

03.1

Гашение детонационного горения водородно-воздушной смеси в плоском канале

© В.А. Левин, Т.А. Журавская

Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: zhuravskaya@imec.msu.ru

Поступило в Редакцию 19 июня 2023 г.

В окончательной редакции 19 июля 2023 г.

Принято к публикации 26 июля 2023 г.

Представлены результаты численного исследования взаимодействия сформированной ячеистой волны детонации, распространяющейся в заполненном покоящейся стехиометрической водородно-воздушной смесью плоском канале, с расположенными на внутренней поверхности канала множественными препятствиями (барьерами). Исследовано влияние геометрических параметров области с препятствиями на распространение детонации. Обнаружено, что локализация препятствий в углублении стенки канала приводит к снижению их разрушающего воздействия на волну. Изучена возможность гашения детонации расположенным вдоль стенки канала слоем воздуха, ограниченным одиночными барьерами. Установлено, что заполнение области с серией барьеров воздухом или аргоном усиливает их разрушающее воздействие на волну, способствуя тем самым гашению детонационного горения.

Ключевые слова: плоский канал, детонация, множественные препятствия, слой воздуха, разрушение детонации.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.18.56177.19657

Определение новых способов гашения детонационного горения с целью решения задач взрывобезопасности представляет большой интерес. Так, в рамках развития атомно-водородной энергетики высока потребность в разного рода конструктивных решениях как элементах пассивной системы безопасности. Исследования показали, что для разрушения распространяющейся детонационной волны можно использовать завесы из не реагирующих частиц пыли [1], помещенные в газ неподвижные инертные частицы или облака частиц [2,3], щелевые пластины [4], перфорированные стенки [5,6], различные пористые вставки на внутренней поверхности канала [7–9]. Разрушающее воздействие на волну оказывают также расположенные в канале барьеры. Было установлено, что в случае стехиометрической водородно-воздушной смеси для повышения устойчивости детонации к возмущениям, вызванным барьерами, можно использовать как предварительную частичную диссоциацию молекулярного кислорода и водорода на атомы, так и внесение в смесь добавок аргона и озона в подобранных концентрациях [10–12]. В настоящей работе численно исследуется распространение детонационной волны в стехиометрической водородно-воздушной смеси в плоском канале, на одной из стенок которого локально расположены множественные препятствия (барьеры), с целью определения способов усиления их разрушающего воздействия на волну.

Рассматривается распространение детонационной волны в покоящейся при нормальных условиях ($p_0 = 101\,325$ Па, $T_0 = 298$ К) стехиометрической водородно-воздушной смеси в полубесконечном

плоском канале шириной L ($L = 2$ см), на внутренней поверхности которого расположена область с барьерами. Для инициирования детонации используется мгновенный однородный сверхкритический подвод энергии в узком слое около закрытого торца канала. Горючая смесь моделируется смесью газов H_2 , O_2 , N_2 в молярном соотношении 42:21:79 соответственно.

Система уравнений, описывающих плоское двумерное нестационарное течение невязкой многокомпонентной реагирующей газовой смеси, имеет вид

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

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho(u^2 + v^2)/2 + \rho h - p)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u((u^2 + v^2)/2 + h))}{\partial x}$$

$$+ \frac{\partial(\rho v((u^2 + v^2)/2 + h))}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho n_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u n_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v n_i)}{\partial y} = \rho \omega_i, \quad i = 1, \dots, M.$$

Здесь x и y — декартовы координаты; u и v — соответствующие компоненты скорости; t — время; ρ , p и h — плотность, давление и удельная энтальпия смеси; n_i и ω_i — удельные концентрация и скорость образования

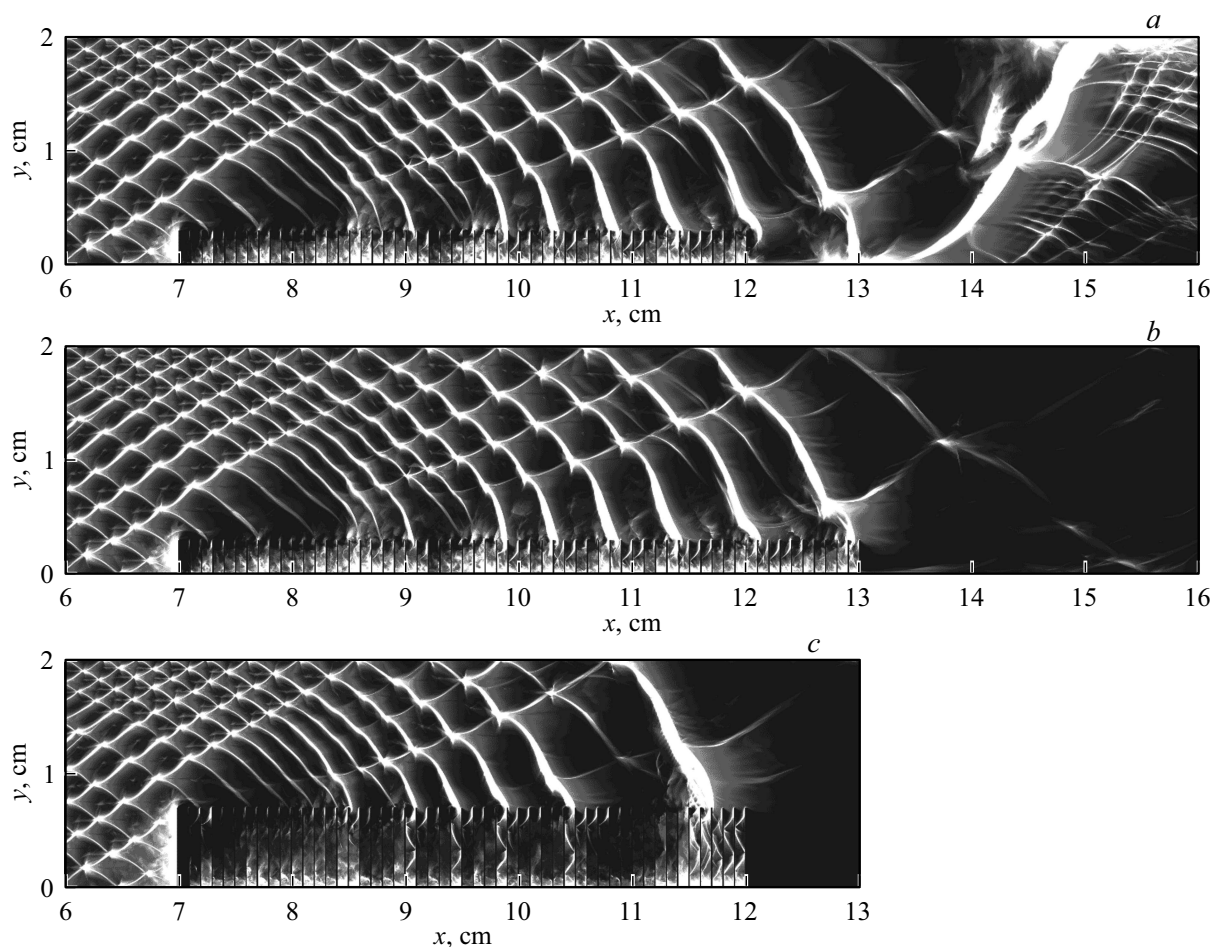


Рис. 1. Численные аналоги следа детонационной волны при взаимодействии с множественными барьерами ($\Delta L_b = 1$ mm). *a* — реиницирование детонации при $L_b = 5$ cm и $H_b = 3$ mm; *b, c* — гашение детонационного горения при $L_b = 6$ cm, $H_b = 3$ mm и $L_b = 5$ cm, $H_b = 7$ mm соответственно. Здесь и далее волна распространяется слева направо.

i -го компонента смеси; M — количество компонентов. Уравнения состояния горючей смеси следующие:

$$p = \rho R_0 T \sum_{i=1}^M n_i, \quad h = \sum_{i=1}^M n_i h_i(T).$$

Здесь T — температура, R_0 — универсальная газовая постоянная. Зависимости парциальных энтальпий от температуры $h_i(T)$ определяются по приведенным энергиям Гиббса соответствующих компонентов смеси [13]. Для описания химического взаимодействия используется детальный кинетический механизм окисления водорода, предложенный в работе [14].

Расположенные в канале барьеры моделируются как бесконечно тонкие твердые поверхности, на которых, как и на стенках канала, выполняется условие непротекания.

Для решения уравнений газовой динамики использовалась явная схема второго порядка аппроксимации на основе схемы Годунова [15]. Расчет проведен на сетке с шагом разбиения $\Delta = 5 \mu\text{m}$, обеспечивающим корректное разрешение структуры волны детонации. Для

численного моделирования использовался оригинальный программный модуль, в котором реализовано гибридное распараллеливание расчетов MPI/OpenMP. Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова [16].

В результате начального энергоподвода инициируется плоская детонационная волна, фронт которой со временем искривляется, возникают поперечные волны, в результате формируется самоподдерживающаяся детонационная волна с ячеистой структурой. Поперечные волны, распространяющиеся вдоль переднего фронта и испытывающие периодические встречные столкновения, сопрягаются с фронтом через трехударные маховские конфигурации. Вследствие высокой температуры в окрестности точек сопряжения распространяющаяся в эксперименте детонационная волна выжигает на расположенной вдоль стенки канала закопченной пластине ромбовидные ячейки, образованные траекториями тройных точек [17]. Численные аналоги наблюдаемого в

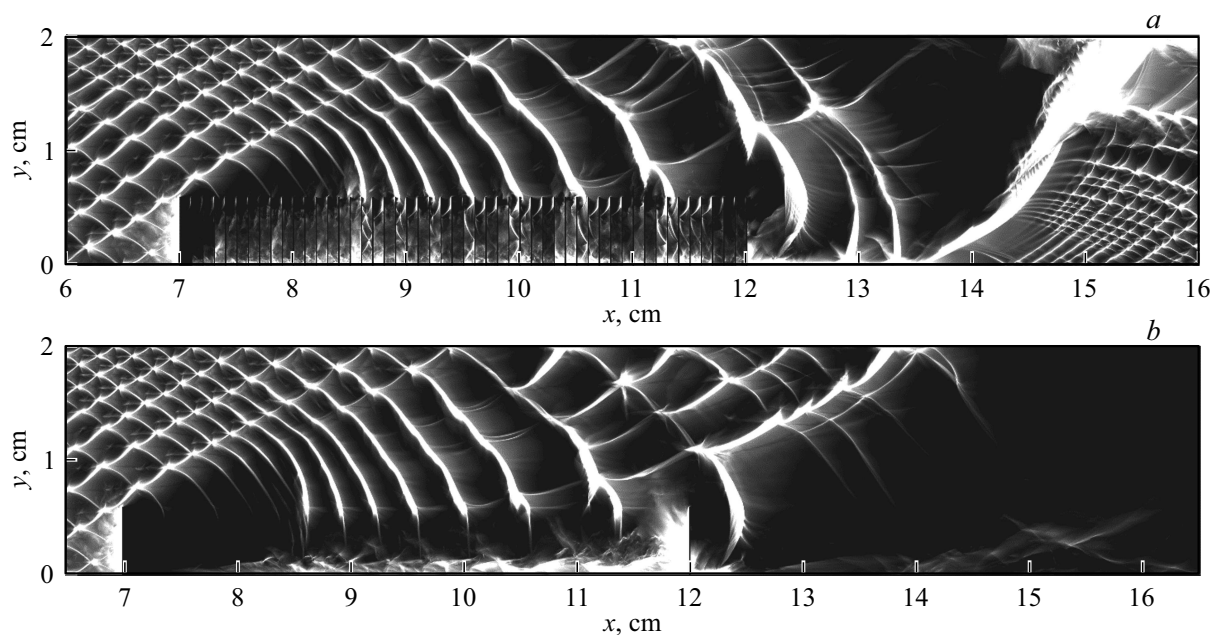


Рис. 2. Численные аналоги следа детонационной волны при взаимодействии с областью с барьерами ($\Delta L_b = 1$ мм) и слоем воздуха при $L_b = 5$ см и $H_b = 6$ мм. *a* — реиницирование детонации после прохождения области с барьерами; *b* — гашение детонационного горения слоем воздуха.

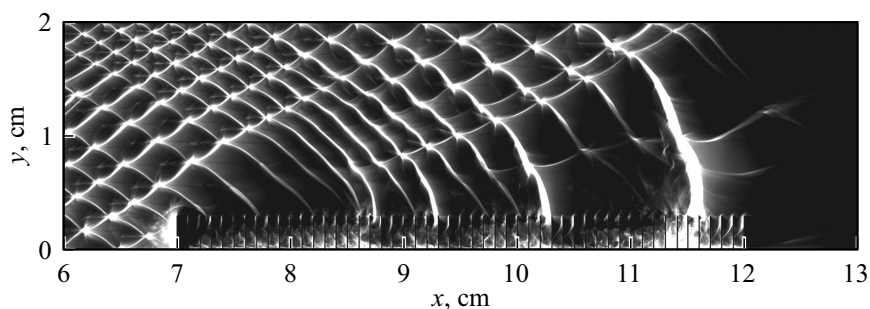


Рис. 3. Численный следовой отпечаток, иллюстрирующий гашение детонационного горения заполненной воздухом областью с барьерами ($L_b = 5$ см, $H_b = 3$ мм, $\Delta L_b = 1$ мм).

эксперименте следа волны используются в работе для иллюстрации полученных результатов (рис. 1–3).

Положение препятствий на стенке канала выбиралось так, чтобы к ним подходила сформировавшаяся ячеистая детонация. Результат взаимодействия волны с областью с препятствиями зависит от протяженности области L_b , высоты барьеров H_b и расстояния между соседними барьерами ΔL_b . В настоящей работе рассмотрены области с шагом расстановки препятствий $\Delta L_b = 1$ мм. Проведенные расчеты показали, что увеличение высоты барьеров или протяженности области при прочих фиксированных параметрах можно рассматривать как способы гашения детонационного горения. Так, детонация восстанавливается после взаимодействия с препятствиями высотой $H_b = 3$ мм, расположенными на части стенки канала протяженностью $L_b = 5$ см (рис. 1, *a*). Однако расширение области до $L_b = 6$ см или увеличение высоты препятствий до $H_b = 7$ мм оказываются

достаточными условиями для гашения детонационного горения барьерами (рис. 1, *b* и *c*). Анализ распространения детонационной волны (рис. 1) показал, что при прохождении детонации вдоль области с барьерами наблюдается гашение поперечных волн на препятствиях и зарождение новых в волне детонации, при этом размер ячейки детонационной волны постепенно увеличивается, что согласуется с результатами экспериментов по распространению детонации в каналах с пористыми стенками [9].

Наряду с препятствиями, расположенными на внутренней поверхности канала, которые можно рассматривать как вставку с пористым покрытием, например покрытую стальной ватой [18], изучено взаимодействие волны с множественными барьерами, помещенными в углубление стенки (в нишу). Рассматривались барьеры, высота которых равна глубине ниши. Расположенные таким образом препятствия моделируют пористую вставку

в стенке канала. Расчеты показали, что, несмотря на расширение канала в области барьеров (величина расширения докритическая), приводящее к локальному распаду волны при ее выходе в углубление, общее разрушающее воздействие препятствий на волну существенно слабее, чем в случае препятствий, расположенных на внутренней поверхности канала, при прочих равных условиях. Это связано с тем, что при расположении барьеров в нише формируется течение с распространяющейся волной в канале с препятствиями, ширина которого больше ширины первоначального канала на величину углубления.

Исследовано взаимодействие волны детонации с расположенным вдоль стенки канала слоем воздуха при нормальных условиях, ограниченным с обеих сторон одиночными барьерами. Получено, что, как и в случае области с препятствиями, воздушный слой способствует гашению детонации, при этом увеличение его высоты или протяженности усиливает разрушающее воздействие слоя на волну. Более того, в ряде случаев установлено, что использование слоя воздуха для гашения детонационного горения более эффективно, чем области с препятствиями той же высоты и протяженности с расстоянием между барьерами $\Delta L_b = 1 \text{ mm}$ (рис. 2).

Подобно наблюдаемому в экспериментах при детонационном горении смеси с нерегулярной ячейистой структурой в каналах с пористыми вставками [9], в расчетах получено, что сохранение/гашение детонации при взаимодействии с барьерами определяется конкуренцией двух противоположных процессов: ослабления поперечных волн на барьерах и зарождения новых из локальных возмущений в зоне реакции (рис. 1). Следовательно, конструктивные изменения, усиливающие первый из них, будут способствовать разрушению детонационной волны. Установлено, что подобным способом увеличения разрушающего воздействия препятствий на волну является заполнение области с барьерами воздухом. Так, при замене первоначальной горючей смеси на воздух между препятствиями высотой $H_b = 3 \text{ mm}$ в области протяженностью $L_b = 5 \text{ cm}$ наблюдается полное гашение детонации (рис. 3), в то время как данная область с препятствиями при ее заполнении горючей смесью (рис. 1, а) или слой воздуха с теми же протяженностью и высотой не разрушают волну. Расчеты показали, что замена воздуха на аргон в области с барьерами из-за большого молярного веса последнего приводит к более активному формированию отраженных от области волн. Тем не менее заполнение области аргоном также может рассматриваться в качестве конструктивного решения, способствующего гашению детонации серией барьеров.

Таким образом, проведенное численное моделирование взаимодействия сформированной ячейистой волны детонации, распространяющейся в заполненном покоящейся стехиометрической водородно-воздушной смесью плоском канале, с расположенными на внутренней поверхности канала множественными препятствиями (барьерами) показало, что увеличение их высоты или

протяженности области с препятствиями при прочих равных условиях способствует гашению детонационного горения, а размещение барьеров в углублении стенки канала, напротив, ослабляет их разрушающее воздействие на волну. Обнаружено, что для гашения детонации можно использовать расположенный вдоль стенки канала слой воздуха, ограниченный одиночными барьерами. Установлено, что заполнение области с препятствиями воздухом или аргоном усиливает их разрушающее воздействие на детонационную волну.

Финансирование работы

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте механики МГУ при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00307).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Васильев, А.В. Пинаев, А.А. Трубицын, А.Ю. Грачёв, А.В. Трошчок, П.А. Фомин, А.В. Трилис, Физика горения и взрыва, **53** (1), 11 (2017). DOI: 10.15372/FGV20170102 [A.A. Vasil'ev, A.V. Pinaev, A.A. Trubitsyn, A.Yu. Grachev, A.V. Trotsyuk, P.A. Fomin, A.V. Trilis, Combust. Explos. Shock Waves, **53** (1), 8 (2017). DOI: 10.1134/S0010508217010026].
- [2] I.A. Bedarev, A.V. Fedorov, J. Phys.: Conf. Ser., **894** (1), 012008 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012008
- [3] D.A. Tropin, Int. J. Hydrogen Energy, **47** (66), 28699 (2022). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.169
- [4] T. Obara, J. Sentanuhady, Y. Tsukada, S. Ohyagi, Shock Waves, **18** (2), 117 (2008). DOI: 10.1007/s00193-008-0147-9
- [5] С.П. Медведев, С.В. Хомик, Б.Е. Гельфанд, Хим. физика, **28** (12), 52 (2009). <https://elibrary.ru/item.asp?id=12989243> [S.P. Medvedev, S.V. Khomik, B.E. Gel'fand, Russ. J. Phys. Chem. B, **3** (6), 963 (2009). DOI: 10.1134/S1990793109060165].
- [6] H. Qin, J.H.S. Lee, Z. Wang, F. Zhuang, Proc. Combust. Inst., **35** (2), 1973 (2015). DOI: 10.1016/j.proci.2014.07.056
- [7] О.В. Шарьпов, Е.А. Пирогов, Физика горения и взрыва, **31** (4), 71 (1995). [O.V. Sharypov, Y.A. Pirogov, Comb. Explos. Shock Waves, **31** (4), 466 (1995). DOI: 10.1007/BF00789368].
- [8] A. Teodorczyk, J.H.S. Lee, Shock Waves, **4** (4), 225 (1995). DOI: 10.1007/BF01414988
- [9] M.I. Radulescu, J.H.S. Lee, Combust. Flame, **131** (1-2), 29 (2002). DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00390-5
- [10] В.А. Левин, Т.А. Журавская, Письма в ЖТФ, **46** (4), 40 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.04.49050.18074 [V.A. Levin, T.A. Zhuravskaya, Tech. Phys. Lett., **46** (2), 189 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020020248].
- [11] Т.А. Журавская, В.А. Левин, Изв. РАН. Механика жидкости и газа, № 4, 59 (2020). DOI: 10.31857/S0568528120040131 [T.A. Zhuravskaya, V.A. Levin, Fluid Dyn., **55** (4), 488 (2020). DOI: 10.1134/S0015462820040138].

- [12] В.А. Левин, Т.А. Журавская, Докл. РАН. Физика, технические науки, **501** (1), 48 (2021). DOI: 10.31857/S2686740021060110 [V.A. Levin, T.A. Zhuravskaya, Dokl. Phys., **66** (12), 320 (2021). DOI: 10.1134/S1028335821110057].
- [13] *Термодинамические свойства индивидуальных веществ*, отв. ред. В.П. Глушко (Наука, М., 1978), т. I, кн. 2. [*Thermodynamic properties of individual substances*, ed. by L.V. Gurvich, I.V. Veyts (Hemisphere, N.Y., 1989), vol. 1, pt 2].
- [14] L.V. Bezgin, V.I. Korchenov, A.S. Sharipov, N.S. Titova, A.M. Starik, Combust. Sci. Technol., **185** (1), 62 (2013). DOI: 10.1080/00102202.2012.709562
- [15] А.В. Родионов, Журн. вычислительной математики и математической физики, **27** (4), 585 (1987). [A.V. Rodionov, USSR Comput. Math. Math. Phys., **27** (2), 175 (1987). DOI: 10.1016/0041-5553(87)90174-1].
- [16] V.I. Voevodin, A. Antonov, D. Nikitenko, P. Shvets, S. Sobolev, I. Sidorov, K. Stefanov, Vad. Voevodin, S. Zhumatiy, Supercomput. Front. Innov., **6** (2), 4 (2019). DOI: 10.14529/jsfi190201
- [17] Р.И. Солоухин, *Ударные волны и детонация в газах* (ГИФМЛ, М., 1963), с. 150–152.
- [18] G.Yu. Bivol, S.V. Golovastov, V.V. Golub, Shock Waves, **28** (5), 1011 (2018). DOI: 10.1007/s00193-018-0831-3