

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-602-607

УДК 532.529

Компьютерное моделирование взаимодействия ударной волны со стенкой, экранированной неоднородным слоем газозвеси

Дмитрий Викторович Садин✉

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация
sadin@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5335-4847>

Аннотация

Введение. В современных технологиях пневмотранспорта, псевдооживления, напыления полимеров широко используются газодисперсные среды. Особый интерес с точки зрения динамического нагружения конструкций представляют ударно-волновые процессы в газодисперсных смесях в окрестности стенок. Использование компьютерных методов моделирования позволяет снизить временные и материальные затраты на совершенствование конструкций и оптимизацию параметров технологических процессов. **Метод.** Динамика газозвеси рассмотрена в эйлеровой двухконтинуальной формулировке. Для расчетов использован гибридный метод крупных частиц второго порядка аппроксимации с нелинейной коррекцией Superbee на эйлеровом и VanLeer на лагранжевом этапах. Алгоритм реализован в виде многопоточного кода решателя с обработкой графических результатов в отдельном параллельном процессе. **Основные результаты.** Проведено подробное численное моделирование характерных этапов взаимодействия ударной волны со стенкой, экранированной слоем мелкодисперсной газозвеси с цилиндрической областью повышенной плотности частиц. Начало процесса (до взаимодействия прошедшей в слой газозвеси плоской ударной волны с неоднородностью) носит одномерный характер. Дальнейшее развитие физической картины связано с существенной перестройкой течения. Огибающая цилиндрическую границу неоднородности ударная волна сходится к плоскости симметрии с образованием эффекта фокусировки. Вследствие бароклинной неустойчивости (несовпадения градиентов давления и плотности) на поверхности границы повышенной плотности образуется вихревая зона. Как показал детальный анализ результатов расчета, наиболее существенные (более, чем на порядок по отношению к начальному состоянию) всплески давления и плотности газозвеси вызваны взаимодействиями прошедшей в неоднородность и сфокусированной ударной волной, а затем набегающим отраженным композиционным ударно-волновым импульсом. **Обсуждение.** Полученные результаты имеют теоретическое и прикладное значения. Выявлены новые физические эффекты отражения ударной волны от стенки, экранированной слоем газозвеси с цилиндрической областью повышенной плотности дисперсной фракции. Определены причины последовательности всплесков давления и плотности смеси, которые могут приводить к воспламенению и детонации горючей дисперсной фазы. Разработанный численный алгоритм и методика компьютерного моделирования могут лежать в основе анализа ударно-волновых явлений в окрестности стенок конструкций и обоснования рациональных параметров технологических газопорошковых технологий.

Ключевые слова

компьютерное моделирование, ударная волна, стенка, неоднородный слой газозвеси

Ссылка для цитирования: Садин Д.В. Компьютерное моделирование взаимодействия ударной волны со стенкой, экранированной неоднородным слоем газозвеси // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 4. С. 602–607. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-602-607

Computer simulation of the interaction between a shock wave and a wall shielded by an inhomogeneous gas suspension layer

Dmitry V. Sadin✉

Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

sadin@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5335-4847>

Abstract

In modern technologies of pneumatic transport, fluidization, and polymer spraying, gas-dispersed media are widely used. Of particular interest, from the point of view of dynamic loading of structures, are shock-wave processes in gas-dispersed mixtures in the vicinity of the walls. The use of computer modeling methods makes it possible to reduce time and material costs for improving designs and optimizing technological process parameters. A hybrid large-particle method of second order approximation with a nonlinear correction, Superbee at the Eulerian stage and VanLeer at the Lagrangian stage, was used for the calculations. The algorithm is implemented as multi-threaded solver code, with processing of graphical results in a separate parallel process. A detailed numerical simulation of the characteristic stages of the interaction of a shock wave with a wall shielded by a layer of finely dispersed gas suspension with a cylindrical region of increased particle density was carried out. The beginning of the process (before the interaction of a plane shock wave passing into the layer of gas suspension with inhomogeneity) is one-dimensional in nature. Further development of the physical picture is associated with a significant restructuring of the flow. The shock wave enveloping the cylindrical boundary of the inhomogeneity converges to the plane of symmetry with the formation of a focusing effect. Due to baroclinic instability (mismatch of pressure and density gradients), a vortex zone is formed on the surface of the high-density boundary. As shown by a detailed analysis of the calculation results, the most significant (more than an order of magnitude relative to the initial state) surges in pressure and density of the gas suspension are caused by the interactions of a focused shock wave that has passed into the inhomogeneity, and then an incident reflected composite shock wave pulse. The results obtained have theoretical and applied significance. New physical effects of shock wave reflection from a wall shielded by a layer of gas suspension with a cylindrical region of increased density of the dispersed fraction have been revealed. The reasons for the sequence of bursts in pressure and density of the mixture, which can lead to ignition and detonation of the combustible dispersed phase, are determined. The developed numerical algorithm and computer modeling technique can form the basis for the analysis of shock wave phenomena in the vicinity of the walls of structures and the justification of rational parameters of technological gas-powder technologies.

Keywords

computer simulation, shock wave, wall, inhomogeneous gas suspension layer

For citation: Sadin D.V. Computer simulation of the interaction between a shock wave and a wall shielded by an inhomogeneous gas suspension layer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 602–607 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-602-607

Введение

Газодисперсные среды используются в промышленных установках пневмотранспорта, псевдооживления [1], аддитивных технологиях напыления полимеров [2], газопорошковых системах ликвидации пожаров [3], а также представляют практический интерес при анализе аварийных ситуаций, например, в угольных шахтах.

Кроме физических явлений, известных в «чистой» газодинамике, наличие в потоке примеси частиц в некоторых случаях может приводить к новым и иногда неочевидным эффектам. Например, в вихревых турбулентных течениях отмечена кластеризация частиц [4], экспериментально обнаружены аэродинамически стабильные когерентные структуры частиц при их радиальном расширении в спутном потоке ударной волны [5], изучены ударно-волновые эффекты на дозвуковом режиме течения несущего газа [6], отмечено резонансное увеличение скорости двухфазной среды [7], расслоение и дрейф границ раздела сред [8, 9].

Наличие неоднородных по плотности областей усложняет физическую картину и сопровождается явлениями рефракции [10], фокусировки [11], развития неустойчивости и образования вихрей [12]. Особый интерес с точки зрения динамического нагружения конструкций представляют струйные течения [6] и

ударно-волновые процессы в газодисперсных смесях в окрестности стенок [13, 14].

Предварительное моделирование взаимодействия ударной волны со стенкой, экранированной неоднородным слоем газозвеси, показало серию всплесков давления и плотности смеси. В настоящей работе выполнено подробное исследование данного явления.

Модель и метод расчета динамики газозвеси

Динамика газозвеси в двухконтинуальной формулировке [15], имеет вид:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \nabla_d \mathbf{G} + \mathbf{B}(\nabla_d \mathbf{F}) = \mathbf{H}(\mathbf{q}), \quad (1)$$

где $\mathbf{q} = [\rho_1, \rho_2, \rho_1 \mathbf{v}_1, \rho_2 \mathbf{v}_2, \rho_2 e_2, \rho_1 E_1 + \rho_2 K_2]^T$, $\rho_i = \rho_i^\circ \alpha_i$ ($i = 1, 2$), нижние индексы 1 и 2 — величины, относящиеся к газу и дисперсной фазе; верхний индекс «°» — обозначение истинного значения плотности, $\rho = \rho_1 + \rho_2$, $E_1 = e_1 + \mathbf{v}_1^2/2$, $K_2 = \mathbf{v}_2^2/2$, параметры α_i , ρ_i , $\mathbf{v}_i$, E_i , e_i и p — объемная доля, приведенная плотность, вектор скорости с проекциями u_i и v_i , полная и внутренняя энергии единицы массы i -ой фазы, давление газа; $\mathbf{G} = [\rho_1 \mathbf{v}_1, \rho_2 \mathbf{v}_2, \rho_1 \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_1, \rho_2 \mathbf{v}_2 \mathbf{v}_2, \rho_2 e_2 \mathbf{v}_2, \rho_1 E_1 \mathbf{v}_1 + \rho_2 K_2 \mathbf{v}_2]^T$; $\mathbf{F} = [0, 0, p, p, 0, p(\alpha_1 \mathbf{v}_1 + \alpha_2 \mathbf{v}_2)]^T$; $\mathbf{H} = [0, 0, -\mathbf{F}_\mu, \mathbf{F}_\mu, Q_T, -Q_T]^T$; $\nabla_d = \text{diag}(\nabla, \nabla, \nabla, \nabla, \nabla, \nabla)$; $\mathbf{B} = \text{diag}[1, 1, \alpha_1, \alpha_2, 1, 1]$; ∇ — оператор набла (Гамильтона); $\mathbf{F}_\mu$ и Q_T — вязкая

составляющая силы межфазного трения и теплообмена в единице объема; t — время.

Дополнительными соотношениями являются уравнения состояния идеального калорически совершенного газа и несжимаемых твердых монокристаллических частиц: $p = (\gamma_1 - 1)\rho_1^0 e_1$, $e_1 = c_v T_1$, $e_2 = c_2 T_2$, $\{\gamma_1, c_v, c_2, \rho_2^0\} \equiv \text{const}$, где T_1 и T_2 — температуры несущей фазы и частиц; γ_1 и c_v — показатель адиабаты и удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; c_2 — удельная теплоемкость частиц. Интенсивности межфазного трения и теплообмена F_μ , Q_T заданы на основе критериальных соотношений [15].

Для расчетов использован гибридный метод крупных частиц второго порядка аппроксимации [16] с нелинейной коррекцией Superbee на эйлеровом и VanLeer на лагранжевом этапах [17]¹. Алгоритм реализован на языке Object Pascal (компилятор FPC 3.2.2, лицензия GPL/LGPL) в виде многопоточного кода решателя с обработкой графических результатов в отдельном параллельном процессе.

Постановка задачи

В ограниченном с трех сторон объеме (рис. 1) в направлении правой стенки по покоящемуся воздуху 0 движется плоская ударная волна 1 с числом Маха 1,5. На ее пути расположен слой мелкодисперсной газозвеси 2 толщиной $0,5L$ с цилиндрической неоднородностью 3 диаметром $D = 0,25L$ с повышенной концентрацией частиц.

Начальные параметры газа и взвеси в рассматриваемых областях (рис. 1) представлены в таблице. Исходное состояние смеси газа и частиц в областях 2 и 3 — равновесное. Параметры за ударной волной в зоне 1 определены из аналитических соотношений Рэнкина–Гюгонио при заданном числе Маха 1,5 (до четырех значащих цифр). Для однородности вычислений в областях чистого газа 0 и 1 задана пренебрежимо малая концентрация дисперсной фазы $\alpha_2 = 10^{-10}$.

Газозвесь содержала монокристаллические частицы диаметром $d = 0,1$ мкм, плотностью $\rho_2^0 = 2500$ кг/м³ и теплоемкостью частиц — $c_2 = 710$ Дж/(кг·К). Воздух принят калорически совершенным газом с показателем адиабаты $\gamma_1 = 1,4$ и газовой постоянной $R_1 = 287$ Дж/(кг·К). Геометрия задачи определена одним параметром $L = 0,8$ м.

Краевые условия заданы в виде условий непротекания на стенках, а входные — на левой границе расчетной области — параметры за падающей ударной волной. В расчетной области, обозначенной штриховой линией (рис. 1), введена неравномерная сетка, исключая искажение исследуемого численного решения. В зоне $L \times L$ использована равномерная декартова расчетная сетка с детализацией 1600×800 до оси симметрии. Расчеты выполнены с числом Куранта CFL = 0,4.

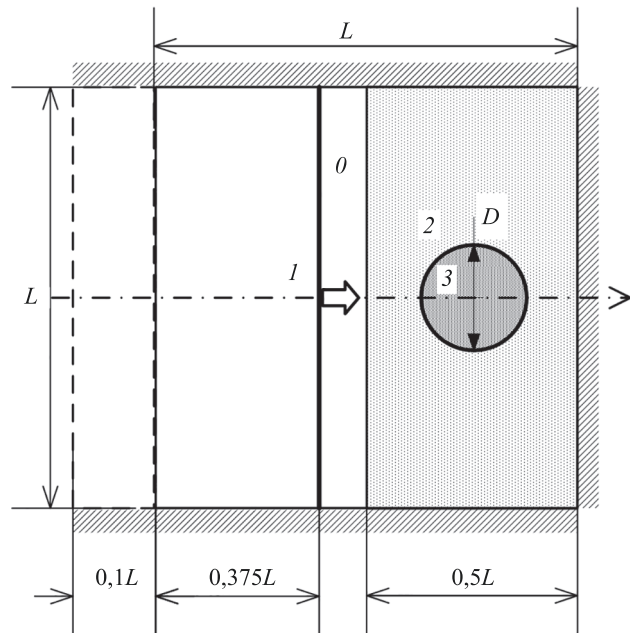


Рис. 1. Схема задачи: 0 — невозмущенный газ; 1 — ударная волна; 2 — слой газозвеси; 3 — цилиндрическая неоднородность повышенной плотности

Fig. 1. Problem diagram: 0 — undisturbed gas; 1 — shock wave; 2 — layer of gas suspension; 3 — cylindrical heterogeneity of increased density

Таблица. Начальные условия

Table. Initial conditions

Область	α_2	p , МПа	$T_1 = T_2$, К	$u_1 = u_2$, м/с
0	10^{-10}	0,1000	293,0	0
1	10^{-10}	0,2458	386,8	238,3
2	10^{-3}	0,1000	293,0	0
3	10^{-2}	0,1000	293,0	0

Результаты компьютерного моделирования

Эволюция взаимодействия падающей ударной волны с мелкодисперсным слоем газозвеси, экранирующей стенку показана на рис. 2. Результаты компьютерного моделирования представлены в виде численных шлирен-изображений функции градиента плотности смеси $\nabla(\rho/\rho^{(1)})$ с использованием техники описанной в работе [18]. На рис. 2 добавлены фрагменты профилей плотности $\rho/\rho^{(1)}$ в плоскости симметрии. В начальный момент времени $t = 0$ ограниченный слой и цилиндрическая неоднородность повышенной плотности находятся в равновесном неподвижном состоянии (рис. 2, a , где c_1 и c_2 — границы раздела сред).

После прихода фронта ударной волны на левую границу газозвеси c_1 возникает одномерный распад разрыва с образованием отраженного и прошедшего в слой скачков уплотнения, который затем взаимодействует с цилиндрической областью повышенной плотности. Далее картина течения приобретает двумерный характер и формируется сложная структура. Ударно-волновая конфигурация в момент времени $t = 1,07$ мс отображена на рис. 2, b .

¹ В работе [17, с. 787] допущена опечатка: в формуле ограничителя Super-C вместо «0,4» должно быть значение «0».

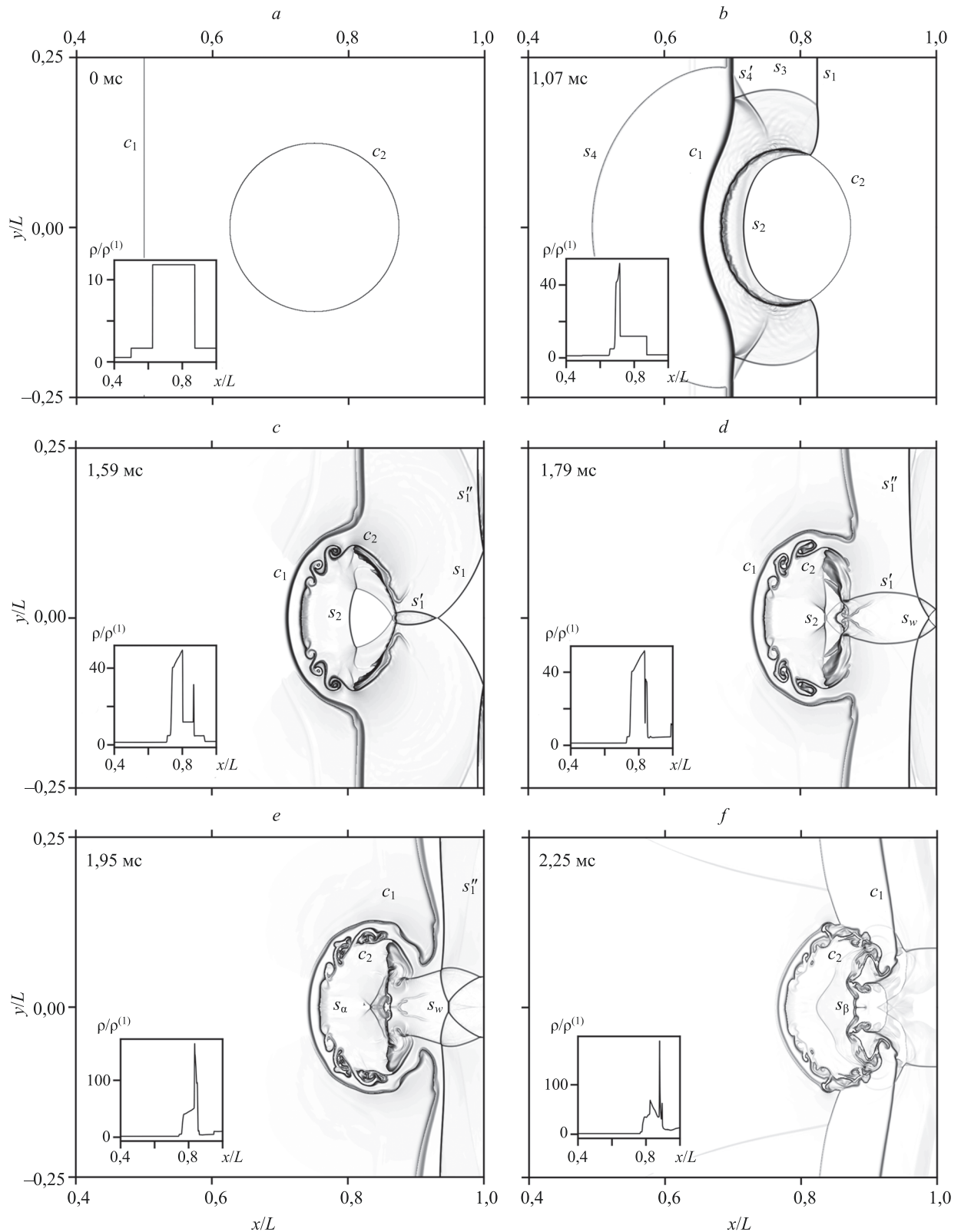


Рис. 2. Численные шlieren-изображения функции градиента плотности смеси и фрагменты профилей плотности в плоскости симметрии.

c_1, c_2 — границы раздела сред; r — волна разрежения; $s_1, s_2, \dots$ — ударные волны; s_w, s_a, s_β — композиционные ударно-волновые импульсы

Fig. 2. Numerical Schlieren images of the mixture density gradient function and fragments of density profiles in the symmetry plane.

Interface boundaries — c_1, c_2 ; rarefaction wave — r ; shock waves — $s_1, s_2, \dots$; compositional shock wave pulses — s_w, s_a, s_β

Ударно-волновая конфигурация включает отраженную от поверхности газозвеси c_1 волну разрежения r и ударные волны: прошедшую в слой s_1 и неоднородность s_2 , отраженные от него в слое s_3 и газе s_4 . Поскольку отраженные волны s_3 и s_4 движутся с различными скоростями, то образуется предвестник s'_4 . Плотность смеси возрастает примерно в 4 раза (рис. 2, *b*).

Огибающая цилиндрическую границу неоднородности ударная s_1 сходится к плоскости симметрии. На рис. 2, *c* ($t = 1,59$ мс) показан момент ее фокусировки s'_1 и отражения от стенки s'_1 . Вследствие бароклинической неустойчивости (несовпадения градиентов давления и плотности) на поверхности границы повышенной плотности c_2 образуется вихревая зона.

В момент времени $t = 1,79$ мс (рис. 2, *d*) формируется ударно-волновой импульс s_w как композиция сфокусированной и отраженных от стенки ударных волн, который движется навстречу неоднородности c_2 . Затем при $t = 1,95$ мс происходит всплеск плотности s_α , вызванный взаимодействием прошедшей в неоднородность s_2 и сфокусированной s'_1 ударных волн (рис. 2, *e*). Скачок плотности еще большей интенсивности s_β (более, чем на порядок по отношению к начальному значению) возникает в момент времени $t = 2,25$ мс, когда отраженный от стенки композиционный ударно-вол-

новой импульс s_w набегают на зону всплеска плотности s_α (рис. 2, *f*). Последовательности всплесков давления и плотности смеси могут приводить к воспламенению и детонации горючей дисперсной фазы.

Заключение

Проведено численное моделирование взаимодействия ударной волны со стенкой, экранированной слоем газозвеси с цилиндрической областью повышенной плотности. Показана существенная перестройка течения с формированием дифракции, прошедшей в слой ударной волны, ее фокусировки, образования, отраженного от стенки и сфокусированного композиционного ударно-волнового импульса. Бароклиническая неустойчивость на поверхности неоднородности повышенной плотности является причиной образования вихревой зоны. Как показал детальный анализ, наиболее существенные (более чем на порядок по отношению к начальному состоянию) всплески давления и плотности газозвеси вызваны взаимодействиями прошедшей в неоднородность и сфокусированной ударными волнами, а затем набегающим отраженным композиционным ударно-волновым импульсом.

Литература

- Da Calva Mouillevois T., Audren-Paul M., Chollon G., Bertrand N. Fluidization of variable short fiber/powder mixtures: hydrodynamic investigation // *Chemical Engineering Journal*. 2023. V. 471. P. 144846. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144846>
- Губайдуллин Д.А., Федяев В.Л., Моренко И.В. Математическое моделирование неизоэнтальпических процессов струйного напыления полимерных порошковых композиций и формирования защитных покрытий // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2016. Т. 17. № 4. С. 3.
- Зуев Ю.В., Лепешинский И.А., Решетников В.А., Истомин Е.А. Особенности двухфазных струй с большой концентрацией дисперсной фазы // *Математическое моделирование*. 2012. Т. 24. № 1. С. 129–142.
- 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. V. 18. N 3. P. 379–395. <https://doi.org/10.20537/nd220304>
- Frost D.L., Grégoire Y., Petel O., Goroshin S., Zhang F. Particle jet formation during explosive dispersal of solid particles // *Physics of Fluids*. 2012. V. 24. N 9. P. 091109. <https://doi.org/10.1063/1.4751876>
- Садин Д.В., Любарский С.Д., Гравченко Ю.А. Особенности недорасширенной импульсной ударной газодисперсной струи с высокой концентрацией частиц // *Журнал технической физики*. 2017. Т. 87. № 1. С. 22–26. <https://doi.org/10.21883/jtf.2017.01.44013.1809>
- Shirokova E.N. Numerical study of a pulsed jet flow of an inhomogeneous gas-dispersed mixture // *Fluid Dynamics*. 2023. V. 58. N 8. P. 1594–1601. <https://doi.org/10.1134/s0015462823602590>
- Губайдуллин Д.А., Осипов П.П., Альмакаев И.М. Моделирование дрейфа мелкодисперсных частиц в акустическом резонаторе с помощью пакета CFD // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. № 9–10. С. 112–121. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-112-121>
- Садин Д.В. Численное и аналитическое исследование разлета газозвеси в закрытой ударной трубе // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2021. Т. 14. № 4. С. 40–49. <https://doi.org/10.18721/JPM.14403>
- Буллат П.В., Волков К.Н. Численное моделирование рефракции ударной волны на наклонном контактом разрыве // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и*

References

- Da Calva Mouillevois T., Audren-Paul M., Chollon G., Bertrand N. Fluidization of variable short fiber/powder mixtures: hydrodynamic investigation. *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 471, pp. 144846. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144846>
- Gubaidullin D.A., Fedyaev V.L., Morenko I.V. Mathematical modeling of non-isothermal process of the jet spraying of powder polymeric compositions and the formation of protective coatings. *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 3. (in Russian)
- Zuev Yu.V., Lepeshinsky I.A., Reshetnikov V.A., Istomin E.A. Features of two-phase jets with big concentration of the disperse phase. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2012, vol. 24, no. 1, pp. 129–142. (in Russian)
- 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, pp. 379–395. <https://doi.org/10.20537/nd220304>
- 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, pp. 091109. <https://doi.org/10.1063/1.4751876>
- Sadin D.V., Lyubarskii S.D., Gravchenko Yu.A. Features of an underexpanded pulsed impact gas-dispersed jet with a high particle concentration. *Technical Physics*, 2017, vol. 626 no. 1, pp. 18–23. <https://doi.org/10.1134/s1063784217010194>
- Shirokova E.N. Numerical study of a pulsed jet flow of an inhomogeneous gas-dispersed mixture. *Fluid Dynamics*, 2023, vol. 58, no. 8, pp. 1594–1601. <https://doi.org/10.1134/s0015462823602590>
- Gubaidullin D.A., Osipov P.P., Almakaev I.M. Modeling of the fine particles drift in acoustic resonator using CFD-package. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 2017, vol. 19, no. 9–10, pp. 112–121. (in Russian). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-112-121>
- Sadin D.V. Numerical and analytical study of gas suspension expansion in a closed shock tube. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematic*, 2021, vol. 14, no. 4, pp. 40–49. <https://doi.org/10.18721/JPM.14403>
- Bulat P.V., Volkov K.N. Numerical simulation of shock wave refraction on inclined contact discontinuity. *Scientific and Technical*

- оптики. 2016. Т. 16. № 3. С. 550–558. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2016-16-3-550-558>
11. Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г. Фокусировка ударной волны при взаимодействии ударной волны с цилиндрическим облаком пыли // Письма в Журнал технической физики. 2016. Т. 42. № 18. С. 17–24.
 12. Садин Д.В., Давидчук В.А. Взаимодействие плоской ударной волны с областями различной формы и плотности в мелкодисперсной газозвеси // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 2. С. 489–498.
 13. Болдырева О.Ю., Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Кутушев А.Г. Численное исследование передачи ударно-волновой нагрузки экранируемой плоской стенке через слой порошкообразной среды и разделяющий их воздушный зазор // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 1. С. 132–142.
 14. Садин Д.В., Широкова Е.Н. Точное решение задачи отражения ударной волны от стенки, экранированной слоем газозвеси // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 4. С. 843–849. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-4-843-849>
 15. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
 16. Садин Д.В. Эффективная реализация гибридного метода крупных частиц // Математическое моделирование. 2022. Т. 34. № 4. С. 113–127. <https://doi.org/10.20948/mm-2022-04-08>
 17. Садин Д.В. Управление численной диссипацией гибридного метода крупных частиц в задачах с вихревой неустойчивостью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 4. С. 785–791. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-4-785-791>
 18. Quirk J.J., Karni S. On the dynamics of a shock-bubble interaction // Journal of Fluid Mechanics. 1996. V. 318. P. 129–163. <https://doi.org/10.1017/s0022112096007069>
 - Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 550–558. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2016-16-3-550-558>
 11. Georgievskiy P.Yu., Levin V.A., Sutyurin O.G. Shock focusing upon interaction of a shock with a cylindrical dust cloud. *Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, no. 9, pp. 936–939. <https://doi.org/10.1134/S1063785016090182>
 12. Sadin D.V., Davidchuk V.A. Interaction of a plane shock wave with regions of varying shape and density in a finely divided gas suspension. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2020, vol. 93, no. 2, pp. 474–483. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02143-2>
 13. Boldyreva O.Y., Gubaidullin A.A., Dudko D.N., Kutushev A.G. Numerical study of the transfer of shock-wave loading to a screened flat wall through a layer of a powdered medium and a subsequent air gap. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 114–123. <https://doi.org/10.1007/s10573-007-0016-3>
 14. Sadin D.V., Shirokova E.N. The exact solution of a shock wave reflection problem from a wall shielded by a gas suspension layer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 843–849. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-4-843-849>
 15. Nigmatulin R.I. *Dynamics of Multiphase Media. V. 1*. New York, USA, Hemisphere Publ. Corp., 1990, 507 p.
 16. Sadin D.V. Efficient Implementation of the hybrid large particle method. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 946–954. <https://doi.org/10.1134/S207004822206014X>
 17. Sadin D.V. Numerical dissipation control of a hybrid large-particle method in vortex instability problems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 785–791. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-4-785-791>
 18. Quirk J.J., Karni S. On the dynamics of a shock-bubble interaction. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, vol. 318, pp. 129–163. <https://doi.org/10.1017/s0022112096007069>

Автор

Садин Дмитрий Викторович — доктор технических наук, профессор, профессор, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [sc 6602924618](https://orcid.org/0000-0001-5335-4847), <https://orcid.org/0000-0001-5335-4847>, sadin@yandex.ru

Author

Dmitry V. Sadin — D.Sc., Full Professor, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [sc 6602924618](https://orcid.org/0000-0001-5335-4847), [https://orcid.org/0000-0001-5335-4847](mailto:sadin@yandex.ru), sadin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23.04.2024
Одобрена после рецензирования 29.05.2024
Принята к печати 18.07.2024

Received 23.04.2024
Approved after reviewing 29.05.2024
Accepted 18.07.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»