

УДК 534.222.2

РАЗРУШЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ БАРЬЕРАМИ

© 2024 г. Т. А. Журавская*, В. А. Левин

Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: zhuravskaya@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 02.11.2023 г.

После доработки 14.11.2023 г.

Принята к публикации 14.11.2023 г.

Представлены результаты численного исследования взаимодействия сформированной ячеистой волны детонации, распространяющейся в заполненном покоящейся стехиометрической водородно-воздушной смесью плоском канале, с расположенными на его внутренней поверхности множественными препятствиями (барьерами). Исследование проведено в целях определения условий, обеспечивающих подавление детонации. Изучено влияние геометрических параметров области с препятствиями на распространение волны. Обнаружено, что локализация препятствий в углублении в стенке канала приводит к снижению их разрушающего воздействия на детонацию. Рассмотрено гашение детонационного горения расположенным вдоль стенки канала слоем не реагирующего газа, ограниченным одиночными барьерами. Исследовано влияние состава газа на взаимодействие волны детонации со слоем. Предложены не реагирующие газовые смеси, при заполнении которыми области с препятствиями усиливается разрушающее воздействие барьеров на детонационную волну.

Ключевые слова: плоский канал, самоподдерживающаяся детонационная волна, множественные препятствия (барьеры), слой не реагирующего газа, гашение детонационного горения

DOI: 10.31857/S1024708424020135 EDN: RINJEP

Определение новых способов гашения детонации для решения задач взрывобезопасности представляет собой одно из основных направлений изучения детонационного горения. Исследования показали, что для разрушения распространяющейся волны детонации можно использовать завесы из не реагирующих частиц пыли [1], помещенные в газ неподвижные инертные частицы или облака частиц [2–3].

Установлено, что в качестве элементов пассивной системы взрывобезопасности можно рассматривать расположенные в канале щелевые пластины [4] и перфорированные стенки [5, 6], различные пористые вставки на внутренней поверхности канала, см., например, [7–10]. Разрушающее воздействие на волну оказывают помещенные в канал препятствия различной конфигурации [11–15], в том числе множественные барьеры, расположенные на его внутренней поверхности.

Было обнаружено, что в случае стехиометрической водородно-воздушной смеси для повышения устойчивости детонации к возмущениям, вызванным серией барьеров, можно использовать как предварительную частичную диссоциацию молекулярного кислорода и водорода на атомы [13, 14], так и одновременное внесение в смесь добавок аргона и озона [15].

Продолжая исследование [16], данная работа численно изучает распространение детонационной волны в стехиометрической водородно-воздушной смеси в плоском канале, на одной из стенок которого локально расположены множественные барьеры, в целях определения условий, обеспечивающих гашение детонационного горения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается распространение детонационной волны в покоящейся при нормальных условиях ($p_0 = 1$ атм, $T_0 = 298$ К) стехиометрической водородно-воздушной смеси в полубесконечном плоском канале шириной L ($L = 2$ см), на внутренней поверхности которого расположена область с барьерами. Подобные серии препятствий можно рассматривать как модель вставки с пористым покрытием, например, покрытой стальной ватой [10].

Для инициирования детонации используется мгновенный однородный сверхкритический (достаточный для прямого инициирования детонации) 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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial(\rho(u^2 + v^2)/2 + \rho h - p)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u((u^2 + v^2)/2 + h))}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v((u^2 + v^2)/2 + h))}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial(\rho n_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u n_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v n_i)}{\partial y} = \rho \omega_i, \quad i = 1, \dots, M. \end{aligned}$$

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 i -го компонента смеси; M – количество компонентов. Уравнения состояния горючей смеси есть

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

где T – температура; R_0 – универсальная газовая постоянная. Зависимости парциальных энтальпий от температуры $h_i(T)$ определяются по приведенным энергиям Гиббса соответствующих компонентов смеси [17]. Для описания химического взаимодействия используется детальный кинетический механизм окисления водорода, предложенный в работе [18].

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 С.К. Годунова [19–22].

Расчет проведен на сетке с шагом разбиения $\Delta = 5$ мкм, 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 [23].

ГАШЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛЕ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Начальный однородный энергоподвод инициирует плоскую детонационную волну, фронт которой со временем искривляется, возникают поперечные волны, в результате формируется самоподдерживающаяся детонационная волна с ячеистой структурой [24]. Нерегулярность полученной в расчетах структуры детонации согласуется с результатами экспериментального исследования детонационного горения разбавленных азотом водородно-кислородных смесей [25].

Средняя скорость распространения полученной в расчетах самоподдерживающейся волны $D \cong 1970$ м/с. Относительное отклонение численного значения скорости от определенного в эксперименте [26] не превосходит 0.5%. Протяженность зоны индукции (расстояние от лидирующей ударной волны до точки максимального градиента температуры в зоне реакции), полученная при рассмотрении структуры детонации Зельдовича–Неймана–Деринга, $\Delta_{ind} = 0.23$ мм, что совпадает с данными работы [27].

Однако следует отметить, что средний размер детонационной ячейки полученной в расчетах волны существенно меньше размера ячейки детонации, наблюдаемой в эксперименте [26, 28]. Подобное несоответствие размеров численной и экспериментальной детонационных ячеек в водородно-воздушной смеси отмечалось в ряде работ (см., напр., [29]).

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 .

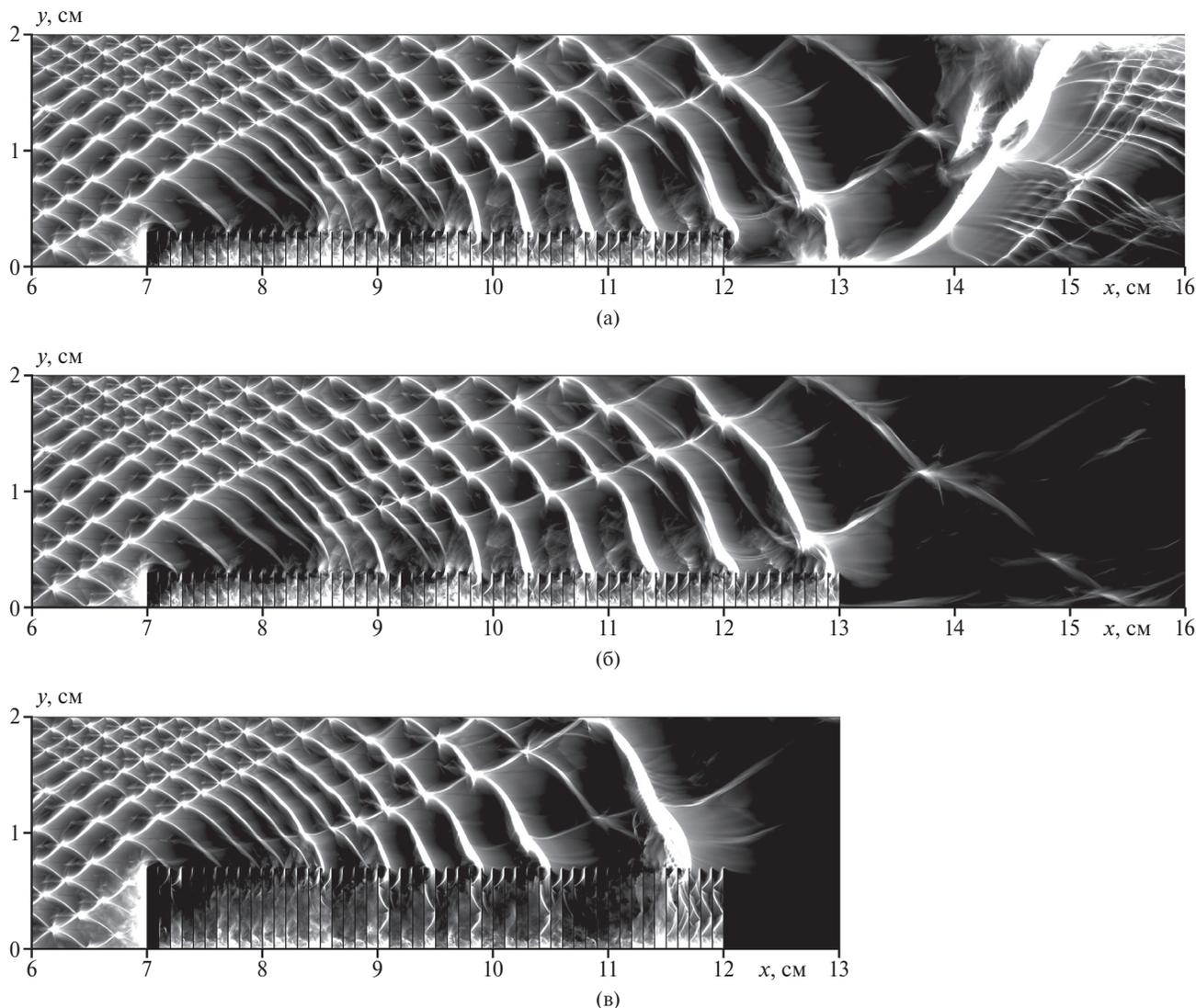


Рис. 1. Численные аналоги следа детонационной волны при взаимодействии с множественными барьерами ($\Delta L_b = 1$ мм): а – реиницирование детонации при $L_b = 5$ см и $H_b = 3$ мм; б, в – гашение детонационного горения при $L_b = 6$ см, $H_b = 3$ мм и $L_b = 5$ см, $H_b = 7$ мм соответственно. Здесь и далее волна распространяется слева направо.

В данной 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. 1а).

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. 1б, в). На рис. 1 и далее представлены численные аналоги следа, оставляемого в эксперименте проходящей детонационной волной на расположенной вдоль стенки канала закопченной пластине.

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. Подобное изменение структуры волны наблюдалось при экспериментальных исследованиях распространения детонации в каналах с пористыми стенками [9].

В случае реиницирования детонации после взаимодействия с барьерами (см. рис. 1а) восстановление детонационного горения поперек всего канала происходит на некотором расстоянии от препятствий: первоначально формируется пересжатая детонация, о чем свидетельствует ее мелкая ячеистая структура;

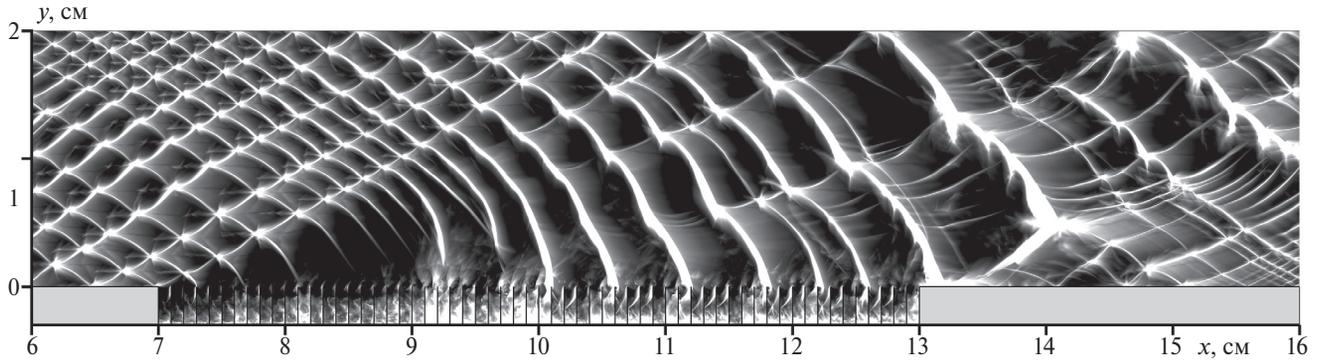


Рис. 2. Численный аналог следа детонационной волны при взаимодействии с множественными барьерами, расположенными в углублении в стенке канала ($L_b = 6$ см, $H_b = 3$ мм, $\Delta L_b = 1$ мм).

постепенно размер детонационной ячейки увеличивается. Такой характер восстановления детонации наблюдался в экспериментах для смесей с нерегулярной ячеистой структурой [6].

Наряду с препятствиями на внутренней поверхности канала рассмотрено взаимодействие волны с множественными барьерами, помещенными в расположенную в стенке нишу, глубина которой равна высоте препятствий. Расчеты показали, что несмотря на расширение канала в области барьеров (величина расширения докритическая), приводящее к локальному распаду волны при ее выходе в углубление (нишу), общее разрушающее воздействие препятствий на волну существенно слабее, чем препятствий, расположенных на внутренней поверхности канала, при прочих равных условиях.

Так, область протяженностью $L_b = 6$ см с барьерами высотой $H_b = 3$ мм, гасящая детонационное горение в случае ее расположения на внутренней поверхности канала (см. рис. 1б), не разрушает волну при ее локализации в углублении (рис. 2).

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, а расширение канала при прочих равных условиях снижает разрушающее воздействие препятствий на детонацию.

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, наличие воздушного слоя приводит к ослаблению подходящих к нему поперечных волн, а увеличение его протяженности или высоты усиливают разрушающее воздействие слоя на волну (рис. 3).

Более того, в ряде случаев установлено, что использование воздушного слоя для гашения детонационного горения более эффективно по сравнению с областью с препятствиями той же высоты и протяженности с расстоянием между барьерами $\Delta L_b = 1$ мм (рис. 4).

Так, использование воздушного слоя протяженностью $L_b = 5$ см и высотой $H_b = 6$ мм позволяет погасить детонационное горение (рис. 4а), в то время как область с препятствиями с теми же параметрами не разрушает детонацию (рис. 4б).

Рассмотрено взаимодействие волны с рассматриваемым слоем ($L_b = 5$ см, $H_b = 6$ мм) в случае замены воздуха другим не реагирующим газом. Использование аргона (Ar) вместо воздуха при прочих равных условиях усиливает отражение поперечных волн от слоя в связи с его более высокой плотностью (в этом случае отношение плотности газа в слое к плотности стехиометрической водородно-воздушной смеси $\alpha = 1.91$, в то время как для слоя воздуха $\alpha = 1.38$), что снижает разрушающее воздействие слоя на волну. Согласно расчетам, после взаимодействия со слоем аргона с данными параметрами детонационная волна восстанавливается (рис. 5а).

Замена воздуха на гелий ($\alpha = 0.19$) качественно меняет характер взаимодействия детонационной волны со слоем (рис. 5б). В этом случае формируется движущаяся по гелию ударная волна, которая опережает волну детонации в горючей смеси, сопрягаясь с ней через косой скачок (рис. 6). Возникающее в этом случае течение подобно формирующемуся при взаимодействии ударной волны со слоем газа пониженной плотности, подробное исследование которого проведено в [30].

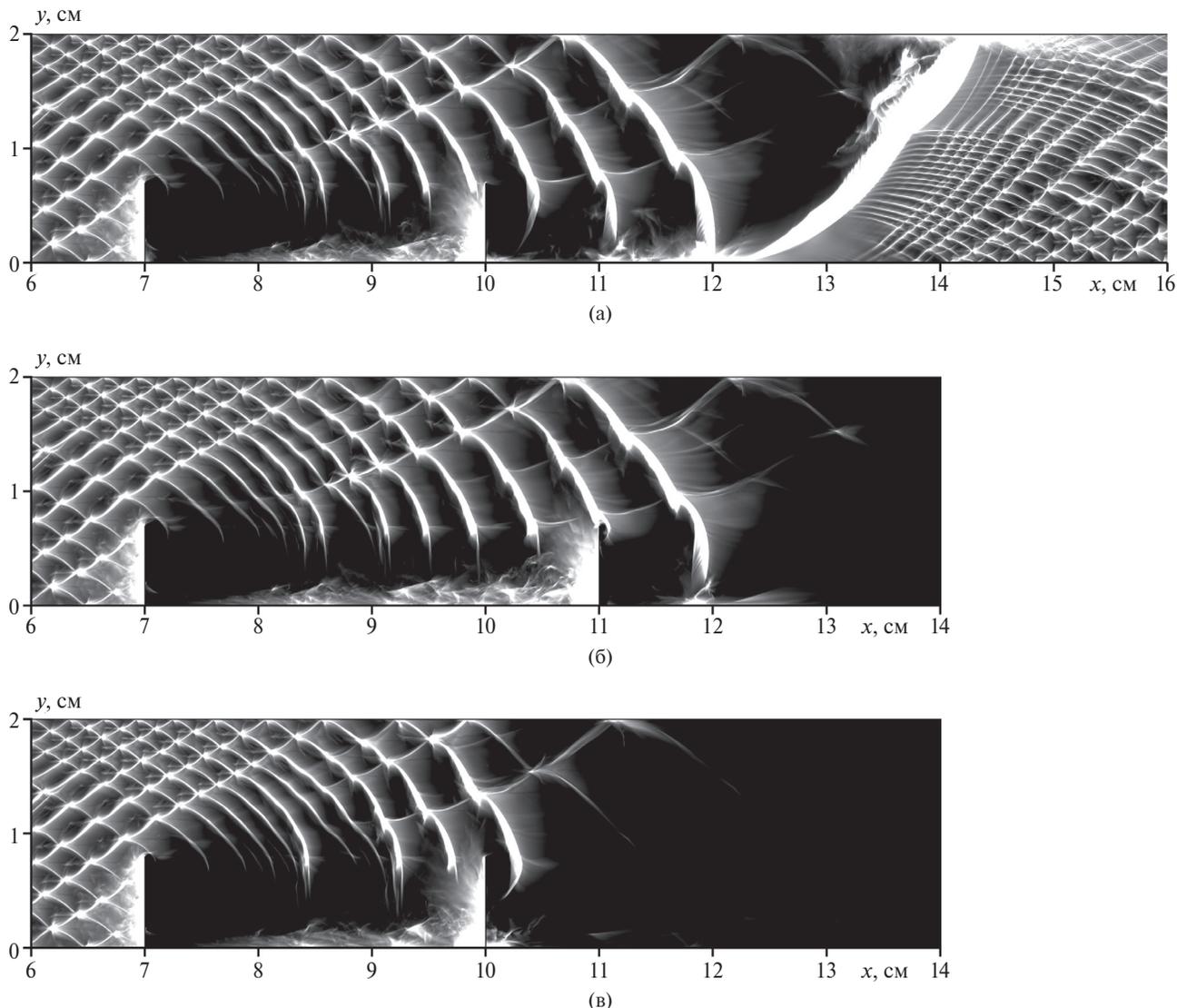


Рис. 3. След детонационной волны при взаимодействии со слоем воздуха: а – реиницирование детонации при $L_b = 3$ см и $H_b = 7$ мм; б, в – гашение детонационного горения при $L_b = 4$ см, $H_b = 7$ мм и $L_b = 3$ см, $H_b = 8$ мм соответственно.

На этапе формирования обгоняющей детонацию ударно-волновой структуры, получившей название “предвестник”, ее высота меняется незначительно и близка к начальной высоте слоя гелия. На этом этапе происходит гашение поперечных волн в волне детонации, размер детонационной ячейки увеличивается.

Далее высота сформированного “предвестника” растет по закону, близкому к линейному, что приводит к сужению области детонационного горения. Волна детонации становится пересжатой: ее скорость растет, ячеистая структура измельчается. В результате вышедшая из области над слоем гелия волна реиницирует детонационное горение поперек всего канала на некотором расстоянии от слоя (рис. 5б). Таким образом, замена воздуха на гелий также снижает разрушающее воздействие слоя на детонацию.

Рассмотрено взаимодействие детонационной волны со слоем нереагирующего газа, состав которого подобран из условия $\alpha = 1$ (равенство плотностей стехиометрической водородно-воздушной смеси и газа в слое). Установлено, что в случае заполнения рассматриваемого слоя смесью 7.1 He–16.9 N₂ детонационная волна разрушается после взаимодействия с ним (рис. 5в). Однако использование в слое смеси 19.1 He–16.9 Ar при прочих равных условиях не приводит к гашению детонационного горения (рис. 5г). Это связано с большей скоростью распространения ударной волны по слою в последнем случае, что уменьшает искривление детонационного фронта и снижает разрушающее воздействие слоя на волну.

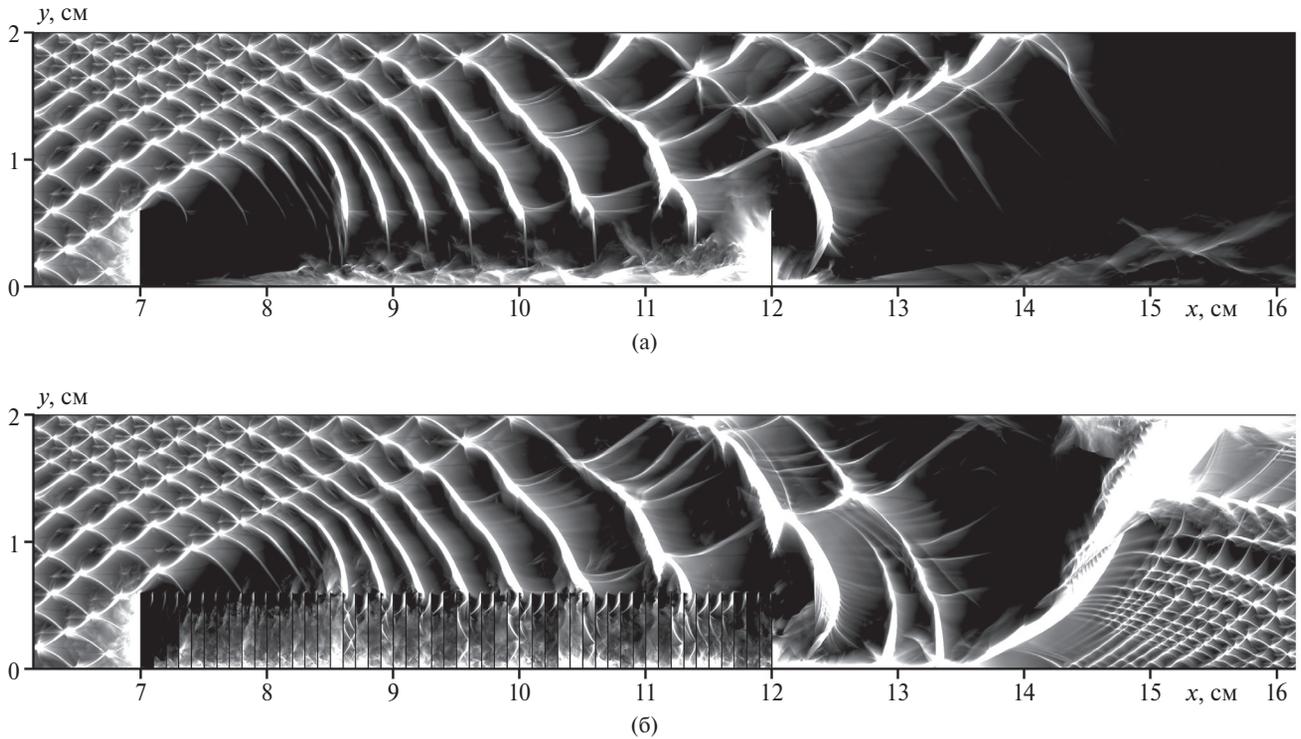


Рис. 4. Численный след детонационной волны при взаимодействии со слоем воздуха и областью с барьерами ($\Delta L_b = 1$ мм) при $L_b = 5$ см и $H_b = 6$ мм: а – гашение детонационного горения слоем воздуха; б – реиницирование детонации после прохождения области с барьерами.

Подобно наблюдаемому в экспериментах при детонационном горении смесей с нерегулярной ячеистой структурой в каналах с пористыми вставками [9] в расчетах получено, что сохранение/гашение детонации при взаимодействии с барьерами определяется конкуренцией двух противоположных процессов: ослаблением поперечных волн на барьерах и зарождением новых из локальных возмущений в зоне реакции (см. рис. 1). Следовательно, конструктивные изменения, усиливающие первый из них, будут способствовать разрушению детонационной волны.

Согласно проведенному исследованию, подобным способом увеличения разрушающего воздействия препятствий на волну является заполнение области с барьерами рядом не реагирующих газов. Так, при замене первоначальной горючей смеси на воздух между препятствиями высотой $L_b = 3$ мм в области протяженностью $L_b = 5$ см наблюдается полное гашение детонации (рис. 7а), в то время как данная область с препятствиями при ее заполнении горючей смесью (рис. 1а) или слой воздуха с теми же протяженностью и высотой не разрушают волну. Расчеты показали, что достаточным условием для подавления детонации при взаимодействии с данной серией препятствий ($L_b = 5$ см, $H_b = 3$ мм) является также заполнение пространства между барьерами аргоном, несмотря на более интенсивное формирование отраженных от области волн в этом случае (рис. 7б).

Рассмотрено взаимодействие волны детонации с данной областью с барьерами при ее заполнении не реагирующим газом (азотом, аргоном или воздухом), разбавленным гелием из условия равенства плотностей газа в области и горючей смеси в остальной части канала (т.е. при $\alpha = 1$). Наиболее эффективным оказалось заполнение пространства между препятствиями смесью 19.1 He–16.9 Ar, обеспечивающей разрушение волны детонации (рис. 7в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное моделирование взаимодействия сформированной ячеистой волны детонации, распространяющейся в заполненном покоящейся стехиометрической водородно-воздушной смесью плоском канале, с расположенными на его внутренней поверхности множественными препятствиями (барьерами). Определены условия и предложены конструктивные решения, обеспечивающие подавление детонации.

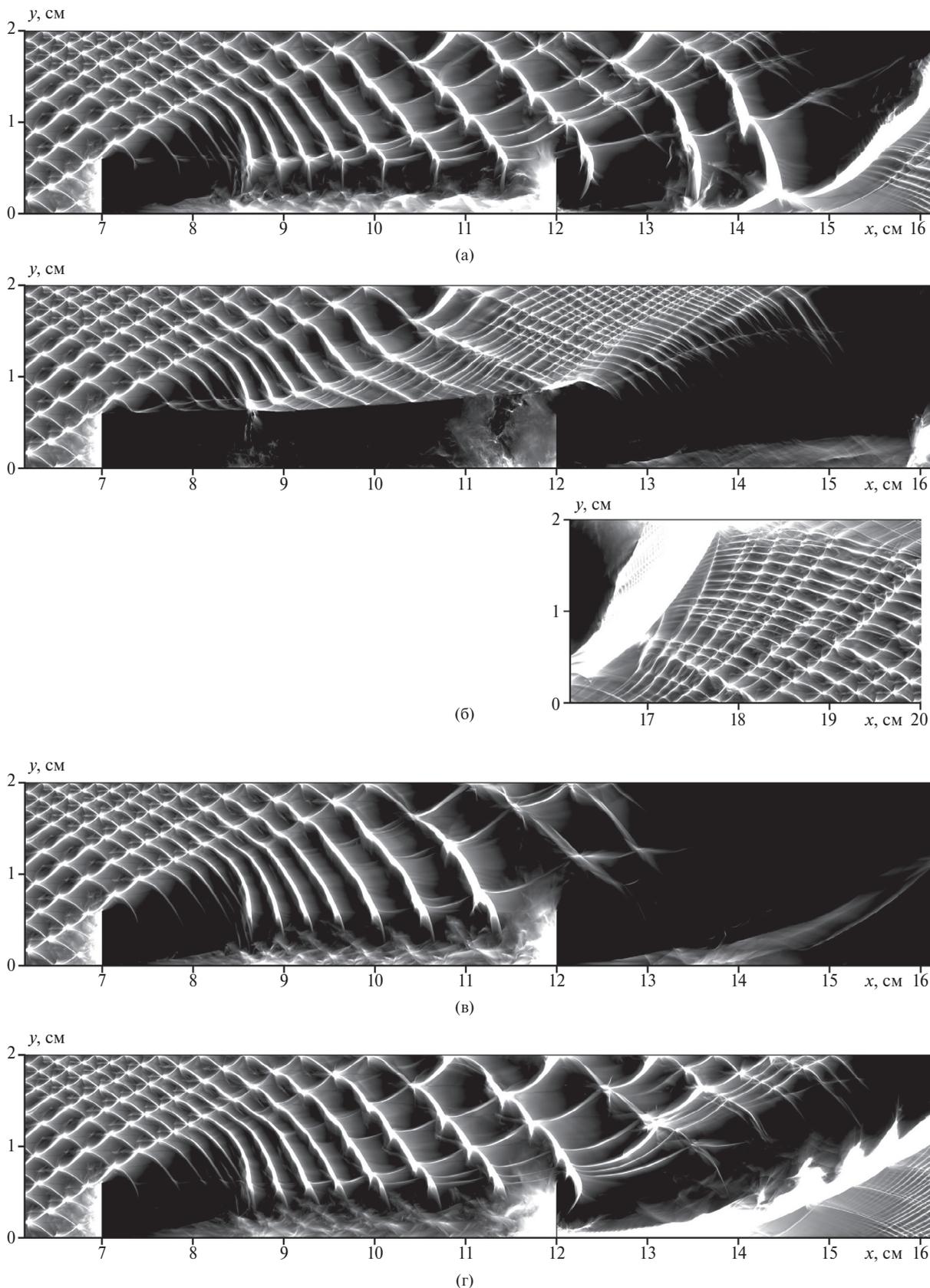


Рис. 5. След детонационной волны при взаимодействии со слоем не реагирующего газа ($L_b = 5$ см, $H_b = 6$ мм): а, б, г – реиницирование детонации при заполнении слоя Ar, He и 19.1 He–16.9 Ar соответственно; в – разрушение волны взаимодействием со слоем смеси 7.1 He–16.9 N₂.

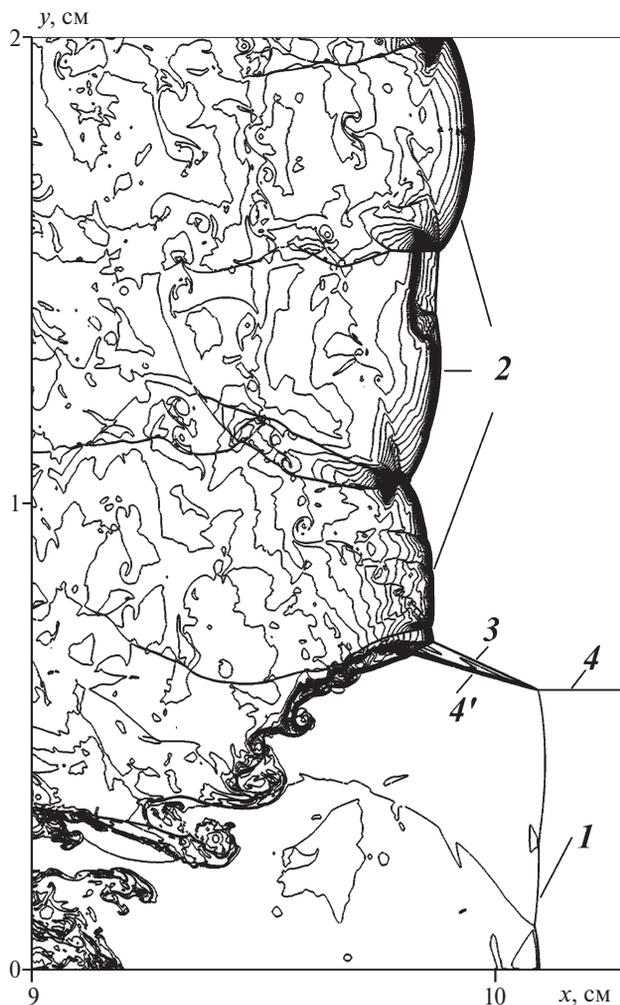


Рис. 6. Изолинии плотности в случае взаимодействия детонационной волны со слоем гелия ($L_b = 5$ см, $H_b = 6$ мм) в момент $t = 0.050$ мс: 1 – ударная волна, распространяющаяся по гелию; 2 – детонационная волна; 3 – косой скачок; 4 и 4' – контактный разрыв.

Установлено, что увеличение протяженности области с препятствиями или высоты барьеров при прочих равных условиях способствует гашению детонационного горения, а размещение препятствий в углублении в стенке канала, напротив, ослабляет их разрушающее воздействие на волну.

Обнаружено, что для подавления детонации можно использовать расположенный вдоль стенки канала слой нереагирующего газа, ограниченный одиночными барьерами. Расчеты показали, что разрушающее воздействие слоя на волну определяется как его геометрическими параметрами, так и составом заполняющей его газовой смеси.

Исследовано взаимодействие детонационной волны с областью с препятствиями в случае ее заполнения нереагирующим газом. Для серии неразрушающих детонацию барьеров предложен ряд нереагирующих газовых смесей, использование которых для заполнения пространства между препятствиями обеспечивает гашение детонационного горения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

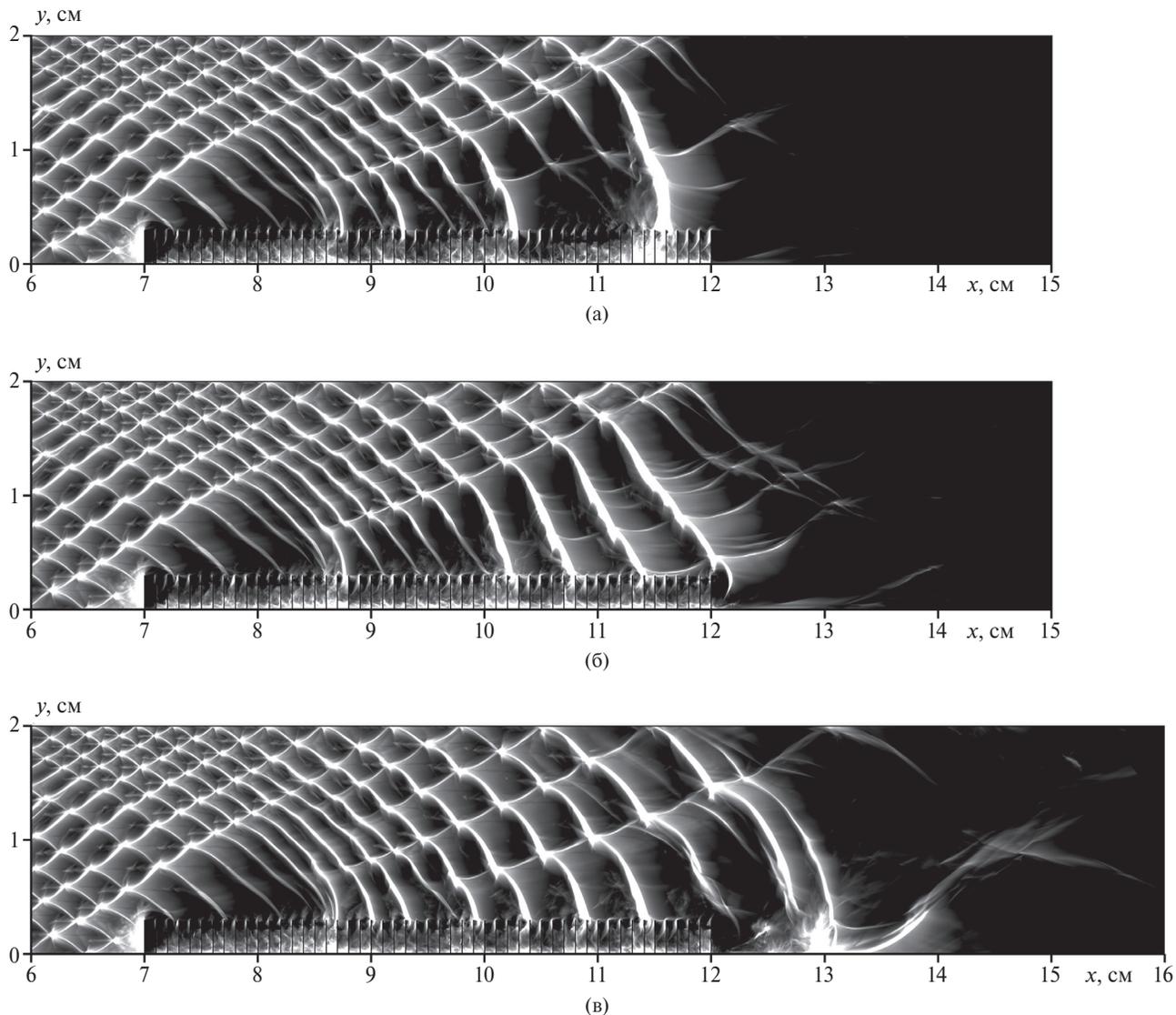


Рис. 7. Численный следовой отпечаток, иллюстрирующий гашение детонационного горения заполненной нереагирующим газом областью с барьерами ($L_b = 5$ см, $H_b = 3$ мм, $\Delta L_b = 1$ мм): а – воздух; б – Ar; в – 19.1 He–16.9 Ar.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.А., Пинаев А.В., Трубицын А.А., Грачёв А.Ю., Троцюк А.В., Фомин П.А., Трилис А.В. Что горит в шахте: метан или угольная пыль? // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53. № 1. С. 11–18. DOI: 10.15372/FGV20170102. Vasil'ev A.A., Pinaev A.V., Trubitsyn A.A., Grachev A.Yu., Trotsyuk A.V., Fomin P.A., and Trilis A.V. What is burning in coal mines: Methane or coal dust? // Combust. Explos. Shock Waves. 2017. V. 53. P. 8–14. <https://doi.org/10.1134/S0010508217010026>
2. Bedarev I.A., Fedorov A.V. Mathematical modeling of the detonation wave and inert particles interaction at the macro and micro levels // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 894. P. 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012008.
3. Тропин Д.А., Фёдоров А.В. Ослабление и подавление детонационных волн в реагирующих газовых смесях облаками инертных микро- и наночастиц // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 2. С. 82–88. DOI: 10.15372/FGV20180209.

- Tropin D.A., Fedorov A.V.* Attenuation and Suppression of Detonation Waves in Reacting Gas Mixtures by Clouds of Inert Microand Nanoparticles // *Combust. Explos. Shock Waves*. 2018. V. 54. P. 200–206.
<https://doi.org/10.1134/S0010508218020090>
4. *Obara T., Sentanuhady J., Tsukada Y., Ohyagi S.* Reinitiation process of detonation wave behind a slit-plate // *Shock Waves*. 2008. V. 18. P. 117–127. <https://doi.org/10.1007/s00193-008-0147-9>
 5. *Медведев С.П., Хомик С.В., Гельфанд Б.Е.* Регенерация и подавление детонации водородовоздушной смеси преградой с отверстиями // *Химическая физика*. 2009. Т. 28. № 12. С. 52–60.
Medvedev S.P., Khomik S.V., Gel'fand B.E. Recovery and suppression of the detonation of hydrogen-air mixtures at an obstacle with orifices // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2009. V. 3. P. 963–970.
<https://doi.org/10.1134/S1990793109060165>
 6. *Qin H., Lee J.H.S., Wang Z., Zhuang F.* An experimental study on the onset processes of detonation waves downstream of a perforated plate // *Proceeding the Combustion Institute*. 2015. V. 35. I. 2. P. 1973–1979.
<https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.07.056>
 7. *Шарыпов О.В., Пирогов Е.А.* О механизме ослабления и срыва газовой детонации в каналах с акустически поглощающими стенками // *Физика горения и взрыва*. 1995. Т. 31. № 4. С. 71–76.
Sharypov O.V., Pirogov Y.A. On the mechanism of weakening and breaking of gas detonation in channels with acoustically absorbing walls // *Comb. Expl. Shock Waves*. 1995. V. 31. P. 466–470. <https://doi.org/10.1007/BF00789368>
 8. *Teodorczyk A., Lee J.H.S.* Detonation attenuation by foams and wire meshes lining the walls // *Shock Waves*. 1995. V. 4. P. 225–236. <https://doi.org/10.1007/BF01414988>
 9. *Radulescu M.I., Lee J.H.S.* The failure mechanism of gaseous detonations: experiments in porous wall tubes // *Combustion and Flame*. 2002. V. 131. I. 1-2. P. 29–46. [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00390-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00390-5)
 10. *Bivol G.Yu., Golovastov S.V., Golub V.V.* Detonation suppression in hydrogen–air mixtures using porous coatings on the walls // *Shock Waves*. 2018. V. 28. P. 1011–1018. <https://doi.org/10.1007/s00193-018-0831-3>
 11. *Yang T., He Q., Ning J., Li J.* Experimental and numerical studies on detonation failure and re-initiation behind a half-cylinder // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. V. 47. I. 25. P. 12711–12725.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.230>
 12. *Tropin D., Temerbekov V.* Numerical simulation of detonation wave propagation through a rigid permeable barrier // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. V. 47. No. 87. P. 37106–37124.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.256>
 13. *Левин В.А., Журавская Т.А.* Управление детонационным горением посредством предварительной подготовки газовой смеси // *Письма в ЖТФ*. 2020. Т. 46. № 4. С. 40–44. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.04.49050.18074>
Levin V.A., Zhuravskaya T.A. Detonation Combustion Control Using Preliminary Preparation of the Gas Mixture // *Tech. Phys. Lett.* 2020. V. 46. № 2. P. 189–192. <https://doi.org/10.1134/S1063785020020248>
 14. *Журавская Т.А., Левин В.А.* Управление детонационной волной в канале с препятствиями посредством предварительной подготовки газовой смеси // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2020. № 4. С. 59–68.
Zhuravskaya T.A., Levin V.A. Control of a Detonation Wave in a Channel with Obstacles Using Preliminary Gas Mixture Preparation // *Fluid Dynamics*. 2020. № 55. P. 488–497. <https://doi.org/10.1134/S0015462820040138>
 15. *Левин В.А., Журавская Т.А.* Управление детонационным горением водородно-воздушной смеси посредством внесения аргона и озона // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. 2021. № 501. С. 48–53.
Levin V.A., Zhuravskaya T.A. Control of detonation combustion of a hydrogen–air mixture by argon and ozone addition // *Doklady Physics*. 2021. № 66. P. 320–324. <https://doi.org/10.1134/S1028335821110057>
 16. *Левин В.А., Журавская Т.А.* Гашение детонационного горения водородно-воздушной смеси в плоском канале // *Письма в Журнал технической физики*. 2023. Т. 49. № 18. С. 42–46.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.18.56177.19657>
 17. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Под ред. В.П. Глушко и др. Т. I. Кн. 2. М.: Наука, 1978. 328 с.
Thermodynamic Properties of Individual Substances / Ed. by L.V. Gurvich and I.V. Veyts. V. 1. Part 2. New York: Hemisphere, 1989.
 18. *Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Sharipov A.S., Titova N.S., Starik A.M.* Evaluation of Prediction Ability of Detailed Reaction Mechanisms in the Combustion Performance in Hydrogen/Air Supersonic Flows // *Combustion Science and Technology*. 2013. V. 185. I. 1. P. 62–94. <https://doi.org/10.1080/00102202.2012.709562>
 19. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

20. Колган В.П. Применение принципа минимальных значений производной к построению конечно-разностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // Уч. зап. ЦАГИ. 1972. Т. 3. № 6. С. 68–77.
21. Van Leer B. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. IV. A New Approach to Numerical Convection // Journal of Computational Physics. 1977. No. 23. P. 276–299.
22. Родионов А.В. Монотонная схема второго порядка аппроксимации для сквозного расчёта неравновесных течений // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1987. Т. 27. № 4. С. 585–593.
Rodionov A.V. Monotonic scheme of the second order of approximation for the continuous calculation of non-equilibrium flows // USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1987. V. 27. I. 2. P. 175–180.
[https://doi.org/10.1016/0041-5553\(87\)90174-1](https://doi.org/10.1016/0041-5553(87)90174-1)
23. Voevodin V.I., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin Vad., Zhumatiy S. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2019. V. 6. No. 2. P. 4–11. <https://doi.org/10.14529/jsfi190201>
24. Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах. М.: ГИФМЛ, 1963. 176 с.
Soloukhin R.I. Shock Waves and Detonations in Gases. Baltimore: Mono Book, 1966.
25. Pintgen F., Eckett C.A., Austin J.M., Shepherd J.E. Direct observations of reaction zone structure in propagating detonations // Combustion and Flame. 2003. V. 133. I. 3. P. 211–229. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00458-3](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00458-3)
26. Ciccarelli G., Ginsberg T., Boccio J., Finfrook C., Gerlach L., Tagawa H., Malliakos A. Detonation Cell Size Measurements in High-Temperature Hydrogen–Air–Steam Mixtures at BNL High-Temperature Combustion Facility // Brookhaven National Laboratory Rep. 1997. NUREG/CR-6391, BNL-NUREG-52482.
27. Shepherd J.E. Chemical kinetics of hydrogen-air-diluent detonations // Progress in Astronautics and Aeronautics. 1986. V. 106. P. 263–293.
28. Bull D.C., Elsworth J.E., Shuff P.J. Detonation cell structures in fuel/air mixtures // Combust. Flame. 1982. V. 45. P. 7–22. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90028-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90028-1)
29. Taylor B.D., Kessler D.A., Gamezo V.N., Oran E.S. Numerical simulations of hydrogen detonations with detailed chemical kinetics // Proceedings of the Combustion Institute. 2013. V. 34. I. 2. P. 2009–2016.
<https://doi.org/10.1016/j.proci.2012.05.045>
30. Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г. Взаимодействие ударной волны с продольным слоем газа пониженной плотности // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2016. № 5. С. 125–132.
Georgievskii P.Y., Levin V.A., Sutyurin O.G. Interaction between a shock wave and a longitudinal low-density gas layer // Fluid Dynamics. 2016. V. 51. № 5. P. 696–702. <https://doi.org/10.1134/S0015462816050148>

FAILURE OF A DETONATION WAVE IN A PLANE CHANNEL WITH MULTIPLE OBSTACLES

T. A. Zhuravskaya^{a, *} and V. A. Levin^a

^a Institute of Mechanics, Moscow State University, Moscow, Russia

* E-mail: zhuravskaya@imec.msu.ru

The results of numerical study of the interaction of a formed cellular detonation wave propagating in a plane channel occupied by a quiescent stoichiometric hydrogen-air mixture with multiple obstacles (barriers) located on the inner surface of the channel are given. The study is carried out to determine the conditions that ensure suppression of detonation. The influence of geometric parameters of the area with obstacles on wave propagation is studied. It is found that localization of the obstacles in a recess in the channel wall leads to a decrease in their destructive effect on detonation. Quenching of detonation combustion by the layer of a non-reacting gas located along the channel wall, limited by single barriers, is considered. The effect of gas composition on the interaction of the detonation wave with the layer is studied. Non-reacting gas mixtures, which, being filled into the area with obstacles, enhance the destructive effect of barriers on the detonation wave are proposed.

Keywords: plane channel, self-sustaining detonation wave, multiple obstacles (barriers), layer of nonreacting gas, quenching of detonation combustion