

УДК: 519.6

Волновые и релаксационные эффекты при истечении газозвеси, частично заполняющей цилиндрический канал

Е. Н. Широкова^а, Д. В. Садин^б

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского,
Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13

E-mail: ^а shirokhelen-78@mail.ru, ^б sadin@yandex.ru

Получено 20.08.2023, после доработки — 22.09.2023.

Принято к публикации 25.09.2023.

Работа посвящена изучению волновых и релаксационных эффектов при импульсном истечении смеси газа с большим содержанием твердых частиц из цилиндрического канала при его начальном частичном заполнении. Задача сформулирована в двухскоростной двухтемпературной постановке и решалась численно гибридным методом крупных частиц второго порядка аппроксимации. Численный алгоритм реализован в виде параллельных вычислений с использованием базовых языковых средств Free Pascal. Применимость и точность метода для волновых потоков концентрированных газозвесей подтверждены сопоставлением с тестовыми асимптотически точными решениями. Погрешность расчета на сетке невысокой детализации в характерных зонах течения двухфазной среды составила $10^{-6} \dots 10^{-5}$.

На основе волновой диаграммы выполнен анализ физической картины истечения газозвеси, частично заполняющей цилиндрический канал. Установлено, что в зависимости от степени начального заполнения канала формируются различные режимы истечения. Первый режим реализуется при небольшой степени загрузки камеры высокого давления, при которой левая граница смеси газа и частиц пересекает выходное сечение до прихода отраженной от дна канала волны разрежения. При этом достигается максимальное значение массового расхода смеси. Другие режимы формируются в случаях большего начального заполнения канала, когда отраженные от дна канала волны разрежения взаимодействуют со слоем газозвеси и уменьшают интенсивность ее истечения.

Изучено влияние релаксационных свойств при изменении размеров частиц на динамику ограниченного слоя газодисперсной среды. Сопоставление истечения ограниченного слоя газозвеси с различными размерами частиц показывает, что для мелких частиц (число Стокса меньше 0,001) наблюдается аномальное явление одновременного существования ударно-волновых структур в сверх- и дозвуковом потоке газа и взвеси. С увеличением размеров дисперсных включений скачки уплотнения в области двухфазной смеси сглаживаются, а для частиц (число Стокса больше 0,1) — практически исчезают. При этом ударно-волновая конфигурация сверхзвукового газового потока на выходе из канала сохраняется, а положения и границы энергонесущих объемов газозвеси при изменении размеров частиц близки.

Ключевые слова: газозвесь, истечение, релаксация, ударно-волновые структуры

UDC: 519.6

Wave and relaxation effects during the outflow of a gas suspension partially filling a cylindrical channel

E. N. Shirokova^a, D. V. Sadin^b

Mozhaisky Military Aerospace Academy,
13 Zhdanovskaya st., Saint Petersburg, 197198, Russia

E-mail: ^a shirokhelen-78@mail.ru, ^b sadin@yandex.ru

Received 20.08.2023, after completion — 22.09.2023.

Accepted for publication 25.09.2023.

The paper is devoted to the study of wave and relaxation effects during the pulsed outflow of a gas mixture with a high content of solid particles from a cylindrical channel during its initial partial filling. The problem is formulated in a two-speed two-temperature formulation and was solved numerically by the hybrid large-particle method of the second order of approximation. The numerical algorithm is implemented in the form of parallel computing using basic Free Pascal language tools. The applicability and accuracy of the method for wave flows of concentrated gas-particles mixtures is confirmed by comparison with test asymptotically accurate solutions. The calculation error on a grid of low detail in the characteristic flow zones of a two-phase medium was $10^{-6} \dots 10^{-5}$.

Based on the wave diagram, the analysis of the physical pattern of the outflow of a gas suspension partially filling a cylindrical channel is performed. It is established that, depending on the degree of initial filling of the channel, various outflow modes are formed. The first mode is implemented with a small degree of loading of the high-pressure chamber, at which the left boundary of the gas-particles mixture crosses the outlet section before the arrival of the rarefaction wave reflected from the bottom of the channel. At the same time, the maximum value of the mass flow rate of the mixture is achieved. Other modes are formed in cases of a larger initial filling of the channel, when the rarefaction waves reflected from the bottom of the channel interact with the gas suspension layer and reduce the intensity of its outflow.

The influence of relaxation properties with changing particle size on the dynamics of a limited layer of a gas-dispersed medium is studied. Comparison of the outflow of a limited gas suspension layer with different particle sizes shows that for small particles (the Stokes number is less than 0.001), an anomalous phenomenon of the simultaneous existence of shock wave structures in the supersonic and subsonic flow of gas and suspension is observed. With an increase in the size of dispersed inclusions, the compaction jumps in the region of the two-phase mixture are smoothed out, and for particles (the Stokes number is greater than 0.1), they practically disappear. At the same time, the shock-wave configuration of the supersonic gas flow at the outlet of the channel is preserved, and the positions and boundaries of the energy-carrying volumes of the gas suspension are close when the particle sizes change.

Keywords: gas suspension, outflow, relaxation, shock-wave structures

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2023, vol. 15, no. 6, pp. 1495–1506 (Russian).

Введение

Теоретические и экспериментальные исследования импульсных потоков смесей газа и частиц представляют интерес при изучении природных явлений, например извержения вулканов [Ступицкий, Андрущенко, 2020; Cigala et al., 2021]. Обоснование параметров двухфазных импактных течений связано с разработкой и совершенствованием технологий газодинамического напыления [Алхимов и др., 2010], металлургических процессов пневматической порошковой инъекции в расплавленные металлические сплавы [Jeziarski, Janerka, 2015]. Импульсные газодисперсные струи изучаются с целью повышения эффективности систем пожаротушения [Зуев и др., 2012] и ликвидации аварийных ситуаций и загрязнений при инцидентах на экологически опасных производствах [Беляев и др., 2018].

Физико-математическая формулировка динамики газозвесей определяется рядом факторов: степенью приближения решаемой задачи в равновесной или неравновесной, вязкой или невязкой, эйлеровой, лагранжевой или комбинированной постановке [Crowe et al., 2011]. Математическим следствием выбора законов сохранения являются гиперболический или составной тип системы уравнений, недивергентность градиентов, жесткость при существенном различии масштабов релаксаций фаз. Эти свойства накладывают ограничения и мотивируют предпочтения при выборе численных методов решения задач, основанных на схемах Годунова [Saurel, Abgrall, 1999; Меньшов, 2016], разрывном методе Галёркина [Kummer, 2017; Алексеев, 2023], реконструкции WENO (weighted essentially non-oscillatory) [Xing, Shu, 2006; Balsara et al., 2023], сеточно-характеристической аппроксимации [Петров и др., 2013; Суров, 2023], высокоточных алгоритмах метода крупных частиц [Садин, 2016; Садин, 2022c], аппроксимации SPH (Smoothed particle hydrodynamics) [Stoyanovskaya et al., 2021; Zhang et al., 2022] и других дискретных представлениях законов сохранения двухфазных сред.

Газовые потоки с взвешенными частицами в ряде случаев сопровождаются неочевидными физическими эффектами. В работе [Frost et al., 2012] приведены экспериментально зафиксированные эффекты образования аэродинамически стабильных когерентных кластеров частиц при их радиальном расширении в спутном потоке ударной волны. Формирование областей с повышенным содержанием дисперсной фазы в вихревых потоках отмечено в работе [Emelyanov, Volkov, 2022]. Образование структуры прямой и косой волн уплотнения в газокapельной среде, при наличии испарения на поверхности капель, изучено в [Голубкина, Осипцов, 2022].

В работах [Садин, Гузенков, Любарский, 2005; Садин, Любарский, Гравченко, 2017] приведены теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные результаты интересного физического явления аномальной группировки частиц в ударно-волновую структуру на дозвуковом режиме течения несущего газа. В импульсной неоднородной струе газозвеси выявлены эффекты одновременного существования до- и сверхзвуковой конфигурации с ударными волнами, а также резонансного увеличения массового расхода смеси по сравнению с однородным потоком [Широкова, 2022].

В настоящей работе истечение газозвеси, частично заполняющей цилиндрический канал, изучается численно, с использованием гибридного метода крупных частиц. Выбор метода мотивирован его простотой, универсальностью и высокой разрешающей способностью, превосходящей по ряду тестов популярную схему WENO5 и сопоставимой с WENO9 [Садин, 2022b]. Для подтверждения применимости метода для случаев высокой концентрации частиц производится сравнение с решениями тестовых задач, имеющих асимптотически точные решения. Режимы истечения газозвеси анализируется на волновой диаграмме. Изучается влияние релаксационных свойств при изменении размеров частиц и степени начального заполнения канала на динамику ограниченного слоя газодисперсной среды.

1. Основные уравнения

Неравновесную динамику газозвеси опишем в рамках взаимопроникающих континуумов [Нигматулин, 1987]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \nabla_d \mathbf{G} + \mathbf{B}(\nabla_d \mathbf{F}) &= \mathbf{H}(\mathbf{q}), \\ \mathbf{q} &= [\rho_1, \rho_2, \rho_1 \mathbf{v}_1, \rho_2 \mathbf{v}_2, \rho_2 e_2, \rho_1 E_1 + \rho_2 K_2]^T, \\ \mathbf{G} &= [\rho_1 \mathbf{v}_1, \rho_2 \mathbf{v}_2, \rho_1 \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_1, \rho_2 \mathbf{v}_2 \mathbf{v}_2, \rho_2 e_2 \mathbf{v}_2, \rho_1 E_1 \mathbf{v}_1 + \rho_2 K_2 \mathbf{v}_2]^T, \\ \mathbf{F} &= [0, 0, p, p, 0, p(\alpha_1 \mathbf{v}_1 + \alpha_2 \mathbf{v}_2)]^T, \quad \mathbf{H} = [0, 0, -\mathbf{F}_\mu, \mathbf{F}_\mu, Q_T, -Q_T]^T, \\ \nabla_d &= \text{diag}(\nabla \cdot, \nabla \cdot, \nabla, \nabla, \nabla \cdot, \nabla \cdot), \quad \mathbf{B} = \text{diag}[1, 1, \alpha_1, \alpha_2, 1, 1], \\ \rho_i &= \rho_i^\circ \alpha_i \quad (i = 1, 2), \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad E_1 = e_1 + \frac{\mathbf{v}_1^2}{2}, \quad K_2 = \frac{\mathbf{v}_2^2}{2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Параметры газовой и дисперсной фаз обозначены нижним индексом 1 и 2 соответственно; ∇ — оператор Гамильтона. $\alpha_i, \rho_i^\circ, \rho_i, \mathbf{v}_i, E_i, e_i, p$ — объемная доля, истинная и приведенная плотности, вектор скорости с проекциями u_i и v_i , полная и внутренняя энергии единицы массы i -й фазы, давление газа; $\rho = \rho_1 + \rho_2$ — плотность смеси; \mathbf{F}_μ, Q_T — вектор вязкой составляющей силы межфазного взаимодействия и мощность теплообмена между газом и частицами в единице объема; t — время.

Система (1) замыкается уравнением состояния идеального калорически совершенного газа и несжимаемых твердых частиц:

$$p = (\gamma_1 - 1)\rho_1^\circ e_1, \quad e_1 = c_v T_1, \quad e_2 = c_2 T_2, \quad \{\gamma_1, c_v, c_2, \rho_2^\circ\} \equiv \text{const},$$

где T_1, T_2 — температура несущей фазы и частиц; γ_1, c_v — показатель адиабаты и удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; c_2 — удельная теплоемкость частиц.

Динамическое и тепловое взаимодействие фаз \mathbf{F}_μ, Q_T определено из соотношений [Нигматулин, 1987].

2. Метод расчета и его верификация

Для расчетов используем алгоритм CDP2-CC (Customizable Dissipative Properties Centered-Centered) гибридного метода крупных частиц [Садин, 2022с]. Ранее метод тестировался на задачах Римана для случаев малых и умеренных концентраций дисперсной фазы [Садин, 2022а]. Поскольку в настоящей работе рассматриваются течения газозвесей со значительной долей частиц, то представляется целесообразным выполнить проверку работоспособности алгоритма CDP2-CC для этих условий. Все расчеты выполнены с числом Куранта CFL = 0,4. Численный алгоритм реализован в виде параллельных вычислений с использованием встроенных средств многопоточности (TThread и TEvent) языка программирования Free Pascal.

Рассмотрим одномерную задачу распада произвольного разрыва в сечении $x = 0$ с образованием волны разрежения и ударной волны (тест 1). Используем начальные данные из работы [Суров, 2023], обозначая верхним индексом (1) параметры слева ($x \leq 0$) от разрыва и справа от него (0) при $x > 0$: $p^{(1)} = 0,5$; $p^{(0)} = 0,1$ МПа; $\rho^{(1)} = \rho^{(0)} = 101,1$ ($\rho_1^{(1)} = \rho_1^{(0)} = 1,19$) кг/м³; $u_i^{(1)} = u_i^{(0)} = 0$ (скорости фаз); $\alpha_2^{(1)} = \alpha_2^{(0)} = 0,1$; $\gamma_1 = 1,4$; $\rho_2^\circ = 1000$ кг/м³. Размер расчетной области: $-L < x < L$, $L = 40$ м. Слева и справа поставлены граничные условия непротекания. Расчеты выполнены на равномерной сетке, содержащей 400 ячеек.

Результаты решения поставленной задачи получены в рамках неравновесной модели (1) для частиц размером $d = 1$ мкм и приведены на рис. 1 (сплошные тонкие кривые) в момент

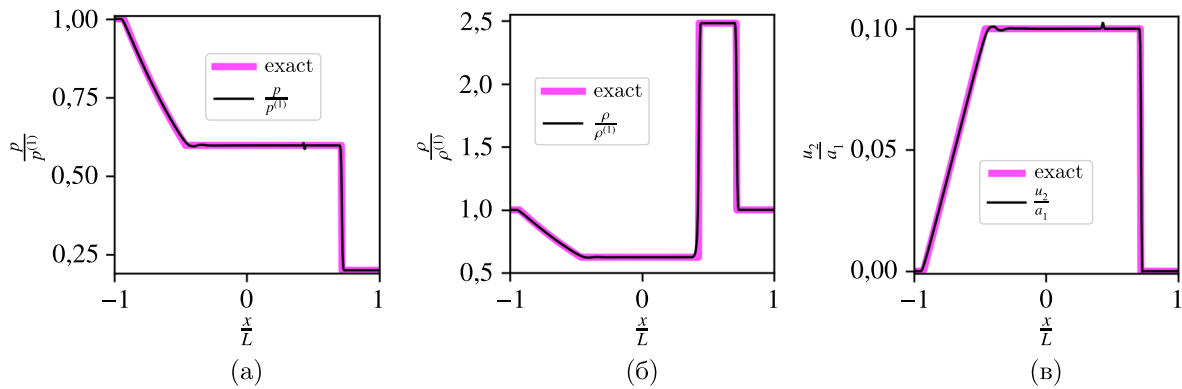


Рис. 1. Распределения относительных величин давления (а), плотности смеси (б) и скорости частиц (в) для $d = 1$ мкм в момент времени $t_f = 0,5$ с (тест 1)

времени $t_f = 0,5$ с. Для сопоставления здесь представлены асимптотически точные решения, рассчитанные по соотношениям [Садин, 2022а].

Численное неравновесное решение близко к асимптотически точному. Например, погрешность расчета плотности смеси $\frac{\rho - \rho_{\text{exact}}}{\rho_{\text{exact}}}$ за ударной волной в точке $\frac{x}{L} = 0,6$ (рис. 1, б) составляет $6,74 \cdot 10^{-6}$. В сравнении с методом [Суров, 2023] алгоритм CDP2-CC дает более точные результаты на сетке в пять раз меньшей детализации. Следует также отметить, что аналитическое решение цитируемой работы не учитывает тепловую релаксацию смеси. Поэтому относительная плотность $\frac{\rho}{\rho^{(0)}} = 1,87$ за ударной волной существенно отличается от асимптотики 2,48.

В тесте 2 проверим алгоритм CDP2-CC с исходными данными, непосредственно относящимися к рассматриваемой в данной работе задаче. Задачи с большим начальным перепадом давления и плотности при их реализации различными численными методами относятся к трудным проблемам вычислительной гидродинамики (см. [Садин, 2022с] с соответствующими ссылками).

Камера высокого давления $0 \leq x < L = 1$ м содержит смесь частиц (диаметром $d = 1$ мкм, с плотностью материала $\rho_2^0 = 2500$ кг/м³, теплоемкостью $c_2 = 710$ Дж/(кг · К) с объемной долей $\alpha_2^{(1)} = 0,5$) и воздуха (с параметрами $p^{(1)} = 1$ МПа, $\rho^{(1)} = 1256$ ($\rho_1^{(1)} = 11,89$) кг/м³). В области $L \leq x < 10L$ находится чистый газ при нормальных условиях $p^{(0)} = 0,1$ МПа, $\rho^{(0)} = \rho_1^{(0)} = 1,189$ кг/м³. В начальный момент времени во всей расчетной области среда неподвижна: $u_i^{(1)} = u_i^{(0)} = 0$. Для однородности вычислений при $x > L$ объемная доля частиц задана пренебрежимо малой: $\alpha_2^{(0)} = 10^{-10}$. Граничные условия — непротекания. Расчетная сетка выбрана равномерной, с шагом $h = 0,005$ м (200 ячеек в камере высокого давления: $0 \leq x < L$). Задача решалась до момента времени $t_f = 0,02$ с.

На рис. 2 показаны расчетные профили относительных величин давления, плотности смеси и скорости частиц в двухскоростной двухтемпературной постановке задачи в сравнении с асимптотически точным решением (обозначения такие же, как и на рис. 1).

Число Стокса для заданных условий задачи мало:

$$\text{Stk} = \frac{1}{18} \frac{\rho_2^0 d^2 u_1}{\mu_1 (1 - \alpha_2) L} = 2,52 \cdot 10^{-4}.$$

Здесь μ_1 — динамическая вязкость несущего газа; u_1, α_2 — скорость газа и объемная доля частиц в сечении $\frac{x}{L} = 1$.

Отметим, что численное неравновесное решение с хорошей точностью воспроизводит асимптотику.

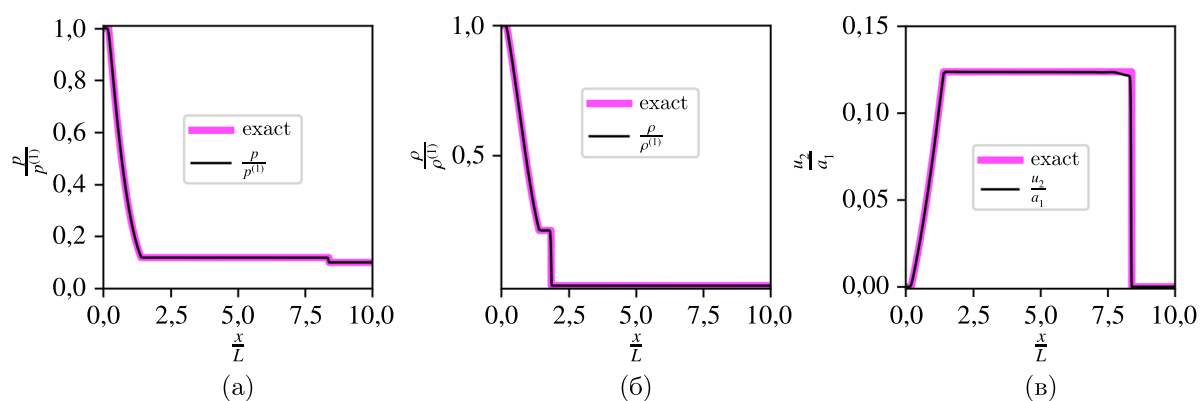


Рис. 2. Распределения относительных величин давления (а), плотности смеси (б) и скорости частиц (в) для $d = 1$ мкм в момент времени $t_f = 0,02$ с (тест 2)

3. Задача истечения газозвеси, частично заполняющей цилиндрический канал

В рассматриваемой задаче начальные условия и термодинамические постоянные составляющих фаз смеси соответствуют тесту 2, за исключением частичного начального заполнения камеры высокого давления (рис. 3). Задача решалась на равномерной сетке с шагом h с осевой симметрией. На стенках канала задавались граничные условия непротекания, а на внешних границах — мягкие краевые условия. Для уменьшения влияния последних на решение расчетная область $X \times Y$ расширена с возрастанием шагов по оси Δ_x и по радиусу Δ_y (рис. 3, штриховые прямые).

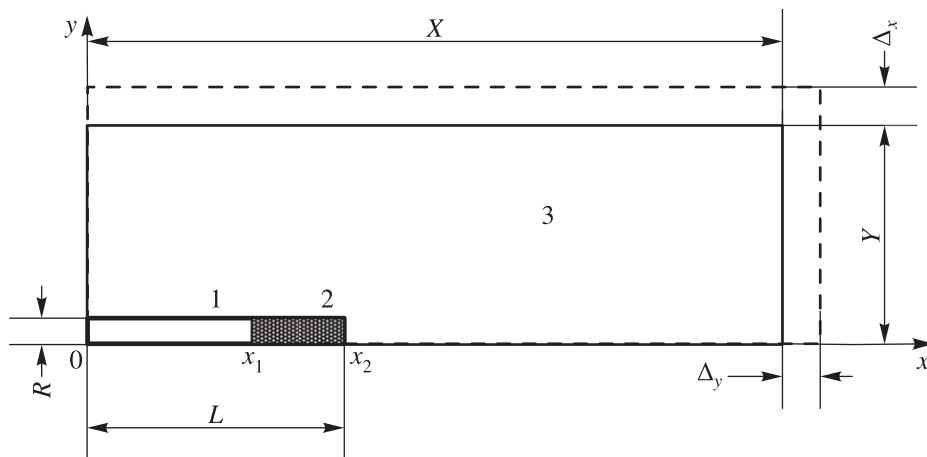


Рис. 3. Расчетная область задачи: 1 — цилиндрический канал, 2 — секция, заполненная порошком, 3 — окружающая воздушная среда

После распада начального разрыва на временном интервале $0 < t \leq t_1$ до прихода фронта волны разрежения r_1 на границу раздела сред в сечении $x = x_1$ (рис. 4) решение является автомодельным и совпадает с решением тестовой задачи 2. В момент времени t_1 происходит преломление начальной волны на границе раздела сред с образованием левой волны разрежения в чистом газе w_1 при $x < x_1$ и отраженной (правой) волны разрежения в газозвеси r_2 при $x > x_1$. С течением времени картина течения усложняется с формированием серии взаимодействующих с дном канала (w_1, w_2, \dots), интерфейсными границами (r_1, r_2, \dots) и между собой волн разрежения. При $t > t_1$ задача не имеет автомодельного решения и решалась в дальнейшем численно.

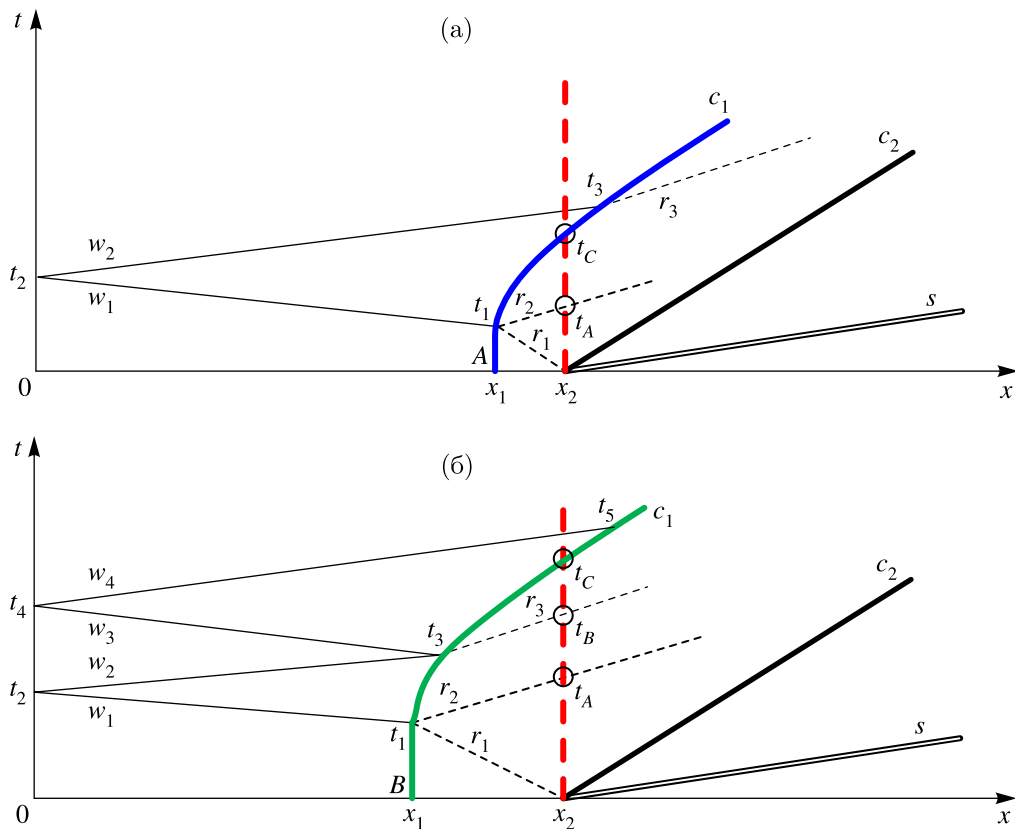


Рис. 4. Волновые диаграммы для режимов истечения A (а) и B (б). s — ударная волна, c_1, c_2 — левая и правая границы слоя, $r_1, r_2, r_3, w_1, w_2, w_3, w_4$ — волны разрежения в газозвеси и воздушной прослойке соответственно. Моменты времени преломления (t_1, t_3, t_5), отражения (t_2, t_4) волн от дна канала и пересечения (t_A, t_B, t_C) плоскости x_2

Исследуем влияние степени начального заполнения (загрузки) канала $\varphi = \frac{x_2 - x_1}{L}$ на динамику разлета газозвеси. На рис. 5, а приведены результаты расчетов безразмерного массового расхода среды $q = \frac{\rho_1 u_1 + \rho_2 u_2}{(\rho_1^{(1)} + \rho_2^{(1)}) a^{(1)}}$ [Широкова, 2022] в критическом сечении $x = x_2$ для различных величин начальной загрузки камеры высокого давления φ : 0,1; 0,2; 0,3.

Расчеты выполнены на подробной сетке $\frac{L}{h} = 2000$ в одномерной постановке — канал 1 (рис. 3) продлен до конца расчетной области. Точное значение безразмерного массового расхода равно $q^* = 0,2783$ (жирная сплошная прямая) и сохраняется до прихода в критическое сечение $x = x_2$ отраженной от дна (в случае полной загрузки $\varphi = 1$) или от левой границы раздела сред (при частичном заполнении канала $\varphi < 1$) волны разрежения.

В зависимости от степени начального заполнения газодисперсной средой канала возможны следующие режимы истечения. В случае небольшой загрузки камеры высокого давления $\varphi = 0,1$ реализуется режим A (рис. 4, а, 5), при котором левая граница смеси газа и частиц пересекает сечение $x = x_2$ до преломления отраженной волны разрежения w_2 . До момента времени t_A массовый расход — критический q^* . Затем с приходом фронта отраженной волны разрежения r_2 происходит ускорение газозвеси, и в момент t_C слой двухфазной среды покидает камеру высокого давления.

При увеличении начальной загрузки $\varphi = 0,2$ (режим B, рис. 4, б, 5) до момента времени возвращения (t_B) отраженной от стенки волны разрежения (w_2) и ее преломления (r_3) на интерфейсной границе динамика слоя газозвеси аналогична описанной выше. Пересечение фронтом волны r_3 характеризуется изломом профиля массового расхода (слабым разрывом решения).

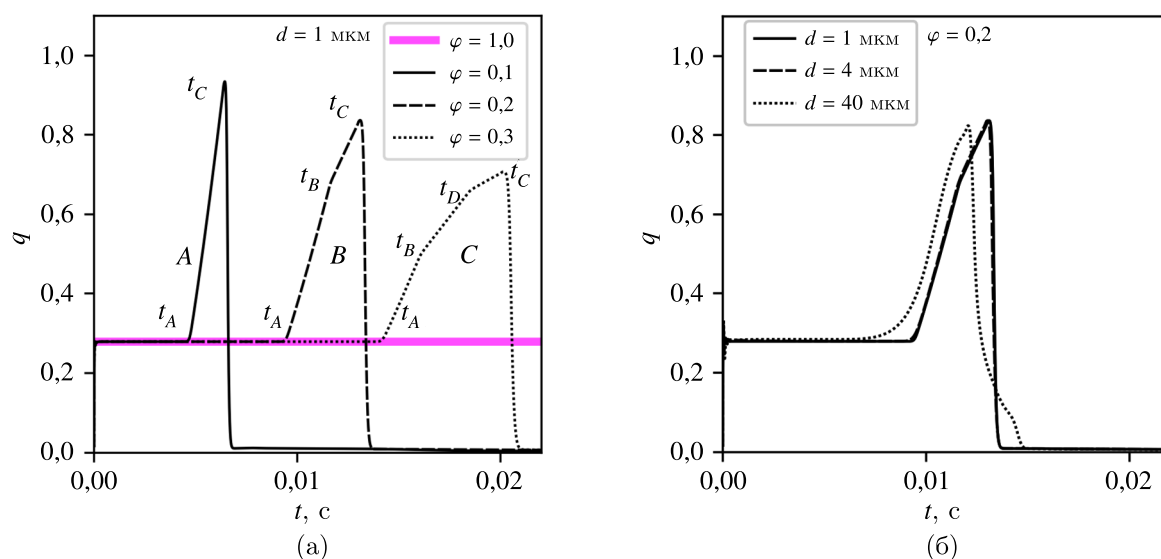


Рис. 5. Изменение во времени удельного массового расхода смеси для различных степеней начального заполнения канала (а) и размеров частиц (б)

Дальнейшее повышение степени начального заполнения камеры высокого давления газодисперсной средой $\varphi = 0,3$ сопровождается взаимодействием второй отраженной волны разрежения w_4 с границей раздела сред c_1 (случай С на рис. 5). Заметим, что отраженные от дна канала волны разрежения снижают величину максимального массового расхода смеси.

Влияние релаксационных свойств на массовый расход газозвеси для режима истечения В ($\varphi = 0,2$) при варьировании диаметра частиц $d = 1, 4, 40$ мкм, для которых числа Стокса в критическом сечении $Stk^* \cdot 10^4 = 2,516; 40,26; 4026$, показано на рис. 5, б. Существенные отклонения профиля массового расхода в сравнении с равновесным течением ($Stk^* < 0,001$) наблюдаются для достаточно крупных частиц ($Stk^* > 0,1$).

Истечение газопорошковой смеси из ограниченного цилиндрического канала (рис. 3) сопровождается двумерными эффектами. Результаты численного моделирования для случая начального заполнения $\varphi = 0,1$ с монодисперсными частицами диаметром $d = 1$ мкм в последовательные моменты времени представлены на рис. 6.

После взаимодействия первичной волны разрежения r_1 с левой границей раздела сред в момент $t_1 = 2,5$ мс отраженная волна r_2 движется в направлении выходного сечения канала. В момент времени $t = 4,5$ мс ($t < t_A \cong 5,0$ мс), показанный на рис. 6, а, газозвесь истекает с постоянным критическим массовым расходом. За срезом канала формируется аномальная ударно-волновая структура на дозвуковой скорости несущего газа.

В момент времени $t = 6,5$ мс (рис. 6, б) отраженная волна r_2 пересекла выходное сечение канала и вышла наружу. В области ее действия истекающая газодисперсная смесь ускоряется, а граница струи расширяется.

Выход левой границы слоя газозвеси из канала сопровождается ускорением газа до сверхзвуковой скорости в форме конической неизобарической струи и образованием тороидального вихря (рис. 6, в). С течением времени в области газового течения образуется «бочка» с диском Маха и наклонными скачками уплотнения (рис. 6, г). Воздействие газового потока на хвостовую часть газодисперсного слоя приводит к его сжатию и разрушению ударно-волновой структуры.

Сопоставление истечения ограниченного слоя газозвеси с различными размерами частиц в момент времени $t = 9,0$ мс показано на рис. 7. Для мелких частиц $d = 1$ мкм ($Stk^* \cdot 10^4 = 2,516$) наблюдается неочевидное (аномальное) явление одновременного существования ударно-волновых структур в сверх- и дозвуковом потоке газа и взвеси (рис. 7, а). С увеличением размеров

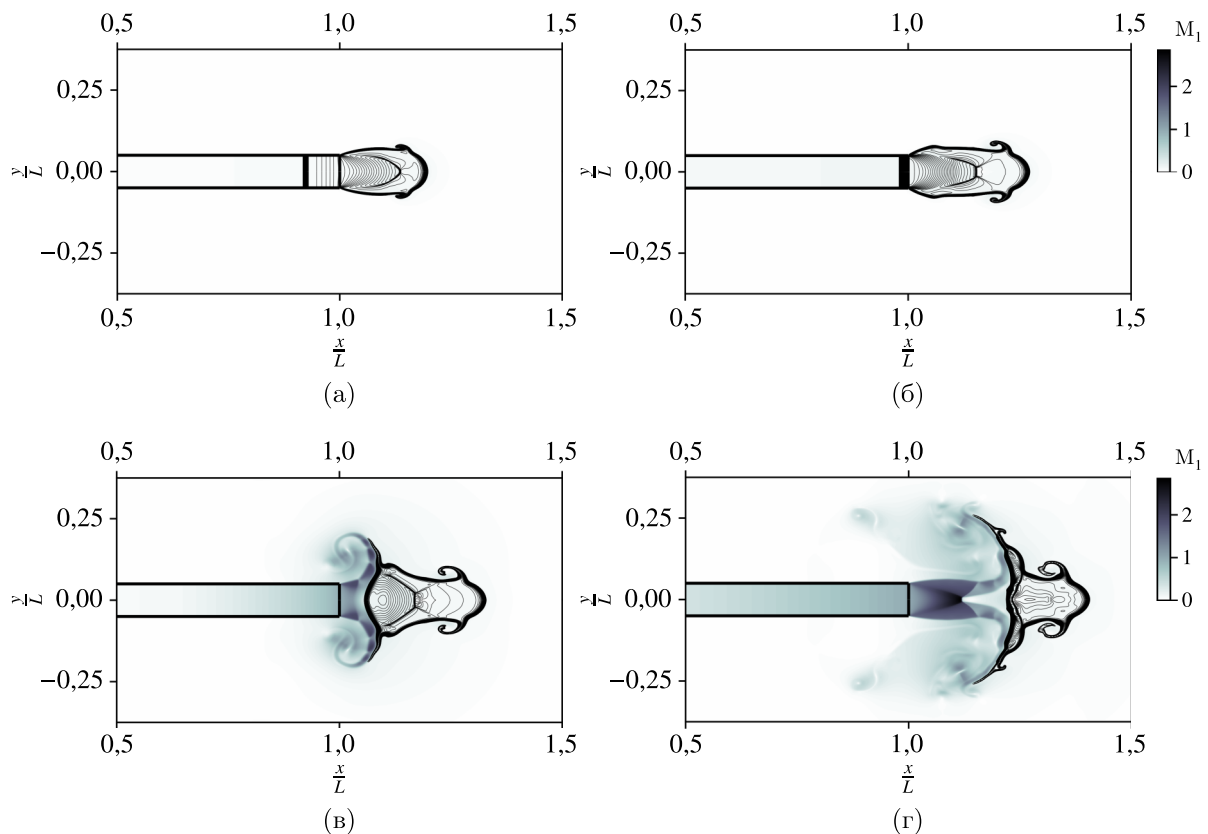


Рис. 6. Распределения в шкале оттенков серого чисел Маха $M_1 = \frac{|v_1|}{a_1}$ несущего газа и линии равных значений $-\log\left(\frac{p_2}{\rho_2^\gamma}\right)$ дисперсной фазы (51 изолиния от 0 до 2,5) для моментов времени 4,5; 6,5; 8,0; 10,0 мс соответственно (а–г)

дисперсных включений $d = 4$ мкм ($Stk^* \cdot 10^4 = 40,26$) скачки уплотнения в области двухфазной смеси сглаживаются (рис. 7, б), а для диаметров частиц $d = 8$ мкм ($Stk^* \cdot 10^4 = 161,1$) и больших — практически исчезают (рис. 7, в). При этом ударно-волновая конфигурация сверхзвукового газового потока на выходе из канала сохраняется, а положения и границы энергонесущих объемов газозвеси при изменении размеров частиц близки.

Заключение

В рамках неравновесной динамики взаимопроникающих континуумов выполнено численное и аналитическое исследование истечения газодисперсной смеси, частично заполняющей цилиндрический канал. Для расчетов использован гибридный метод крупных частиц второго порядка аппроксимации. Точность моделирования импульсных течений газозвесей с высокой концентрацией подтверждена на тестовых задачах, имеющих асимптотически точные решения. Метод характеризуется семантической и алгоритмической простотой, например в сравнении с обратным методом характеристик с дробным временным шагом. Применение гибридного метода крупных частиц продемонстрировало его высокую разрешающую способность и эффективность для численного воспроизведения тонких ударно-волновых и вихревых структур в нестационарных потоках двухфазных сред. Метод не вызывает принципиальных проблем распараллеливания расчета. В настоящей работе алгоритм реализован в виде производительного асинхронного кода.

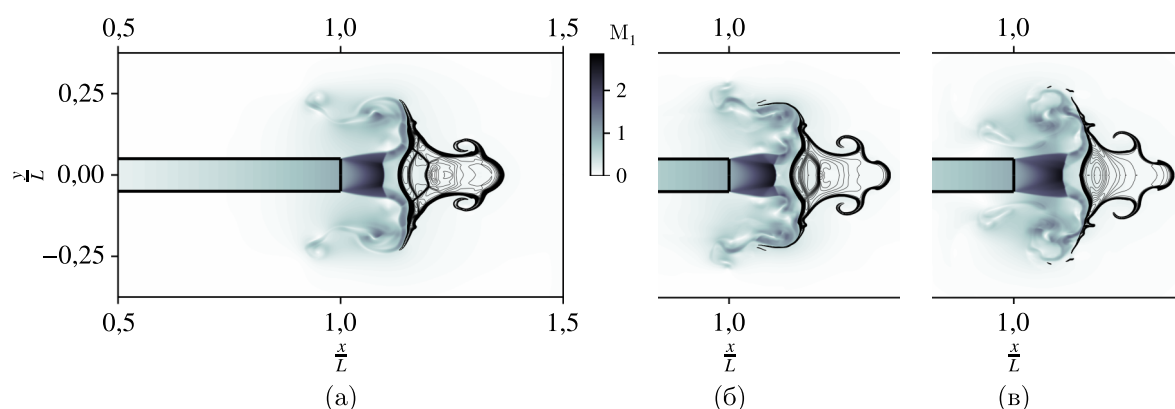


Рис. 7. Распределения в шкале оттенков серого чисел Маха $M_1 = \frac{|v_1|}{a_1}$ несущего газа и линии равных значений $-\log\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)$ дисперсной фазы (51 изолиния от 0 до 2,5) в момент времени 9,0 мс для различных размеров частиц: $d = 1$ (а), 4 (б), 8 (в) мкм

Волновой анализ выявил характерные режимы истечения газозвеси в зависимости от степени начального заполнения канала. Режим А реализуется в случае небольшой загрузки камеры высокого давления, при котором левая граница смеси газа и частиц пересекает выходное сечение до прихода отраженной от дна канала волны разрежения. При этом достигается максимальное значение массового расхода смеси. Режимы В, С формируются в случаях большего начального заполнения канала, когда отраженные от дна канала волны разрежения взаимодействуют со слоем газозвеси и уменьшают интенсивность ее истечения.

Показаны двумерные аномальные (неочевидные) эффекты образования подвижных ударно-волновых структур в сверх- и дозвуковом потоке газа и взвеси. Изучено влияние релаксационных свойств при изменении размеров частиц на динамику ограниченного слоя газодисперсной среды. Установлено, что в широком диапазоне чисел Стокса газодинамические параметры истечения, положения и границы энергонесущих объемов газозвеси стабильны.

Полученные в работе результаты открывают возможности применения компьютерных исследований на основе гибридного метода крупных частиц для совершенствования струйной порошковой технологии на этапе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Список литературы (References)

- Алексеев М. В.* Численное моделирование двухфазных течений в рамках релаксационной модели Баера–Нунциато // Вычислительные методы и программирование. — 2023. — Т. 24. — С. 182–194.
- Alekseev M. V.* Chislennoe modelirovanie dvuhfaznykh techenij v ramkah relaksacionnoj modeli Baer–Nunziato [Numerical algorithms for solving two-phase flows based on relaxation Baer–Nunziato model] // Vychislitel'nye metody i programmirovaniye [Numerical Methods and Programming]. — 2023. — Vol. 24. — P. 182–194 (in Russian).
- Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М.* Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. — М.: Физматлит, 2010. — 536 с.
- Alhimov A. P., Klinkov S. V., Kosarev V. F., Fomin V. M.* Holodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teorija i praktika [Cold gas dynamic spraying. Theory and practice]. — Moscow: Fizmatlit, 2010. — 536 p. (in Russian).
- Беляев Б. В., Голиков И. О., Давидчук В. А., Садин Д. В.* Моделирование эволюции дисперсных реагентов для подавления негативных факторов аварий на пожаровзрывоопасных объектах // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Сер. 1: Естественные и технические науки. — 2018. — № 4. — С. 41–45.
- Belyaev B. V., Golikov I. O., Davidchuk V. A., Sadin D. V.* Modelirovanie jevoljucii dispersnykh reagentov dlja podavlenija negativnykh faktorov avarij na pozharovzryvoopasnykh ob'ektah [Modeling the evolution of dispersed reagents to suppress negative factors of accidents at fire and explosive objects] // Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Ser. 1. Natural and technical science. — 2018. — No. 4. — P. 41–45 (in Russian).

- Голубкина И. В., Осипцов А. Н. Волны уплотнения с частичной и полной дисперсией в газо-капельной среде с фазовыми переходами // Известия РАН. Механика жидкости и газа. — 2022. — № 3. — С. 44–55.
- Golubkina I. V., Osipsov A. N. Partly and fully dispersed compression waves in a gas-droplet mixture with phase transitions // Fluid Dyn. — 2022. — Vol. 57. — P. 261–272. (Original Russian article: Golubkina I. V., Osipsov A. N. Volny uplotnenija s chastichnoj i polnoj dispersiej v gazokapel'noj srede s fazovymi perehodami // Izvestija RAN. Mehanika zhidkosti i gaza. — 2022. — No. 3. — P. 44–55.)
- Зуев Ю. В., Лепешинский И. А., Решетников В. А., Истомин Е. А. Особенности двухфазных струй с большой концентрацией дисперсной фазы // Матем. моделирование. — 2012. — Т. 24, № 1. — С. 129–142.
- Zuev Yu. V., Lepeshinsky I. A., Reshetnikov V. A., Istomin E. A. Osobennosti dvuhfaznyh struj s bol'shoj koncentraciej dispersnoj fazy [Features of two-phase jets with big concentration of the disperse phase] // Matem. modelirovanie. — 2012. — Vol. 24, No. 1. — P. 129–142 (in Russian).
- Меньшов И. С. Точные и приближенные решения задачи Римана для уравнений сжимаемых двухфазных течений // Матем. моделирование. — 2016. — Т. 28, № 12. — С. 33–55.
- Menshov I. S. Exact and approximate Riemann solvers for compressible two-phase flows // Math. Models Comput. Simul. — 2017. — Vol. 9. — P. 405–422. (Original Russian article: Menshov I. S. Tochnye i priblizhennye reshenija zadachi Rimana dlja uravnenij szhimaemyh dvuhfaznyh techenij // Matem. modelirovanie. — 2016. — Vol. 28, No. 12. — P. 33–55.)
- Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. — М.: Наука, 1987. — 464 с.
- Nigmatulin R. I. Dinamika mnogofaznyh sred [Dynamics of multiphase media]. Part 1. — Moscow: Nauka, 1987. — 464 p. (in Russian).
- Петров И. Б., Фаворская А. В., Санников А. В., Квасов И. Е. Сеточно-характеристический метод с использованием интерполяции высоких порядков на тетраэдральных иерархических сетках с кратным шагом по времени // Матем. моделирование. — 2013. — Т. 25, № 2. — С. 42–52.
- Petrov I. B., Favorskaya A. V., Sannikov A. V., Kvasov I. E. Grid-characteristic method using high-order interpolation on tetrahedral hierarchical meshes with a multiple time step // Math. Models Comput. Simul. — 2013. — Vol. 5. — P. 409–415. (Original Russian article: Petrov I. B., Favorskaya A. V., Sannikov A. V., Kvasov I. E. Setochno-harakteristicheskij metod s ispol'zovaniem interpoljacji vysokih porjadkov na tetrajedral'nyh ierarhicheskikh setkah s kratnym shagom po vremeni // Matem. modelirovanie. — 2013. — Vol. 25, No. 2. — P. 42–52.)
- Садин Д. В. TVD-схема для жестких задач волновой динамики гетерогенных сред негиперболического неконсервативного типа // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2016. — Т. 56, № 12. — С. 2098–2109.
- Sadin D. V. TVD scheme for stiff problems of wave dynamics of heterogeneous media of nonhyperbolic nonconservative type // Comput. Math. and Math. Phys. — 2016. — Vol. 56. — P. 2068–2078. (Original Russian article: Sadin D. V. TVD-skema dlya zhestkih zadach volnovoj dinamiki geterogennyh sred negiperbolicheskogo nekonservativnogo tipa // Comput. Math. and Math. Phys. — 2016. — Vol. 56, No. 12. — P. 2098–2109.)
- Садин Д. В. Тестовые задачи динамики газозвесей с использованием асимптотически точных решений // Математическое моделирование. — 2022а. — Т. 34, № 12. — С. 59–74.
- Sadin D. V. Test problems of gas suspension dynamics using asymptotically exact solutions // Math. Models Comput. Simul. — 2023. — Vol. 15. — P. 564–573. (Original Russian article: Sadin D. V. Testovye zadachi dinamiki gazozvesej s ispol'zovaniem asimptoticheskij tochnyh reshenij // Matem. modelirovanie. — 2022a. — Vol. 34, No. 12. — P. 59–74.)
- Садин Д. В. Управление численной диссипацией гибридного метода крупных частиц в задачах с вихревой неустойчивостью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2022б. — Т. 22, № 4. — С. 785–791.
- Sadin D. V. Upravlenie chislennoj dissipaciej gibridnogo metoda krupnyh chastic v zadachah s vihrevoj neustojchivost'ju [Numerical dissipation control of a hybrid large-particle method in vortex instability problems] // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. — 2022b. — Vol. 22, No. 4. — P. 785–791 (in Russian).
- Садин Д. В. Эффективная реализация гибридного метода крупных частиц // Матем. моделирование. — 2022с. — Т. 34, № 4. — С. 113–127.
- Sadin D. V. Efficient implementation of the hybrid large particle method // Math. Models Comput. Simul. — 2022. — Vol. 14. — P. 946–954. (Original Russian article: Sadin D. V. Effektivnaja realizacija gibridnogo metoda krupnyh chastic // Matem. modelirovanie. — 2022c. — Vol. 34, No. 4. — P. 113–127.)
- Садин Д. В., Гузенков В. О., Любарский С. Д. Численное исследование структуры нестационарной двухфазной тонкодисперсной струи // Прикладная механика и техническая физика. — 2005. — Т. 46, № 2. — С. 91–97.
- Sadin D. V., Guzenkov V. O., Lyubarskii S. D. Numerical study of the structure of a finely disperse unsteady two-phase jet // J. Appl. Mech. Tech. Phys. — 2005. — Vol. 46. — P. 224–229. (Original Russian article: Sadin D. V.,

- Guzenkov V. O., Lyubarskii S. D.* Chislennoe issledovanie struktury nestacionarnoj dvuhfaznoj tonkodispersnoj strui // Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika. — 2005. — Vol. 46, No. 2. — P. 91–97.)
- Садин Д. В., Любарский С. Д., Гравченко Ю. А.* Особенности недорасширенной импульсной импактной газодисперсной струи с высокой концентрацией частиц // Журнал технической физики. — 2017. — Т. 87, Вып. 1. — С. 22–26.
- Sadin D. V., Lyubarskii S. D., Gravchenko Yu. A.* Features of an underexpanded pulsed impact gas-dispersed jet with a high particle concentration // Tech. Phys. — 2017. — Vol. 62. — P. 18–23. (Original Russian article: *Sadin D. V., Lyubarskii S. D., Gravchenko Yu. A.* Osobennosti nedorasshirennoj impul'snoj impaktnoj gazodispersnoj strui s vysokoj koncentraciej chastic // Zhurnal tehničeskoj fiziki. — 2017. — Vol. 87, No. 1. — P. 22–26.)
- Ступицкий Е. Л., Андрущенко В. А.* Физические исследования, численное и аналитическое моделирование взрывных явлений. Обзор // Компьютерные исследования и моделирование. — 2020. — Т. 12, № 3. — С. 505–546.
- Stupitsky E. L., Andrushchenko V. A.* Fizicheskie issledovanija, chislennoe i analitičeskoe modelirovanie vzryvnyh javlenij. Obzor [Physical research, numerical and analytical modeling of explosion phenomena. A review] // Computer research and modeling. — 2020. — Vol. 12, No. 3. — P. 505–546 (in Russian).
- Суров В. С.* Об одной модификации узлового метода характеристик // Компьютерные исследования и моделирование. — 2023. — Т. 15, № 1. — С. 29–44.
- Surov V. S.* Ob odnoj modifikacii uzlovogo metoda harakteristik [About one version of the nodal method of characteristics] // Computer research and modeling. — 2023. — Vol. 15, No. 1. — P. 29–44 (in Russian).
- Широкова Е. Н.* Численное исследование импульсного струйного течения неоднородной газодисперсной смеси // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2022. — Т. 23, № 4. — <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-4/articles/996>
- Shirokova E. N.* Chislennoe issledovanie impul'snogo strujnogo tečenija neodnorodnoj gazodispersnoj smesi [Numerical investigation of the pulse jet flow of an inhomogeneous gas-dispersed mixture] // Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics. — 2022. — Vol. 23, No. 4. — <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-4/articles/996> (in Russian).
- Balsara D. S., Bhowmik D., Shu C. W. et al.* Efficient finite difference WENO scheme for hyperbolic systems with non-conservative products // Commun. Appl. Math. Comput. — 2023. — <https://doi.org/10.1007/s42967-023-00275-9>
- Cigala V., Kueppers U., Fernández J. J. P. et al.* Linking gas and particle ejection dynamics to boundary conditions in scaled shock-tube experiments // Bull. Volcanol. — 2021. — Vol. 83. — Art. 53.
- Crowe C. T., Schwarzkopf J. D., Sommerfeld M., Tsuji Y.* Multiphase flows with droplets and particles. — 2nd ed. — Boca Raton: CRC Press, 2011. — 487 p.
- Emelyanov V. N., Volkov K. N.* Direct numerical simulation of fully developed turbulent gas–particle flow in a duct // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. — 2022. — Vol. 18, No. 3. — P. 379–395.
- Frost D. L., Grégoire Y., Petel O., Goroshin S., Zhang F.* Particle jet formation during explosive dispersal of solid particles // Physics of Fluids. — 2012. — Vol. 24, No. 9. — 091109.
- Jeziński J., Janerka K.* Parameters of a gas-solids jet in pneumatic powder injection into liquid alloys with a non-submerged lance // Metalurgija. — 2015. — Vol. 54, Iss. 2. — P. 365–367.
- Kummer F.* Extended discontinuous Galerkin methods for two-phase flows: The spatial discretization // International Journal for Numerical Methods in Engineering. — 2017. — Vol. 109, No. 2. — P. 259–289.
- Saurel R., Abgrall R.* A multiphase Godunov method for compressible multfluid and multiphase flows // J. Comput. Phys. — 1999. — Vol. 150, No. 2. — P. 425–467.
- Stoyanovskaya O. P., Davydov M. N., Arendarenko M. S. et al.* Fast method to simulate dynamics of two-phase medium with intense interaction between phases by smoothed particle hydrodynamics: gas-dust mixture with polydisperse particles, linear drag, one-dimensional tests // J. Comput. Phys. — 2021. — Vol. 430. — 110035.
- King Y., Shu C.-W.* High-order well-balanced finite difference WENO schemes for a class of hyperbolic systems with source terms // Journal of Scientific Computing. — 2006. — Vol. 27, Nos. 1–3. — P. 477–494.
- Zhang C., Zhu Y., Wu D. et al.* Smoothed particle hydrodynamics: Methodology development and recent achievement // J. Hydrodyn. — 2022. — Vol. 34. — P. 767–805.