tau_{xx}]u - \tau_{xy}v - \lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}([e + p - \tau_{yy}]v - \tau_{yx}u - \lambda \frac{\partial T}{\partial y}) = \\ = -Q - (|F_x|(u - u_1) + |F_y|(v - v_1)) + \alpha \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Замыкающие соотношения для уравнений (1)–(4):

$$p = (\gamma - 1)(e - \rho(u^2 + v^2)/2), e = \rho(I + (u^2 + v^2)/2),$$

$$\tau_{xx} = \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} D \right), \tau_{yy} = \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} D \right),$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), D = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right).$$

Динамика дисперсной фазы описывается уравнением сохранения средней плотности, уравнениями сохранения составляющих импульса и уравнением сохранения энергии [6; 12–17]:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 u_1^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_1 u_1 v_1) = F_x - \alpha \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 u_1 v_1) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_1 v_1^2) = F_y - \alpha \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial e_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(e_1 u_1) + \frac{\partial}{\partial y}(e_1 v_1) = Q. \quad (8)$$

Индекс «1» относится к физическим величинам дисперсной фазы, переменные без индекса описывают изменение физических параметров несущей среды. В уравнениях применяются следующие обозначения: ρ — плотность газа; u, v — составляющие вектора скорости газа $V = [u, v]$; e и T — энергия и температура несущей среды; p — давление газа. Здесь λ, μ, γ — коэффициенты теплопроводности, вязкости и постоянная адиабаты для несущей среды; $I = RT/(\gamma - 1)$ — внутренняя энергия несущей среды (R — газовая постоянная); $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ — составляющие тензора вязких напряжений несущей среды.

Для дисперсной фазы используются обозначения: α — объемное содержание дисперсной фазы; $\rho_1 = \alpha \rho_{10}$ — средняя плотность дисперсной фазы; ρ_{10} — физическая плотность материала дисперсной фазы; u_1, v_1 — составляющие вектора скорости дисперсной фазы — $V_1 = [u_1, v_1]$; e_1 и T_1 — тепловая энергия и температура дисперсной фазы, $e_1 = \rho_1 C_{p1} T_1$, C_{p1} — теплоемкость дисперсной фазы.

Пространственные составляющие вектора межфазного обмена импульсом F_x, F_y определяются выражениями, включающими в себя несколько сил взаимодействия несущей среды и частиц — $F_x = F_{xd} + F_{xA} + F_{xm}$, $F_y = F_{yd} + F_{yA} + F_{ym}$. В качестве межфазного обмена импульсом учитывалась сила аэродинамического сопротивления — F_{xd}, F_{yd} , динамическая сила Архимеда — F_{xA}, F_{yA} и сила присоединенных масс — F_{xm}, F_{ym} [10]:

$$F_{xd} = \frac{3\alpha}{4d} C_d \rho \sqrt{(u - u_1)^2 + (v - v_1)^2} (u - u_1),$$

$$F_{xA} = \alpha \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right),$$

$$F_{xm} = 0,5\alpha \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u_1}{\partial t} - u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} - v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right),$$

$$F_{yd} = \frac{3\alpha}{4d} C_d \rho \sqrt{(u - u_1)^2 + (v - v_1)^2} (v - v_1),$$

$$F_{yA} = \alpha \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right),$$

$$F_{ym} = 0,5\alpha \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v_1}{\partial t} - u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} - v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \right).$$

Теплообмен несущей среды с дисперсной фазой описывается следующим выражением [6]:

$$Q = 6\alpha \lambda N u_1 (T - T_1) / d_1^2.$$

В выражениях для силы аэродинамического сопротивления C_d — коэффициент сопротивления частицы. Все частицы предполагаются сферической формы. Теплообмен и обмен импульсом составляющих газозвеси задается следующими параметрами [6]:

относительным числом Маха — M_1 , относительным числом Рейнольдса — Re_1 , относительным числом Нуссельта — Nu_1 и числом Прандтля — Pr :

$$C_d = C_d^0 \Phi(M_1) \varphi(\alpha), \quad C_d^0 = \frac{24}{Re_1} + \frac{4}{Re_1^{0,5}} + 0,4,$$

$$\Phi(M_1) = 1 + \exp\left(-\frac{0,427}{M_1^{0,63}}\right), \quad \varphi(\alpha) = (1 - \alpha)^{-2,5},$$

$$Re_1 = d\rho|\mathbf{V} - \mathbf{V}_1|/\mu, \quad M_1 = |\mathbf{V} - \mathbf{V}_1|,$$

$$Pr = c_p \mu (\lambda)^{-1}, \quad Nu_1 = 2 \exp(-M_1) + 0,459 Re_1^{0,55} Pr^{0,33}.$$

Здесь c_p — теплоемкость газа. При определении коэффициента сопротивления C_d функция $\varphi(\alpha)$ учитывает множественность частиц [6]. В данной математической модели не учитывается столкновение частиц одной дисперсной фазы, описанная выше математическая модель динамики полидисперсной газозвеси описывает течения неоднородных сред в широком диапазоне относительных чисел Маха и Рейнольдса [6]: $0 < M_i \leq 2$, $0 < Re_i \leq 2 \cdot 10^5$.

Система уравнений (1)–(8) интегрировалась явным конечно-разностным методом Мак-Кормака второго порядка точности [20]. Рассмотрим численный алгоритм на примере скалярного нелинейного дифференциального уравнения в частных производных (9) от функции f , где $a(f)$, $b(f)$, $c(f)$ — нелинейные функции:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial a(f)}{\partial x} + \frac{\partial b(f)}{\partial y} = c(f). \quad (9)$$

Для нелинейного уравнения (9) численное решение явным конечно-разностным методом Мак-Кормака на n -м временном слое записывается следующим образом (10)–(11) (см. [20]):

$$f_{jk}^* = f_{jk}^{n-1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_{j+1,k}^{n-1} - a_{j,k}^{n-1}) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (b_{j,k+1}^{n-1} - b_{j,k}^{n-1}) + \Delta t c_{jk}^{n-1}, \quad (10)$$

$$f_{jk}^n = 0,5(f_{jk}^* + f_{jk}^n) - 0,5 \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_{j,k}^* - a_{j-1,k}^*) - 0,5 \frac{\Delta t}{\Delta y} (b_{j,k}^* - b_{j,k-1}^*) + 0,5 \Delta t c_{jk}^*. \quad (11)$$

Здесь Δt , Δx , Δy — шаги по переменной времени и пространственным направлениям. С целью подавления численных осцилляций использовалась схема нелинейной коррекции сеточной функции (10)–(11) [9; 12]. Для произвольной сеточной функции $Z_{j,k}^n$ на n -м временном слое в узле j, k алгоритм коррекции имеет следующий вид (12):

$$Z_{j,k}^{n*} = Z_{j,k}^n + \kappa (\delta Z_{j+1/2,k}^n - \delta Z_{j-1/2,k}^n), \quad (12)$$

где $Z_{j,k}^{n*}$ — скорректированная функция. Алгоритм коррекции сеточной функции происходит при выполнении следующих условий:

$$(\delta Z_{j-1/2,k}^n \delta Z_{j+1/2,k}^n) < 0$$

или

$$(\delta Z_{j+1/2,k}^n \delta Z_{j+3/2,k}^n) < 0.$$

Здесь используются обозначения:

$$\delta Z_{j-1/2,k}^n = Z_j^n - Z_{j-1,k}^n, \quad \delta Z_{j+1/2,k}^n = Z_{j+1,k}^n - Z_{j,k}^n, \quad \delta Z_{j+3/2,k}^n = Z_{j+2,k}^n - Z_{j+1,k}^n,$$

где k — коэффициент коррекции.

Величина шага по времени при реализации численного алгоритма выбирается исходя из условия Куранта — Фридрихса — Леви [20].

В публикации [13] исследовано влияние параметров дисперсной фазы на процесс самосогласованной динамики электрически заряженной газовой смеси. В статье [14] проведено сопоставление математических моделей газовой смеси с вязкой и невязкой несущими средами, проведено сопоставление с аналитическими решениями для однородного газа. В работе [15] исследована сеточная сходимость численной модели. Вычислительный комплекс был протестирован сопоставлением с физическими экспериментами [16; 17].

На границах расчетной области для всех функций задавались однородные условия Неймана:

$$\begin{aligned} e(t, i, 1) &= e(t, i, 2), e_1(t, i, 1) = e_1(t, i, 2), \\ e(t, i, N_y) &= e(t, i, N_y - 1), e_1(t, i, N_y) = e_1(t, i, N_y - 1), \\ e(t, 1, j) &= e(t, 2, j), e_1(t, 1, j) = e_1(t, 2, j), \\ e(t, N_x, j) &= e(t, N_x - 1, j), e_1(t, N_x, j) = e_1(t, N_x - 1, j), \\ p(t, i, 1) &= p(t, i, 2), p(t, i, N_y) = p(t, i, N_y - 1), \\ p(t, 1, j) &= p(t, 2, j), p(t, N_x, j) = p(t, N_x - 1, j), \\ \rho(t, i, 1) &= \rho(t, i, 2), \rho(t, i, N_y) = \rho(t, i, N_y - 1), \\ \rho(t, 1, j) &= \rho(t, 2, j), \rho(t, N_x, j) = \rho(t, N_x - 1, j), \\ \rho_1(t, i, 1) &= \rho_1(t, i, 2), \rho_1(t, i, N_y) = \rho_1(t, i, N_y - 1), \\ \rho_1(t, 1, j) &= \rho_1(t, 2, j), \rho_1(t, N_x, j) = \rho_1(t, N_x - 1, j), \\ u(t, i, 1) &= u(t, i, 2), u_1(t, i, 1) = u_1(t, i, 2), v(t, i, 1) = v(t, i, 2), v_1(t, i, 1) = v_1(t, i, 2), \\ u(t, i, N_y) &= u(t, i, N_y - 1), u_1(t, i, N_y) = u_1(t, i, N_y - 1), \\ v(t, i, N_y) &= v(t, i, N_y - 1), v_1(t, i, N_y) = v_1(t, i, N_y - 1), \\ u(t, 1, j) &= u(t, 2, j), u_1(t, 1, j) = u_1(t, 2, j), \\ v(t, 1, j) &= v(t, 2, j), v_1(t, 1, j) = v_1(t, 2, j), \\ u(t, N_x, j) &= u(t, N_x - 1, j), u_1(t, N_x, j) = u_1(t, N_x - 1, j), \\ v(t, N_x, j) &= v(t, N_x - 1, j), v_1(t, N_x, j) = v_1(t, N_x - 1, j). \end{aligned}$$

Граничные условия позволяют описывать область с открытыми границами [20], минимизируя отражение возмущения от границ области. Здесь $N_x = 200$, $N_y = 200$ — количество узлов; i, j — нумерация узлов в x и y направлениях соответственно. Расчеты проводились на равномерной сетке $\Delta x_i = i \cdot L / (N_x - 1)$, $\Delta y_j = j \cdot h / (N_y - 1)$.

2. Результаты расчетов

В расчетах задавались следующие параметры несущей фазы газозвеси: $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль — молярная масса воздуха, теплопроводность несущей среды предполагалась равной $\lambda = 0,02553$ Вт/(м·К), динамическая вязкость несущей среды — $\mu = 1,7210^{-5}$ Па·с, $\gamma = 1,4$, $R = 8,31$ Дж/(моль · К).

Начальная плотность газа — $\rho_0 = 1,29$ кг/м³, физическая плотность дисперсной фазы — $\rho_{10} = 2500$ кг/м³, начальное объемное содержание дисперсной фазы — $\alpha_0 = 0,001$. Дисперсность и объемное содержание твердой фазы газозвеси были выбраны таким образом, чтобы дисперсная фаза газозвеси оказывала существенное влияние на динамику несущей среды [6].

Размеры области, в которой моделируется течение — $L = 2$ м. В начальный момент времени задавались следующие параметры объемного содержания дисперсной фазы ($y < L/2$) $\alpha(x, y) = 0,001$, ($y \geq L/2$) $\alpha(x, y) = 0$ (рис. 1). При разрушении мембраны, ограничивающей камеру высокого давления, образуется ударная волна [6–8]. Таким образом ударная волна падает из однородного газа в газозвесь под углом к границе газозвеси и однородного газа.

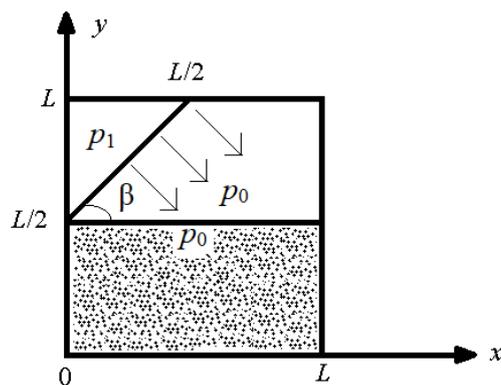


Рис. 1. Схематичное изображение моделируемого процесса

Давление газа в камере высокого давления ($y \geq x + 1$, $0 < x < 1$) — $p_1 = 200$ кПа, давление в невозмущенном однородном газе и газозвеси — $p_0 = 100$ кПа, на рисунке 2 угол наклона мембраны, разделяющей камеру высокого давления от невозмущенного газа, $\beta = \pi/4$.

Помимо течения, схема которого изображена на рисунке 1, рассматривалось ударно-волновое течение, в котором ударная волна движется перпендикулярно поверхности, разделяющей однородную среду и газозвесь. В таком случае предполагалось, что давление газа в верхней части расчетной области ($y > 1$, $0 < x < 2$) — $p_1 = 200$ кПа, давление газа в газозвеси — $p_0 = 100$ кПа.

На рисунке 3, а, б представлено пространственное распределение объемного содержания дисперсной фазы при движении ударной волны под разными углами к поверхности, разделяющей однородный газ и газозвесь $\beta = 0$ (рис. 3, а) и $\beta = \pi/4$ (рис. 3, б). Увеличение концентрации дисперсных частиц происходит по направлению движения ударной волны, и в зависимости от направления движения ударной волны изменение объемного содержания дисперсной фазы происходит либо вдоль вертикальной оси — y , либо под углом к координатным осям.

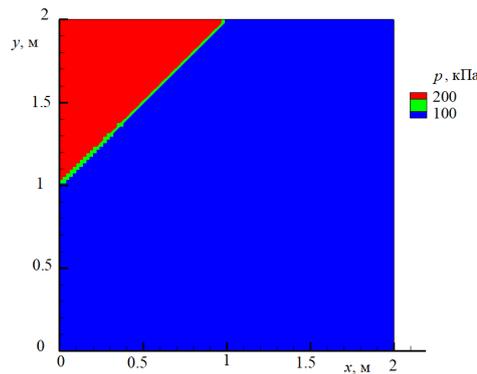


Рис. 2. Начальное распределение давления газовой фазы газозвеси

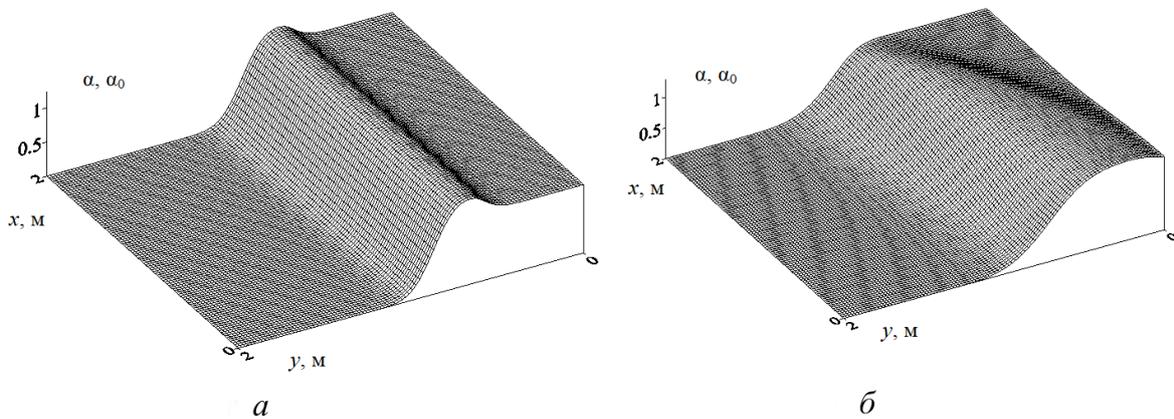


Рис. 3. Пространственное распределение объемного содержания дисперсной фазы под углом $\beta = 0$ (рис. 3, а) и под углом $\beta = \pi/2$ (рис. 3, б)

На рисунке 4, а, б можно наблюдать, что при движении ударной волны перпендикулярно поверхности, разделяющей однородный газ и газозвесь, линии тока при такой постановке задачи в однородном газе и несущей среде газозвеси параллельны вертикальной оси y . При схожести линий тока в однородном газе и газозвеси скорость распространения ударной волны по несущей среде газозвеси меньше, чем в однородном газе (см. рис. 5).

В процессе распространения ударной волны под углом к поверхности, разделяющей однородный газ и газозвесь, наблюдаются существенные отличия линий тока от аналогичных в однородном газе (см. рис. 6 а, б). Аналогично преломлению акустической волны на границе раздела сред [7], в частности в газозвеси [3], наблюдается преломление ударной волны.

На рисунке 7, а–г представлены пространственные распределения давления газа в однородном газе и газозвеси в различные моменты времени при моделировании течения, схематично изображенного на рисунке 1. Параметры несущей среды газозвеси даны вдоль диагонали расчетной области, в направлении которой распространяется ударная волна — $r = \sqrt{x^2 + (y - L)^2}$. В момент времени, близкий к начальному, когда возмущение распространяется в однородном газе, скорость движения ударной волны со-

ставляет $M_1 = 1,43$, при взаимодействии ударной волны, движущейся из однородного газа с газозвесью, скорость движения ударной волны уменьшается до $M_1 = 1,23$, в последующие моменты времени величины скорости ударной волны уменьшаются до значений $M_1 = 1,1$, $M_1 = 1,03$. Отношение максимального давления несущей среды на переднем крае ударной волны в газозвеси (p_{gs}) и однородном газе (p_g) в моменты времени $t = 2,4$ мс, $t = 3,6$ мс, $t = 4,8$ мс составляет $(p_{gs}/p_g) = 104\%$, $(p_{gs}/p_g) = 107\%$, $(p_{gs}/p_g) = 108\%$ соответственно. Такая закономерность может быть объяснена переходом в газозвеси кинетической энергии газа в потенциальную по причине замедления движения ударной волны.

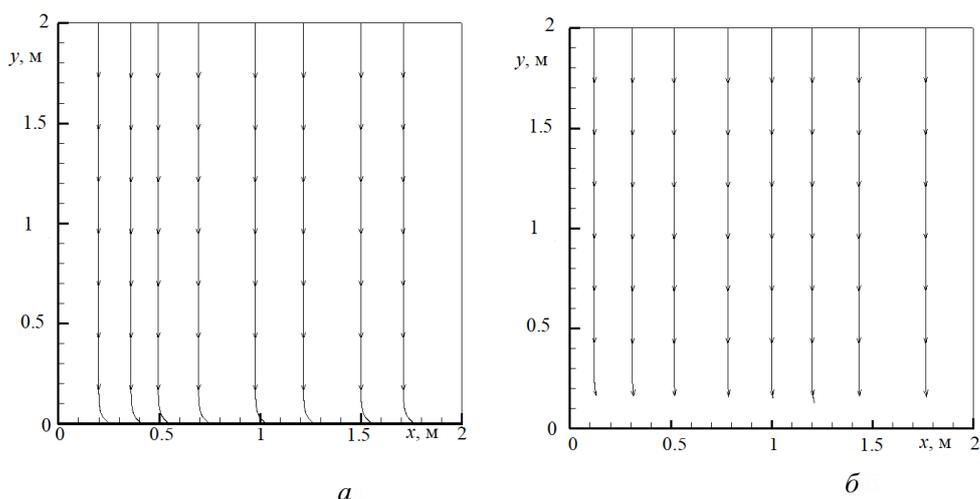


Рис. 4. Линии тока в однородном газе — рис. 4, а и газозвеси — рис. 4, б при движении ударной волны перпендикулярно поверхности раздела однородной среды и газозвеси, момент времени $t = 1,8$ мс

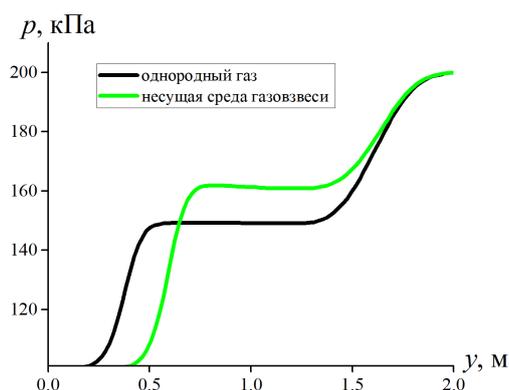


Рис. 5. Распределение давления газа в однородной среде и газозвеси в вертикальном направлении ($x = L/2$), момент времени — $t = 1,8$ мс

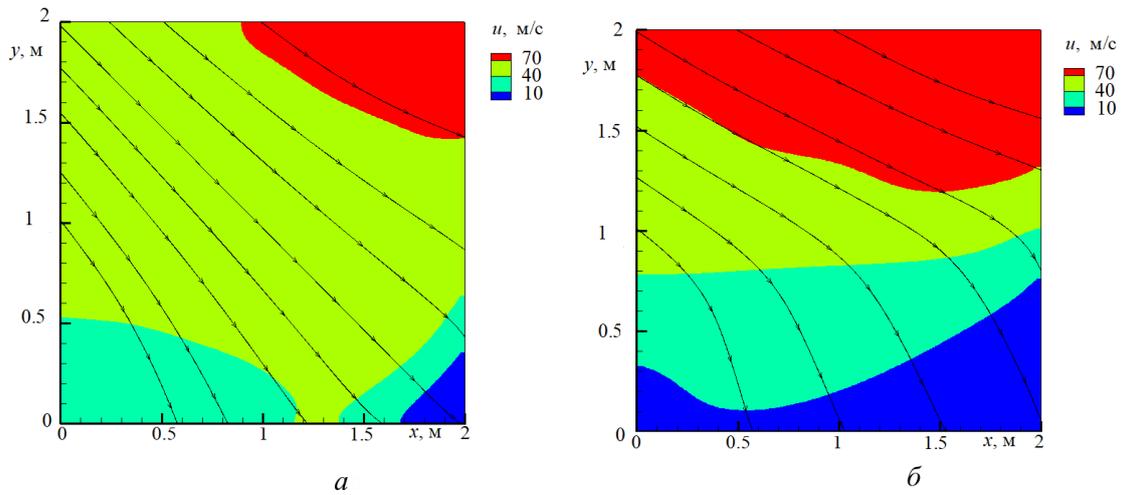


Рис. 6. Линии тока в однородном газе — рис. 6, а и газозвеси — рис. 6, б при движении ударной волны под углом $\beta = \pi/2$ к поверхности, разделяющей однородный газ и газозвесь, момент времени — $t = 4,8$ мс

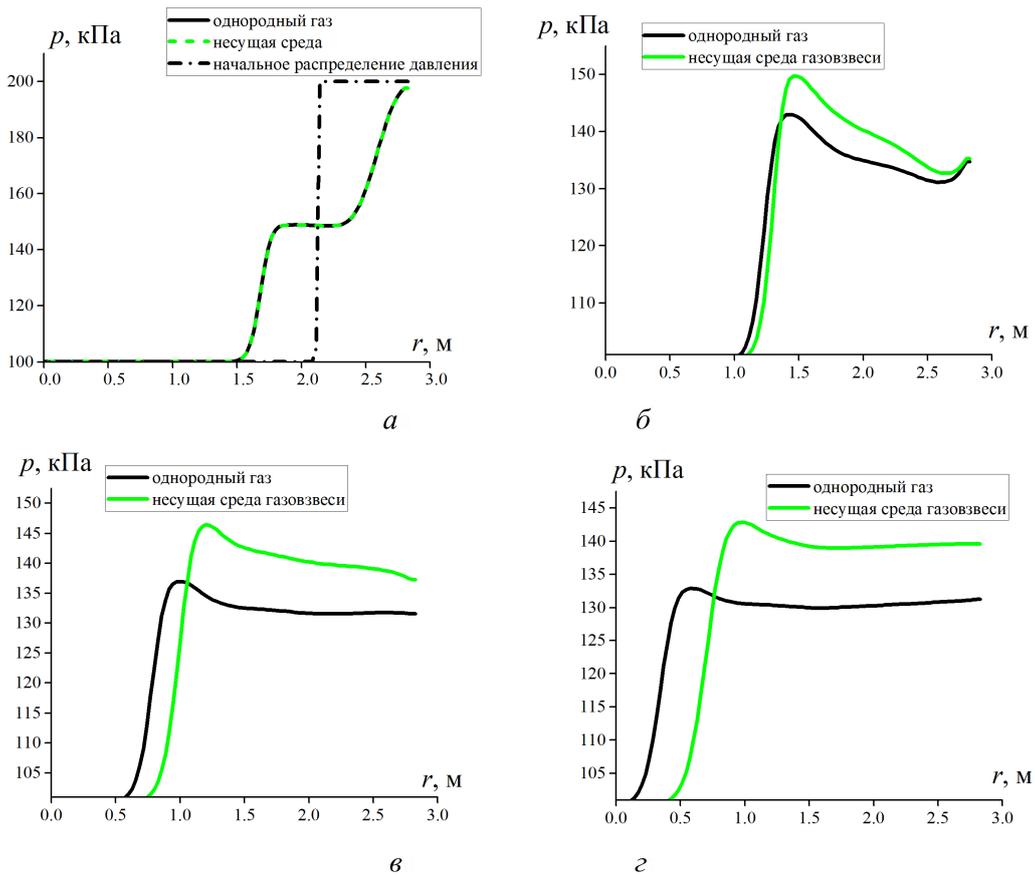


Рис. 7. Пространственное распределение давления газа в однородной среде и газозвеси: а — момент времени $t = 1,2$ мс; б — момент времени $t = 2,4$ мс; в — момент времени $t = 3,6$ мс; г — момент времени $t = 4,8$ мс

Двухмерные распределения давления однородного газа (рис. 8, *a–z*) и несущей среды газозвеси (рис. 9, *a–z*) в различные моменты времени демонстрируют, что различия в распределениях давления в однородном газе и газозвеси увеличиваются по мере продвижения ударной волны.

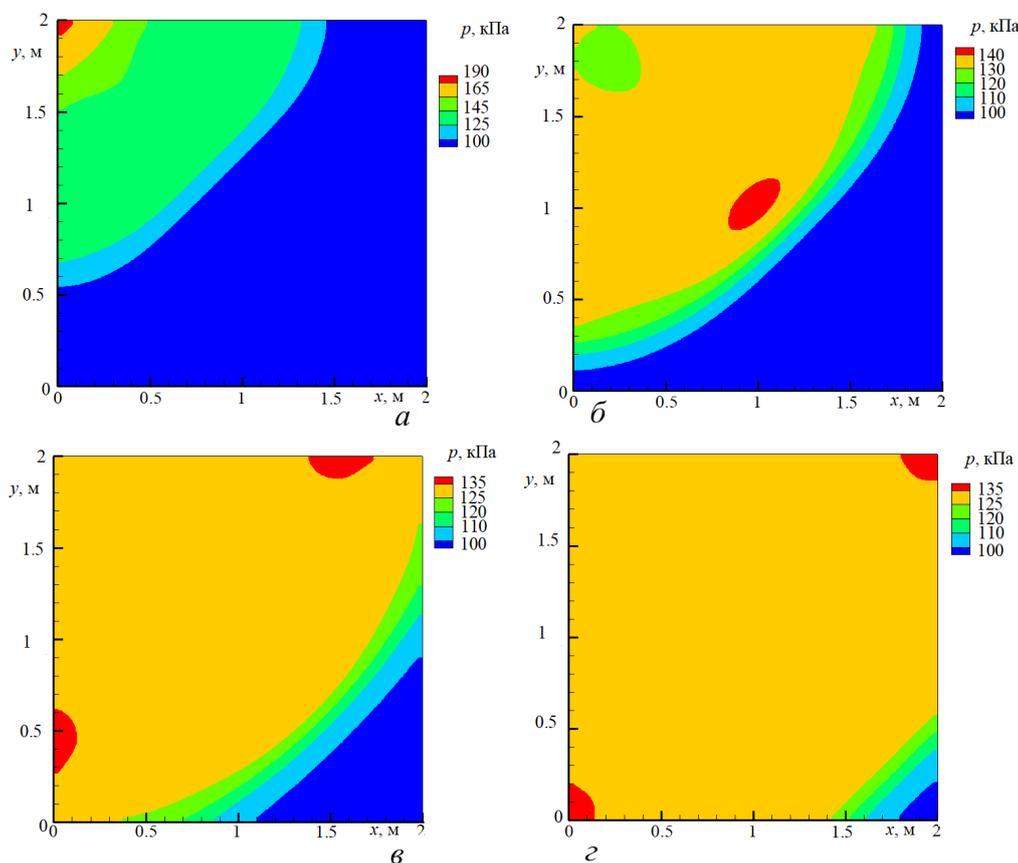


Рис. 8. Пространственное распределение давления в однородном газе в различные моменты времени: *a* — момент времени $t = 1,2$ мс; *б* — момент времени $t = 2,4$ мс; *в* — момент времени $t = 3,6$ мс; *z* — момент времени $t = 4,8$ мс

На рисунке 10 представлено пространственное распределение модуля скоростного скольжения несущей среды и газовой фазы — $|V - V_1| = \sqrt{(u - u_1)^2 + (v - v_1)^2}$ для различных моментов времени. Наибольшее значение модуля скоростного скольжения наблюдается в начале процесса взаимодействия невозмущенной газозвеси с ударной волной, распространяющейся из однородного газа. В процессе движения ударной волны величина модуля скоростного скольжения уменьшается. При взаимодействии с газозвесью уменьшается как скорость движения ударной волны, так и величина модуля скорости ($|V| = \sqrt{u^2 + v^2}$) спутного ударной волне потока газа вблизи переднего края ударной волны (см. рис. 11). Течение дисперсной фазы формируется потоком несущей среды. Дисперсные включения газозвеси приводятся в движение потоком газа. При этом часть кинетической энергии, вследствие обмена импульсом между фазами смеси несущей среды, переходит к дисперсной фазе. Таким образом, за счет межфазного взаимодействия происходит поглощение кинетической энергии несущей среды.

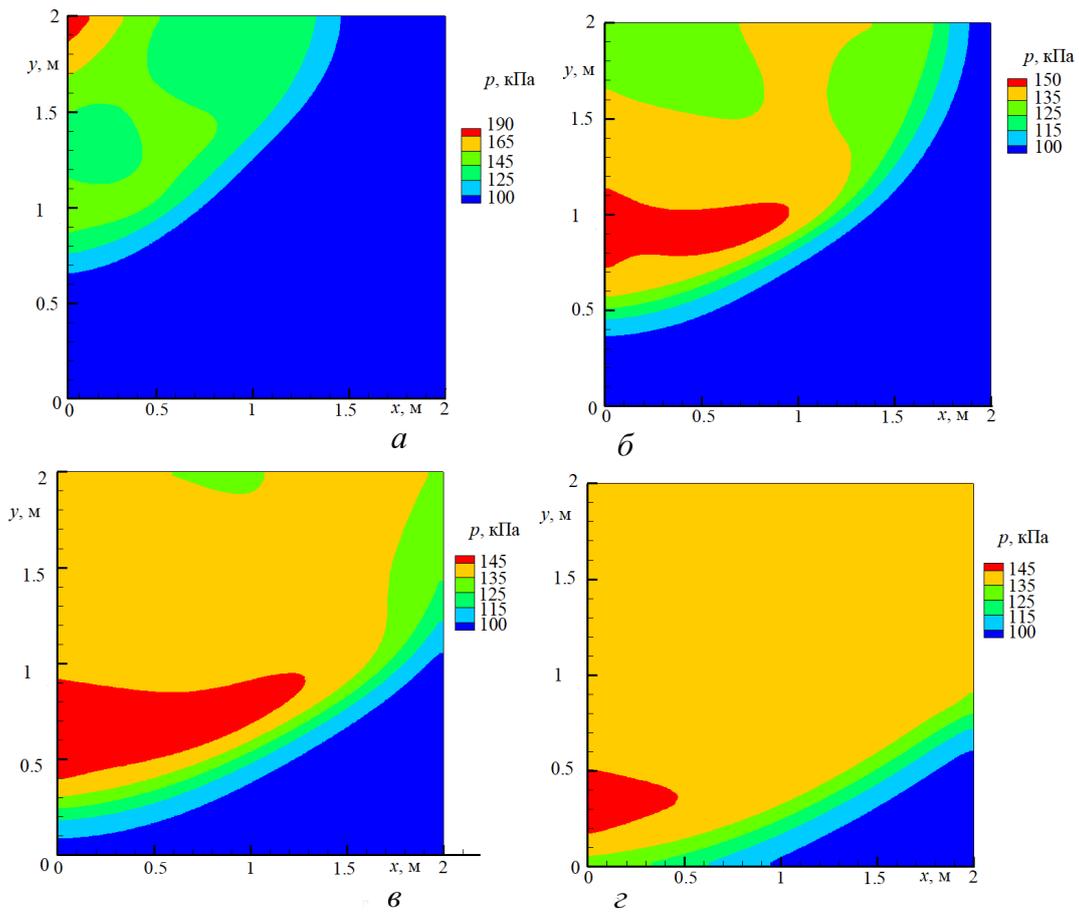


Рис. 9. Пространственное распределение давления несущей среды газозвеси в различные моменты времени:

a — момент времени $t = 1,2$ мс; *б* — момент времени $t = 2,4$ мс;
в — момент времени $t = 3,6$ мс; *г* — момент времени $t = 4,8$ мс

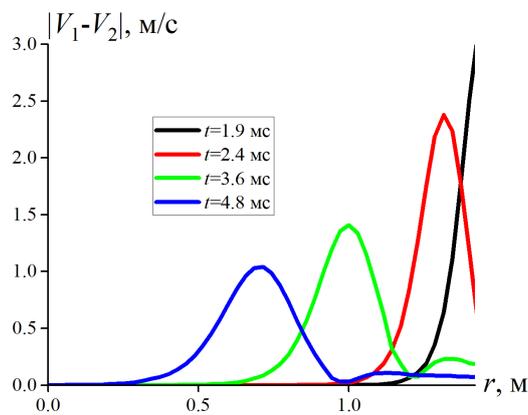


Рис. 10. Пространственное распределение модуля скоростного скольжения в различные моменты времени

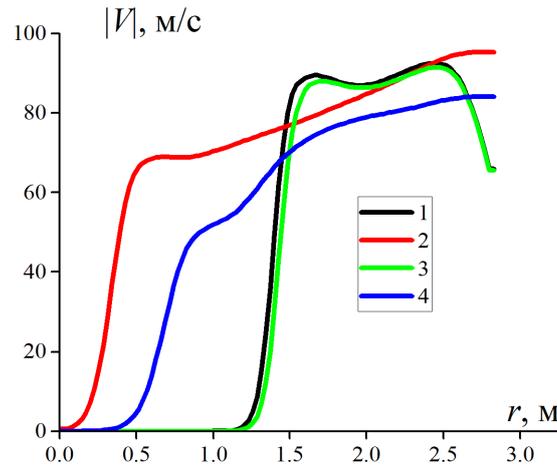


Рис. 11. Пространственное распределение скорости газа и несущей среды газозвеси:

- 1 — однородный газ в момент времени $t = 1,9$ мс;
- 2 — однородный газ в момент времени $t = 4,8$ мс;
- 3 — несущая среда газозвеси в момент времени $t = 1,9$ мс;
- 4 — несущая среда газозвеси в момент времени $t = 4,8$ мс

При прохождении ударной волны через газозвесь спутный поток, движущийся за ударной волной, подхватывает и уносит частицы дисперсной фазы. Дисперсные включения, подхваченные спутным потоком, движутся в направлении распространения ударной волны (рис. 12). По мере продвижения спутного потока средняя плотность дисперсной фазы изменяется. На участках, близких к начальной границе разделения однородного газа и газозвеси, происходит уменьшение средней плотности дисперсной фазы в направлении движения несущей среды (см. рис. 13). Так как граничные условия описывают открытую область, то вблизи границ области спутный поток уносит частицы за границы области моделирования течения.

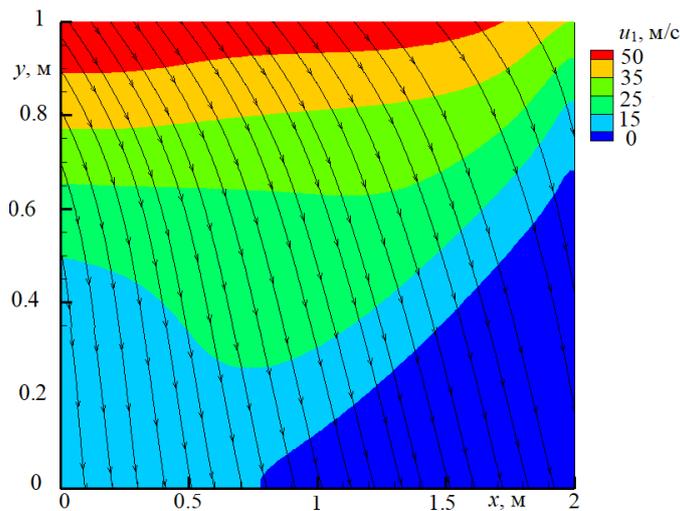


Рис. 12. Пространственное распределение средней плотности дисперсной фазы, момент времени $t = 4,8$ мс

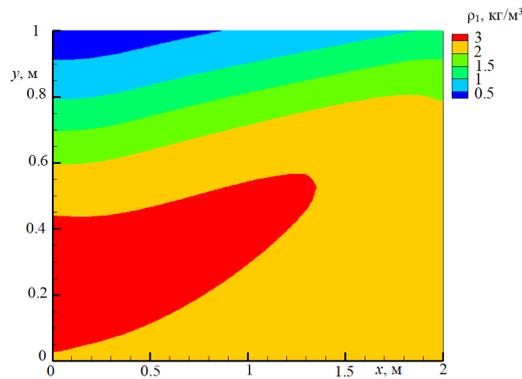


Рис. 13. Линии тока течения дисперсной фазы, момент времени $t = 4,8$ мс

В процессе движения спутного ударной волне потока газа происходит увеличение концентрации дисперсной фазы за счет переноса частиц с участков расчетной области, ближе расположенных к начальной границе, разделяющей газ и газовзвесь, после чего происходит удаление частиц спутным потоком газа (рис. 14).

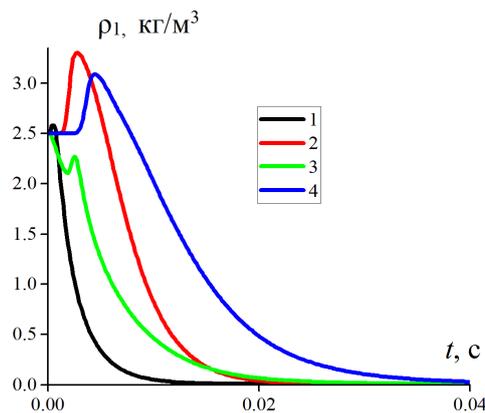


Рис. 14. Временная зависимость средней плотности дисперсной фазы:

- 1 — угол падения ударной волны $\beta = 0$, $x = 0,5L$, $y = 0,45L$;
- 2 — угол падения ударной волны $\beta = \pi/2$, $x = 0,5L$, $y = 0,25L$;
- 3 — угол падения ударной волны $\beta = 0$, $x = 0,5L$, $y = 0,45L$;
- 4 — угол падения ударной волны $\beta = 0$, $x = 0,5L$, $y = 0,25L$

Процесс удаления дисперсных частиц гораздо более длительный, чем непосредственно прохождение ударной волны, таким образом газ очищается от дисперсной смеси не самой ударной волной, а спутным потоком, движущимся за ударной волной. Для угла падения $\beta = 0$ в точке, более удаленной от начального положения границы, разделяющей однородный газ и газовзвесь — $x = 0,5L$, $y = 0,25L$, концентрирование дисперсной фазы более интенсивно, частицы удаляются из газа в течение $t = 23$ мс; в точке, находящейся ближе к границе раздела сред — $x = 0,5L$, $y = 0,45L$, концентрирование частиц менее интенсивно, удаление дисперсной фазы происходит в течение меньшего времени — $t = 12$ мс. Для угла падения $\beta = \pi/4$ в точке $x = 0,5L$, $y = 0,25L$ дисперсная фаза удаляется в течение $t = 37$ мс; в точке $x = 0,5L$, $y = 0,45L$ дисперсная фаза удаляется в течение $t = 19$ мс. При падении ударной волны на газовзвесь под

углом процесс удаления дисперсных включений из газа является более длительным, чем в случае прямого падения ударной волны.

Заключение

В работе численно моделировалось взаимодействие ударной волны, движущейся из однородного газа, с газозвесью. Математическая модель учитывала вязкость и теплопроводность несущей среды, а также взаимодействие между несущей средой и дисперсной фазой. Выявлено, что наличие в вязкой теплопроводной среде достаточно плотной (объемное содержание $\alpha = 0,001$) пылевой взвеси приводит к тому, что в результате межфазного взаимодействия происходит уменьшение скорости движения ударной волны и одновременно усиливается скачок давления за ее фронтом в сравнении с незапыленной средой. Результаты расчетов демонстрируют, что косое падение ударной волны из чистого газа в слой газопылевой смеси приводит к изменению направления движения ударной волны в сравнении с однородной средой. Отличия динамики несущей среды газозвеси от динамики однородного газа возможно объяснить поглощением кинетической энергии несущей среды дисперсной фазой вследствие межфазного взаимодействия. При движении спутной ударной волне потока газа по газозвеси процесс удаления дисперсных частиц из газа при падении ударной волны на газозвесь под углом более длительный, чем в случае прямого падения ударной волны на газозвесь. Выявленные закономерности возможно использовать в технологиях, работающих с ударно-волновыми течениями запыленных и газокапельных сред.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр РАН».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газопылевые структуры в окрестности рукавов спиральных галактик / В. В. Королев, И. Г. Коваленко, М. А. Безбородов, М. А. Еремин, В. В. Савин // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2022. — № 1 (25). — С. 49–68. — DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.1.4>
2. Гильфанов, А. К. Определение поля концентрации частиц в задаче аспирации аэрозоля в движущемся воздухе / А. К. Гильфанов, Ш. Х. Зарипов // Механика жидкости и газа. — 2008. — № 4. — С. 71–81.
3. Губайдуллин, Д. А. Отражение акустических волн, падающих под прямым углом на границу раздела двух многофракционных газозвесей / Д. А. Губайдуллин, Е. А. Тергулова, Д. Д. Губайдуллина // Теплофизика высоких температур. — 2019. — № 3 (57). — С. 453–458. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S0040364419030049>
4. Дейч, М. Е. Газодинамика двухфазных сред / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. — М. : Энергоиздат, 1981. — 472 с.
5. Жилин, А. А. Применение схемы TVD для расчета двухфазных течений с различными скоростями и давлениями компонентов / А. А. Жилин, А. В. Федоров // Математическое моделирование. — 2008. — № 1 (20). — С. 29–47. — DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048209010086>

6. Кутушев, А. Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах / А. Г. Кутушев. — СПб. : Недра, 2003. — 284 с.
7. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. В. Лифшиц. — М. : Наука, 1986. — 736 с.
8. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. — М. : Дрофа, 2003. — 784 с.
9. Музафаров, И. Ф. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа / И. Ф. Музафаров, С. В. Утюжников // Математическое моделирование. — 1993. — № 3 (5). — С. 74–83.
10. Нигматулин, Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. — М. : Наука, 1978. — 336 с.
11. Тропин, Д. А. Физико-математическое моделирование ослабления гомогенных и гетерогенных детонационных волн облаками капель воды / Д. А. Тропин, С. А. Лаврук // Физика горения и взрыва. — 2022. — № 3 (58). — С. 80–90. — DOI: <https://doi.org/10.15372/FGV20220308>
12. Тукмаков А.Л. Программа для ЭВМ «Программный код для моделирования динамики однородных и дисперсных сред явным методом Мак-Кормака в обобщенных криволинейных координатах (2D)»: Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018616542. Заявка №2018616542 от 19.06.2018. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 02.08.2018. / А.Л. Тукмаков (Россия)
13. Тукмаков, А. Л. Динамика заряженной газозвеси с начальным пространственно неравномерным распределением средней плотности дисперсной фазы при переходе к равновесному состоянию / А. Л. Тукмаков, Д. А. Тукмаков // Теплофизика высоких температур. — 2017. — № 4 (55). — С. 509–512. — DOI: <http://dx.doi.org/10.7868/S004036441703022X>
14. Тукмаков, Д. А. Численное моделирование взаимодействия газозвеси с ударной волной континуальными математическими моделями с идеальной и диссипативными несущими средами / Д. А. Тукмаков // Вестник ЮУрГУ. Вычислительная математика и информатика. — 2022. — № 4 (11). — С. 67–87. — DOI: <http://dx.doi.org/10.7868/S004036441703022X>
15. Тукмаков, Д. А. Исследование сеточной сходимости явного метода Мак-Кормака, примененного к моделированию течения электрически заряженного аэрозоля, вызванного движением дисперсных частиц под действием внутреннего электрического поля / Д. А. Тукмаков // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. — 2021. — № 1. — С. 39–53. — DOI: <http://dx.doi.org/10.18384/2310-7251-2021-1-39-53>
16. Тукмаков, Д. А. Численное моделирование колебаний вязкого газа с дисперсными включениями с частотой первого линейного резонанса в закрытом канале / Д. А. Тукмаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. — 2022. — № 3 (63). — С. 58–71. — DOI: <http://dx.doi.org/10.21685/2072-3040-2022-3-6>
17. Тукмаков, Д. А. Сопоставление численных расчетов континуальной математической модели динамики монодисперсного аэрозоля в акустическом резонаторе — закрытой трубе с физическим экспериментом / Д. А. Тукмаков // Вестник Омского университета. — 2022. — № 2 (27). — С. 40–46. — DOI: <http://dx.doi.org/10.24147/1812-3996.2022>
18. Ударно-волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах / С. П. Киселев, Г. А. Руев, А. П. Трунев, В. М. Фомин, М. Ш. Шавалеев. — Новосибирск : Наука, 1992. — 261 с.
19. Федоров, А. В. Волновые процессы в газозвезях частиц металлов / А. В. Федоров, В. М. Фомин, Т. А. Хмель. — Новосибирск : Параллель, 2015. — 301 с.
20. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2 / К. Флетчер. — М. : Мир, 1991. — 551 с.
21. Deledicque, V. An Exact Riemann Solver for Compressible Two-Phase Flow Models Containing Non-Conservative Products / V. Deledicque, M. Papalexandris // Journal of Computational Physics. — 2007. — № 1 (222). — P. 217–245. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2006.07.025>

22. Huang, Z. On the Interactions Between a Propagating Shock Wave and Evaporating Water Droplets / Z. Huang, H. Zhang // *Physics of Fluids*. — 2020. — № 12 (32). — Article ID: 106282. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/5.0035968>

REFERENCES

1. Korolev V.V., Kovalenko I.G., Bezborodov M.A., Eremin M.A., Savin V.V. Gazopylevye struktury v okrestnosti rukavov spiralnykh galaktik [Gas and Dust Structures in the Vicinity of the Arms of Spiral Galaxies]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2022, no. 1 (25), pp. 49-68. DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.1.4>
2. Gilfanov A.K., Zaripov Sh.Kh. Opredelenie polya kontsentratsii chastits v zadache aspiratsii aerolzolya v dvizhushchemsya vozdukhie [Determination of the Particle Concentration Field in the Problem of Aspiration of Aerosol in Moving Air]. *Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2008, no. 4, pp. 71-81.
3. Gubaydullin D.A., Teregulova E.A., Gubaydullina D.D. Otrazhenie akusticheskikh voln, padayushchikh pod pryamym uglom na granitsu razdela dvukh mnogofraktsionnykh gazovzvesey [Reflection of Acoustic Waves Incident at Right Angles to the Interface Between Two Multifractional Gas Suspensions]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2019, no. 3 (57), pp. 453-458. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S0040364419030049>
4. Deych M.E., Filippov G.A. *Gazodinamika dvukhfaznykh sred* [Gas Dynamics of Two-Phase Media]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 472 p.
5. Zhilin A.A., Fedorov A.V. Primenenie skhemy TVD dlya rascheta dvukhfaznykh techeniy s razlichnymi skorostyami i davleniyami komponentov [Application of the TVD Scheme for Calculating Two-Phase Flows with Different Velocities and Pressures of the Components]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2008, no. 1 (20), pp. 29-47. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048209010086>
6. Kutushev A.G. *Matematicheskoe modelirovanie volnovykh protsessov v aerodispersnykh i poroshkoobraznykh sredakh* [Mathematical Modeling of Wave Processes in Aerodisperse and Powdery Media]. Saint Petersburg, Nedra Publ., 2003. 284 p.
7. Landau L.D., Lifshits E.V. *Teoreticheskaya fizika. Gidrodinamika* [Theoretical Physics. Hydrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 736 p.
8. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of Fluid and Gas]. Moscow, Drofa Publ., 2003. 784 p.
9. Muzafarov I.F., Utyuzhnikov S.V. Primenenie kompaktnykh raznostnykh skhem k issledovaniyu nestatsionarnykh techeniy szhimaemogo gaza [Application of Compact Difference Schemes to the Study of Unsteady Flows of Compressible Gas]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 1993, no. 3 (5), pp. 74-83.
10. Nigmatulin R.I. *Osnovy mekhaniki geterogennykh sred* [Fundamentals of Mechanics of Heterogeneous Media]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 336 p.
11. Tropin D.A., Lavruk S.A. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie oslableniya gomogennykh i geterogennykh detonatsionnykh voln oblakami kapel vody [Physico-Mathematical Modeling of the Attenuation of Homogeneous and Heterogeneous Detonation Waves by Clouds of Water Droplets]. *Fizika goreniya i vzryva*, 2022, no. 3 (58), pp. 80-90. DOI: <https://doi.org/10.15372/FGV20220308>
12. Tukmakov A.L. Programma dlya EVM «Programmnyy kod dlya modelirovaniya dinamiki odnorodnykh i dispersnykh sred yavnym metodom Mak-Kormaka v obobshchennykh krivolinyeynykh koordinatakh (2D)». № 2018616542 zayavl. 02.08.2018 opubl. 19.06.2018. [Computer Program “Program Code for Modeling the Dynamics of Homogeneous and Dispersed Media Using the Explicit McCormack Method of Generalized Curvilinear Coordinates (2d)”: Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2018616542. Application No. 2018616542, Dated June 19, 2018. Date of State Registration in the Register of Computer Programs on August 2, 2018]. 2018.

13. Tukmakov A.L., Tukmakov D.A. Dinamika zaryazhennoy gazovzvesi s nachalnym prostranstvenno neravnomernym raspredeleniem sredney plotnosti dispersnoy fazy pri perekhode k ravnovesnomu sostoyaniyu [Dynamics of a Charged Gas Suspension with an Initial Spatially Uneven Distribution of the Average Density of the Dispersed Phase During the Transition to an Equilibrium State]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2017, no. 4 (55), pp. 509-512. DOI: <http://dx.doi.org/10.7868/S004036441703022X>

14. Tukmakov D.A. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya gazovzvesi s udarnoy volnoy kontinualnymi matematicheskimi modelyami s idealnoy i dissipativnymi nesushchimi sredami [Numerical Modeling of the Interaction of a Gas Suspension with a Shock Wave Using Continuum Mathematical Models with Ideal and Dissipative Carrier Media]. *Vestnik YuUrGU. Vychislitel'naya matematika i informatika*, 2022, no. 4 (11), pp. 67-87. DOI: <http://dx.doi.org/10.7868/S004036441703022X>

15. Tukmakov D.A. Issledovanie setochnoy skhodimosti yavnogo metoda Mak-Kormaka, primenyonnogo k modelirovaniyu techeniya elektricheskii zaryazhenogo aerolya, vyzvannogo dvizheniem dispersnykh chastits pod deystviem vnutrennego elektricheskogo polya [Study of the Grid Convergence of the Explicit McCormack Method Applied to Modeling the Flow of an Electrically Charged Aerosol Caused by the Movement of Dispersed Particles under the Influence of an Internal Electric Field]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-Matematika*, 2021, no. 1, pp. 39-53. DOI: <http://dx.doi.org/10.18384/2310-7251-2021-1-39-53>

16. Tukmakov D.A. Chislennoe modelirovanie kolebaniy vyazkogo gaza s dispersnymi vklucheniymi s chastotoy pervogo lineynogo rezonansa v zakrytom kanale [Numerical Modeling of Vibrations of a Viscous Gas with Dispersed Inclusions at the Frequency of the First Linear Resonance in a Closed Channel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2022, no. 3 (63), pp. 58-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.21685/2072-3040-2022-3-6>

17. Tukmakov D.A. Sopostavlenie chislennykh raschetov kontinualnoy matematicheskoy modeli dinamiki monodispersnogo aerolya v akusticheskom rezonatore – zakrytoy trube s fizicheskim eksperimentom [Comparison of Numerical Calculations Continuum Mathematical Model of the Dynamics of a Monodisperse Aerosol in an Acoustic Resonator – a Closed Pipe with a Physical Experiment]. *Vestnik Omskogo universiteta*, 2022, no. 2 (27), pp. 40-46. DOI: <http://dx.doi.org/10.24147/1812-3996.2022>

18. Kiselev C.P., Ruev G.A., Trunev A.P., Fomin V.M., Shavaleev M.Sh. *Udarno-volnovyye protsessy v dvukhkompontnykh i dvukhfaznykh sredakh* [Shock Wave Processes in Two-Component and Two-Phase Media]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 261 p.

19. Fedorov A.V., Fomin V.M., Khmel T.A. *Volnovyye protsessy v gazovzvesyakh chastits metallov* [Wave Processes in Gas Suspensions of Metal Particles]. Novosibirsk, Parallel Publ., 2015. 301 p.

20. Fletcher K. *Vychislitel'nyye metody v dinamike zhidkostey. T. 2* [Wave Processes in Gas Suspensions of Metal Particles. Vol. 2]. Moscow, Mir Publ., 1991. 551 p.

21. Deledicque V., Papalexandris M. An Exact Riemann Solver for Compressible Two-Phase Flow Models Containing Non-Conservative Products. *Journal of Computational Physics*, 2007, no. 1 (222), pp. 217-245. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2006.07.025>

22. Huang Z., Zhang H. On the Interactions Between a Propagating Shock Wave and Evaporating Water Droplets. *Physics of Fluids*, 2020, no. 12 (32), article ID: 106282. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/5.0035968>

**NUMERICAL MODELING OF THE INTERACTION OF A MONODISPERSE GAS
SUSPENSION WITH A SHOCK WAVE MOVING AT AN ANGLE
TO THE SEPARATION BOUNDARY OF A HOMOGENEOUS GAS
AND A GAS SUSPENSION**

Dmitriy A. Tukmakov

Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Researcher,
The Laboratory of Continuum Mechanics,
Federal Research Center "Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences"
tukmakovda@imm.knc.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0335-8548>
Lobachevskogo St, 2, 420111 Kazan, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to the study of the influence of the dispersed phase on the dynamics of gas suspensions during numerical modeling of the dynamics of gas suspensions. In this study, based on the continuum technique of dynamics of inhomogeneous media, the interaction of a shock wave propagating from a homogeneous gas with a gas suspension was numerically simulated. For each of the components of the mixture, a complete hydrodynamic system of equations of motion was solved, which included the equations of conservation of density, the equations of conservation of the spatial components of the momentum of the mixture components, and the equations of conservation of energy of the components. The carrier medium was described as a viscous, compressible heat-conducting gas. The mathematical model took into account interfacial heat transfer. The mathematical model also took into account the interphase exchange of momentum, which included the force of aerodynamic drag, the dynamic force of Archimedes and the force of added masses. The system of equations of the mathematical model was integrated using the finite difference method. To suppress numerical oscillations, a nonlinear correction scheme was used. Large volumetric contents of the dispersed phase were considered. The influence of interfacial interaction on the process of shock wave propagation has been studied.

Key words: numerical modeling, multiphase media, continuum model, gas suspensions, shock waves.