



Научная статья

УДК 519.6

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189159>

EDN: <https://www.elibrary.ru/BROVVS>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ДИФРАКЦИЮ ВОЛН ПРИ ЭНЕРГОВКЛАДЕ

А.А. Сназин[✉]^{ORCID}, В.И. Шевченко

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

✉ alexandersnzn@mail.ru

Цитирование: Сназин А.А., Шевченко В.И. Исследование влияния локальных неоднородностей на дифракцию волн при энерговкладе // Труды МАИ: электрон. журнал. № 149.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189159>

Аннотация. Исследована дифракция волны сжатия, возникающей при локальном импульсном энергоподводе в канале с открытым выходом, в присутствии периодических геометрических препятствий. Актуальность задачи определяется тем, что геометрия внутренних элементов способна влиять на перераспределение давления и характер отражённых течений, а значит, влиять на режимы нестационарного газодинамического взаимодействия в каналах. Цель работы состояла в выявлении того, как различные типы периодических препятствий изменяют динамику фронта, локальные зоны сжатия и разрежения, а также распределение давления. Для этого использовано численное моделирование в двумерной нестационарной постановке для вязкого сжимаемого газа на основе уравнений Навье—Стокса с LES-замыканием. Постановка задачи была ориентирована на сопоставление конфигураций при одинаковых начальных и граничных условиях, что позволило выделить вклад именно геометрического фактора. Рассмотрены три конфигурации: гладкий канал, канал со ступенчатым расширением и канал с последовательными сужениями и расширениями. Показано, что введение препятствий качественно меняет картину течения: ступенчатое расширение вызывает выраженную область подпора перед

препятствием, тогда как серия сужений и расширений усиливает множественные переотражения, и снижает локальные пиковые значения давления при более широком пространственном перераспределении энергии. Таким образом установлено, что изменение формы препятствий приводит не только к локальной деформации фронта, но и к перестройке общего режима распространения волны в канале. Полученные результаты показывают, что геометрия препятствий выступает управляющим фактором волновой динамики в канале.

Ключевые слова: дифракция; волны сжатия; энерговклад.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF LOCAL INHOMOGENEITIES ON WAVE DIFFRACTION DURING ENERGY DEPOSITION

A. A. Snazin , V.I. Sevchenko

Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

 alexandersnzn@mail.ru

Citation: Snazin A.A. Investigation of the influence of local inhomogeneities on wave diffraction during energy deposition // Trudy MAI. 2026. No. 149. (In Russ.).
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189159>

Abstract. The diffraction of a compression wave generated by localized impulsive energy deposition in a channel with an open outlet was investigated in the presence of periodic geometric obstacles. The relevance of this problem is determined by the fact that the geometry of internal elements can affect pressure redistribution and the structure of reflected flows, and therefore influence the regimes of unsteady gas-dynamic interaction in channels. The aim of the study was to identify how different types of periodic obstacles modify front dynamics, local compression and rarefaction zones, as well as the pressure distribution. To this end, numerical simulations were performed in a two-dimensional unsteady formulation for a viscous compressible gas based on the Navier–Stokes equations with LES closure. The problem was formulated to compare configurations under identical initial and boundary conditions, which made it possible to isolate the contribution of the geometric factor specifically. Three configurations were considered: a smooth channel, a channel with a step expansion, and a channel with successive contractions and expansions. It was shown that the introduction of obstacles

qualitatively changes the flow pattern: the step expansion produces a pronounced back-pressure region upstream of the obstacle, whereas the series of contractions and expansions intensifies multiple wave reflections and reduces local peak pressure values while promoting a broader spatial redistribution of energy. Thus, it has been established that a change in the shape of the obstacles leads not only to local deformation of the wavefront but also to a reorganization of the overall wave propagation regime in the channel. The obtained results demonstrate that obstacle geometry acts as a controlling factor in channel wave dynamics.

Keywords: diffraction; compression waves; energy deposition.

Введение

Современные исследования в области распространения волн сжатия/разряжения газа находят широкое применение при проектировании эффективных энергетических установок. В таких системах распространение волн происходит внутри геометрии сложной формы [1], что требует учета взаимодействия с локальными элементами конструкции. Наличие периодических препятствий, таких как уступы, сужения или расширения, может существенно изменить динамику процесса, усиливая или, наоборот, ослабляя фронт волны, влиять на устойчивость и изменять параметры давления. Поэтому детальное изучение этих явлений имеет прикладную значимость.

Особый интерес представляет вопрос дифракции волн, возникающей при прохождении через элементы сложной геометрии [2-4]. Дифракция сопровождается перераспределением энергии, появлением отражённых и вторичных волн, а также формированием вихрей и зон сжатия или разряжения. Так в работе [5] показаны результаты влияния образования ячеистой структуры в канале квадратной формы. В ряде работ показано, что ослабление ударных волн в каналах с препятствиями определяется геометрией внутренних элементов и характером переотражений. Так, в [6] и [7] установлено существенное снижение интенсивности волны при использовании массивов пластин и твердых препятствий, а в [8] показана высокая эффективность комбинированных zig-zag- и цилиндрических структур. В работах [9] и [10] приводятся основы численного

анализа регулярного и маховского отражения. Четкое понимание этих процессов позволяет целенаправленно управлять параметрами волны в нужных зонах, обеспечивая либо её усиление, либо затухание.

Однако наличие обширного массива исследований по распространению волн сжатия/разряжения, влияние отдельных элементов геометрии остается актуальной задачей. В данной работе акцент сделан на численное моделирование дифракции фронта волны при прохождении через различные периодические препятствия: резкие и плавные сужения и расширения. Исследуется, как различные формы препятствий влияют на структуру фронта волны, величину давления и динамику отражений. Цель исследования — выявить закономерности формирования сложных волновых структур при взаимодействии с элементами геометрии.

Постановка задачи

Целью настоящего исследования является численный анализ влияния различных типов периодических препятствий на дифракцию волн, возникающей в результате подвода энерговклада. А также рассматривается влияние на перераспределение давления в канале при прохождении фронта волны участков канала с препятствиями.

Рассматривается двухмерная модель, соответствующая условиям вязкого воздуха при нормальном атмосферном давлении $p_0=0.09$ МПа и температуре $T_0=293$ К. Двумерная постановка задачи позволяет выделить вклад геометрического фактора без дополнительных трехмерных эффектов, которые могут затруднить интерпретацию результатов. Геометрия расчетной области представляет собой прямоугольную область высотой $h=30$ мм и длиной $L=6h$. На все твердые стенки накладывалось условие прилипания ($\tilde{u}_i = 0$). Левый торец расчетной области закрыт, правый — открыт, что позволяет обеспечить выход возмущений из расчётной. Инициирование волны осуществляется мгновенным заданием вблизи закрытого торца области с повышенными начальными параметрами $p_1=1$ МПа, температура $T_1=700$ К (энерговклад). Это условие задаёт фронт волны сжатия, развивающийся в сторону выхода. На расстоянии $1.5h$ от

закрытого торца размещались периодические препятствия двух типов, различающиеся конфигурацией проходного сечения (рисунок 1).

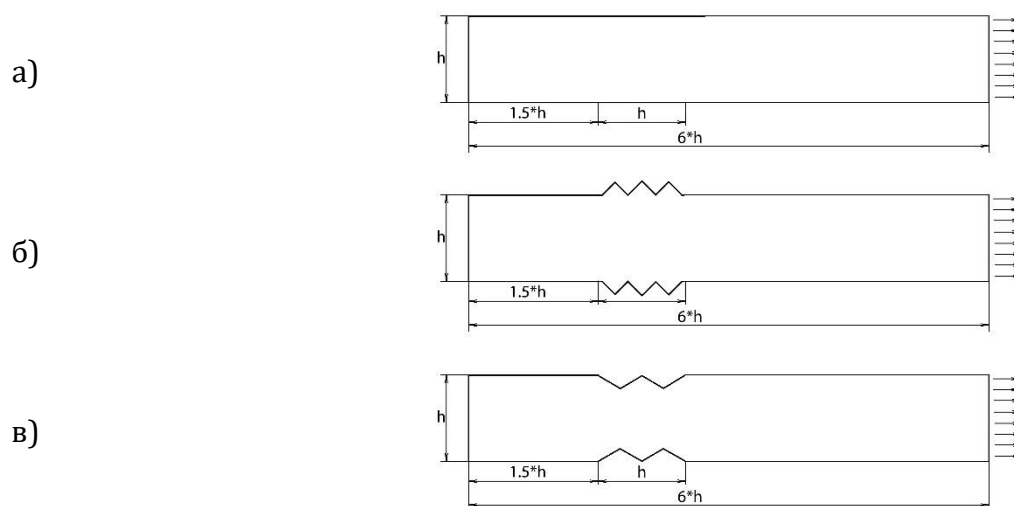


Рисунок 1 – Геометрия расчетной области: а) без препятствий, б) форма 1, в) форма 2

В расчётах рассматривались три варианта геометрии: канал без препятствий, канал с препятствием формы 1 и канал с препятствием формы 2. Препятствие представляет собой участок канала с различной геометрической конфигурацией в виде различных вариантов сужений и расширений (рисунки 1б и 1в) Геометрия препятствий выбиралась на основе предположения, что острые углы и кромки позволяют создавать сильные отраженные ударные волны.

Для описания движения газа используется система уравнений Навье-Стокса в рамках нестационарной двумерной постановки для сжимаемого вязкого газа. Для разрешения нестационарных турбулентных структур в рамках возникновения интенсивных градиентов давления и плотности, и развивающихся вихревых образований различного масштаба применён метод крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) [11]. Метод LES основан на использовании пространственной фильтрации уравнений Навье-Стокса и разрешает крупномасштабные вихревые структуры, которые больше ширины пропускания фильтра, а мелкомасштабные вычисляются через подсеточные напряжения и дополнительный поток энергии.

После пространственной фильтрации система уравнений Навье-Стокса принимает вид:

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

$$\frac{\partial(\rho \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j + p \delta_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \tau_{ij}^{sgs}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial[(E + p)\tilde{u}_j]}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [\tilde{u}_i(\tau_{ij} - \tau_{ij}^{sgs}) - q_j - q_j^{sgs}]. \quad (3)$$

Здесь ρ — фильтрованная плотность, $\tilde{u}_i$ — компоненты осреднённой скорости, p — давление, E — полная энергия единицы объёма, τ_{ij} — вязкий тензор напряжений, q_j — молекулярный тепловой поток, τ_{ij}^{sgs} и q_j^{sgs} — подсеточные вклады, возникающие вследствие неполного разрешения турбулентного спектра.

Для замыкания системы используется уравнение состояния идеального газа

$$p = (\gamma - 1) \left(E - \frac{1}{2} \rho \tilde{u}_k \tilde{u}_k \right), \quad (4)$$

где γ — показатель адиабаты.

Подсеточные напряжения определялись на основе вихревязкостного замыкания с помощью модели Смагоринского в сжимаемой постановке:

$$\tau_{ij}^{sgs} - \frac{1}{3} \tau_{kk}^{sgs} \delta_{ij} = 2\mu_t \tilde{S}_{ij}, \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho (C_s \Delta)^2 |\tilde{S}|, \quad (6)$$

где μ_t — подсеточная турбулентная вязкость, C_s — константа Смагоринского, Δ — характерный размер фильтра, $\tilde{S}_{ij}$ — тензор скоростей деформации разрешаемого движения,

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right), |\tilde{S}| = (2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij})^{1/2}. \quad (7)$$

Пространственная дискретизация выполнялась на расчётной сетке, содержащей около 1.55×10^6 ячеек, обеспечивающих необходимую пространственную точность для отображения тонкой структуры фронта. Временной шаг интегрирования выбран как $\Delta t = 6 \times 10^{-7}$ с последующим разбиением

на 25 внутренних подшагов по схеме неявной релаксации для достижения устойчивой сходимости.

Результаты расчетов

В результате проведения серии численных расчетов было проанализировано распространение волн сжатия/расширения в канале без препятствий и в каналах с двумя типами периодических препятствий. Была проведена оценка эволюции головного фронта, характера отражений от стенок и препятствий, а также их влияние на перераспределение давления на различных временных срезах (рисунок 2).

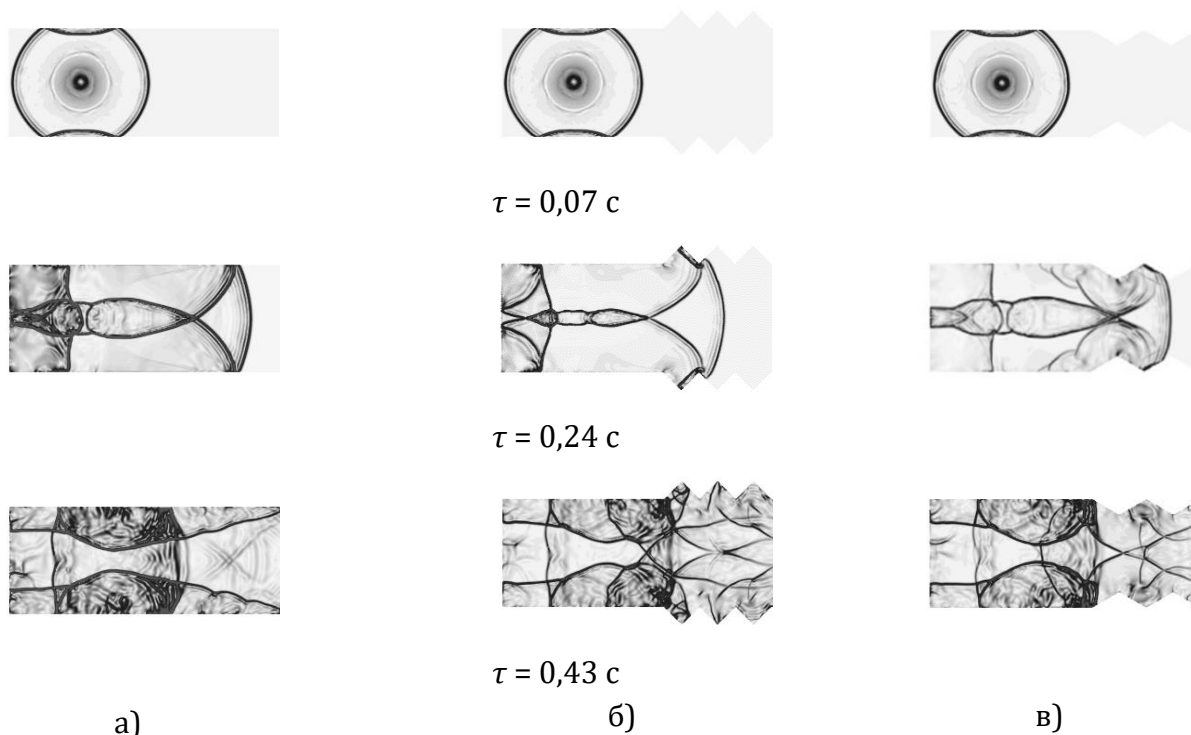


Рисунок 2 – Взаимодействие волн сжатия/расширения с периодическими препятствиями: а) без препятствий, б) препятствием формы 1, в) препятствием формы 2

При отсутствии внутренних геометрических неоднородностей после импульсного подвода энерговклада в замкнутом торце начинает формироваться фронт волны сжатия, который начинает распространяться вдоль канала в направлении открытой части канала. На ранней стадии ($\tau = 0,07$ с) фронт волны сохраняет свою относительную простоту, но уже имеет выраженную направленность вдоль продольной оси канала рисунке 2а. При этом уже начинается процесс отражения от верхней и нижней стенок каналов. По мере продвижения фронта по каналу происходит усложнение динамики процесса. К моменту $\tau = 0,24$ с становится различим значительный процесс переотражения

волн от стенок канала и со стороны закрытого торца, и формирование головного фронта, движущегося вдоль канала. Возникает несколько локальных областей повышенного давления, разделённых участками пониженного градиента.

На рисунке 3 представлен график распределения давления вдоль продольной оси канала. Из рисунка видно, что максимальные значения давления сохраняется в зоне около первоначального энерговклада, где при $l=0,018$ м, давление достигает значения $p \approx 0.3$ МПа. Также в результате переотражения образуются две выраженные области повышения давления на расстоянии $l=0,043$ м ($p \approx 0.3$ МПа) и $l=0,096$ м ($p \approx 0.4$ МПа).

В канале со ступенчатым расширением, показанным на рисунке 2б распределение волн значительно меняется. Фронт волны при достижении участка с препятствиями ($\tau = 0,24$ с) вначале заходит в небольшое углубление, а затем сталкивается с косым уступом. В результате на этой стадии фиксируется локальное торможение потока и формирование зоны повышенного давления непосредственно перед препятствием (рисунок 3). Уровень максимума давления на этом участке ($l=0,043$ м) становится равным $p \approx 0.58$ МПа, что на 93% больше по сравнению с первым вариантом расчета. При этом далее по длине канала распределение давления становится более неравномерным по сравнению с первым случаем, появляется дополнительный пик давления при $l=0,067$ м ($p \approx 0.44$ МПа), которого не было ранее.

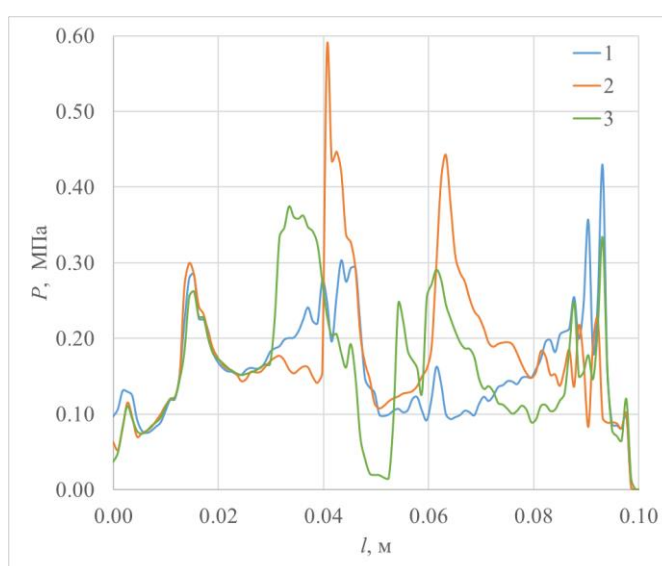


Рисунок 3 –Изменение давления по длине расчетной области в момент времени $\tau=0.43$:

1) без препятствий, 2) препятствием формы 1, 3) препятствием формы 2

В канале с серией сужений и расширений (рисунок 2в) фронт волны заходит в область сужения, при этом фронт волны деформируется и выгибается в сторону выхода из канала. Одновременно с этим начинается процесс отражения волн в области основания сужения ($\tau = 0,24$ с). По мере продвижения фронта передаваемой ударной волны к выходу из канала ее структура значительно меняется. В результате происходит множественное переотражение волн от верхней и нижней стенок по мере продвижения по участку с препятствиями. При этом происходит потеря части энергии, что отражается в виде резкого падения давления в середине профилируемого участка на расстоянии $l=0,043$ м (рисунок 3, график 3). Однако перед участком с препятствиями зона повышенного давления получается более обширной, но меньшей по уровню максимальных значений по сравнению с вариантом 2 на 36%.

Заключение

В работе выполнено численное исследование дифракции волны сжатия, возникающей при локальном импульсном энергоподводе в канале с открытым выходом, в присутствии периодических геометрических препятствий различного типа. Постановка задачи заключалась в сопоставлении трёх вариантов геометрии: канал без препятствий, канал с препятствием формы 1 и канал с препятствием формы 2 (рисунок 1) при одинаковых начальных и граничных условиях. Задача решалась на основании уравнений Навье-Стокса в нестационарной двумерной постановке. Для разрешения турбулентных структур различного масштаба был применен метод LES. В результате это позволило проанализировать вклад геометрической структуры препятствий на эволюцию волнового фронта и пространственное перераспределение давления.

Расчёты показали, что даже в базовой конфигурации без внутренних неоднородностей фронт не сохраняет простой формы по мере продвижения вдоль канала: отражения от стенок приводят к усложнению волновой картины и формированию нескольких локальных зон повышенного давления на расстоянии $l=0,043$ м ($p \approx 0.3$ МПа) и $l=0,096$ м ($p \approx 0.4$ МПа). Введение препятствий заметно изменяет этот сценарий. В случае ступенчатого расширения, показанном на рисунке 2б, основной эффект связан с формированием выраженной области

подпора непосредственно перед препятствием (рисунок 3, график 2), где давление получается выше на 93% ($p \approx 0.58$ МПа), по сравнению с начальным вариантом расчета. Для конфигурации с серией сужений и расширений характерна более глубокая перестройка течения: фронт деформируется, теряет исходную симметрию, а множественные переотражения в пределах профилированного участка приводят к расчленению поля давления и ослаблению локальных максимумов при расширении области их влияния.

Полученные результаты демонстрируют, что тип геометрической неоднородности влияет на режим перераспределения энергии в канале. Одни препятствия способствуют более выраженной локальной концентрации давления перед геометрическим барьером, другие — перераспределяют импульс по протяжённому участку, снижая пиковые значения, но усложняя пространственную структуру течения. Это дает широкое представление о сложном поведении ударных волн.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Я.Б.Зельдович Теория ударных волн и введение в газовую динамику / Отв. Ред. Н.Н.Семенов. Изд. 2-е.—М.:ЛЕНАНД, 2014.—192с.
2. Федоров, А. В. Распространение ударных и детонационных волн в каналах различной геометрии в газовзвесах / А. В. Федоров, Ю. В. Кратова, Т. А. Хмель, В. М. Фомин // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2008. – Т. 7. – С. 5. – EDN LALGQZ.
3. Федоров, А. В. Распространение ячеистой гетерогенной детонации в условиях изменяющейся геометрии / А. В. Федоров, Т. А. Хмель, Ю. В. Кратова // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2012. – Т. 13. – № 4. – С. 11. – EDN SCZTGT.
4. Булат, П. В. Численное моделирование дифракции ударной волны на прямом угле на неструктурированных сетках / П. В. Булат, К. Н. Волков // Научно-

технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т. 16. – № 2. – С. 354-362. – DOI 10.17586/2226-1494-2016-16-2-354-362. – EDN VSDNYP.

5. Kratova, Yu. Numerical simulation of heterogeneous detonations in plane and rectangular channels on hybrid CPU/GPU systems / Yu. Kratova, A. Kashkovsky, A. Shershnev // AIP Conference Proceedings : Proceedings of the XXVII Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter, dedicated to the 90th anniversary of the birth of RI Soloukhin, Novosibirsk, 29 июня – 03 2020 года. Vol. 2288. – Novosibirsk: AIP Publishing LLC, 2020. – P. 030016. – DOI 10.1063/5.0028360. – EDN BCKVOP.

6. Ohtomo, F. & Ohtani, Kiyonobu & Takayama, Kazuyoshi. (2005). Attenuation of shock waves propagating over arrayed baffle plates. Shock Waves. 14. 379-390. 10.1007/s00193-005-0282-5.

7. Wan, Qian & Eliasson, Veronica. (2015). Numerical Study of Shock Wave Attenuation in Two-Dimensional Ducts Using Solid Obstacles: How to Utilize Shock Focusing Techniques to Attenuate Shock Waves. Aerospace. 2. 10.3390/aerospace2020203.

8. Rajagopal, Arun & Pathak, Vaibhav. (2020). Shock wave mitigation using zig-zag structures and cylindrical obstructions. Defence Technology. 17. 10.1016/j.dt.2020.10.001.

9. Le, H. & Wu, J. & Gao, X. & Shi, W. & Song, J.. (2016). Influence of size effect on shearing strength of zig-zag structure plane. 35. 745-750. 10.11956/j.issn.1008-0562.2016.07.015.

10. Булат М. П. Численное моделирование регулярного и маховского отражения ударной волны от стенки / М. П. Булат, И. А. Волобуев, К. Н. Волков, В. А. Пронин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17. – № 5. – С. 920-928. – DOI 10.17586/2226-1494-2017-17-5-920-928. – EDN ZQQFON.

11. Menter F.R., Galpin P.F., Esch T., Kuntz M., Berner C. CFD Simulations of Aerodynamic Flows with a Pressure-Based Method // Paper ICAS 2004–2.4.1, Japan, Yokohoma, 2004. – 11 p.

References

1. Ya. B. Zel'dovich. Theory of Shock Waves and Introduction to Gas Dynamics / Ed. by N. N. Semenov. 2nd ed. — Moscow: LENAAND, 2014. — 192 p.
2. Fedorov, A. V. Propagation of Shock and Detonation Waves in Channels of Various Geometries in Gas Suspensions / A. V. Fedorov, Yu. V. Kratova, T. A. Khmel', V. M. Fomin // Physicochemical Kinetics in Gas Dynamics. — 2008. — Vol. 7. — P. 5. — EDN LALGQZ.
3. Fedorov, A. V. Propagation of Cellular Heterogeneous Detonation under Conditions of Changing Geometry / A. V. Fedorov, T. A. Khmel', Yu. V. Kratova // Physicochemical Kinetics in Gas Dynamics. — 2012. — Vol. 13. — No. 4. — P. 11. — EDN SCZTGT.
4. Bulat, P. V. Numerical Simulation of Shock Wave Diffraction at a Right Angle on Unstructured Grids / P. V. Bulat, K. N. Volkov // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. — 2016. — Vol. 16. — No. 2. — P. 354–362. — DOI 10.17586/2226-1494-2016-16-2-354-362. — EDN VSDNYP..
5. Kratova, Yu. Numerical simulation of heterogeneous detonations in plane and rectangular channels on hybrid CPU/GPU systems / Yu. Kratova, A. Kashkovsky, A. Shershnev // AIP Conference Proceedings : Proceedings of the XXVII Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter, dedicated to the 90th anniversary of the birth of RI Soloukhin, Novosibirsk, 29 июня – 03 2020 года. Vol. 2288. – Novosibirsk: AIP Publishing LLC, 2020. – P. 030016. – DOI 10.1063/5.0028360. – EDN BCKVOP.
6. Ohtomo, F. & Ohtani, Kiyonobu & Takayama, Kazuyoshi. (2005). Attenuation of shock waves propagating over arrayed baffle plates. Shock Waves. 14. 379-390. 10.1007/s00193-005-0282-5.
7. Wan, Qian & Eliasson, Veronica. (2015). Numerical Study of Shock Wave Attenuation in Two-Dimensional Ducts Using Solid Obstacles: How to Utilize Shock Focusing Techniques to Attenuate Shock Waves. Aerospace. 2. 10.3390/aerospace2020203.
8. Rajagopal, Arun & Pathak, Vaibhav. (2020). Shock wave mitigation using zig-zag structures and cylindrical obstructions. Defence Technology. 17. 10.1016/j.dt.2020.10.001.

9. Le, H. & Wu, J. & Gao, X. & Shi, W. & Song, J.. (2016). Influence of size effect on shearing strength of zig-zag structure plane. 35. 745-750. 10.11956/j.issn.1008-0562.2016.07.015.

10. Bulat M. P. Numerical Simulation of Regular and Mach Reflection of a Shock Wave from a Wall / M. P. Bulat, I. A. Volobuev, K. N. Volkov, V. A. Pronin // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. — 2017. — Vol. 17. — No. 5. — P. 920–928. — DOI 10.17586/2226-1494-2017-17-5-920-928. — EDN ZQQFON.

11. Menter F.R., Galpin P.F., Esch T., Kuntz M., Berner C. CFD Simulations of Aerodynamic Flows with a Pressure-Based Method // Paper ICAS 2004–2.4.1, Japan, Yokohoma, 2004. – 11 p.

Информация об авторах

Александр Андреевич Сназин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2929-5194>; e-mail: alexandersnzn@mail.ru

Василий Иванович Шевченко, младший научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Aleksandr A. Snazin, Ph.D, Senior Researcher, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2929-5194>; e-mail: alexandersnzn@mail.ru

Vasiliy I. Sevchenko, Junior Researcher, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia.

Получено 13 апреля 2026 ● Принято к публикации 20 мая 2026 ● Опубликовано 31 августа 2026
Received 13 April 2026 ● Accepted 20 May 2026 ● Published 31 August 2026
