

## ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ БАРЬЕРАМИ

В.А. Левин\* и Т.А. Журавская

Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова,  
Мичуринский проспект, 1, Москва, Россия

### Аннотация

В работе численно исследованы некоторые способы управления волной детонации в стехиометрической водородно-воздушной смеси в плоском канале, на одной из стенок которого расположена область с барьерами. Изучено влияние геометрических параметров этой области (ее протяженности, высоты барьеров и частоты их расстановки) на детонационное горение смеси. Рассмотрена возможность управления детонацией посредством предварительной подготовки горючей смеси (предварительного разложения части молекулярного водорода и молекулярного кислорода на атомарные газы) или внесения в горючую смесь добавок аргона и озона. Установлено, что детонационная волна в подготовленном газе и в смеси с добавками в концентрациях, обеспечивающих размер ячейки волны детонации в полученной смеси близкий к среднему размеру ячейки в чистом газе, более устойчива к возмущениям, вызванным препятствиями. Это дает возможность использовать указанные механизмы для сохранения детонационного горения в канале с множественными барьерами.

*Ключевые слова:* детонационная волна, плоский канал, водородно-воздушная смесь, барьеры, сохранение/гашение детонации.

### 1. Введение

Определение механизмов, позволяющих управлять детонационным горением, является одним из основных направлений исследования детонации. Здесь в равной степени интерес представляют как способы гашения детонационного горения с целью обеспечения взрывобезопасности, так и условия, гарантирующие сохранение волны. Было показано, что для разрушения детонационной волны, распространяющейся в покое газе, можно использовать резкое расширение канала [1-2], расположенные в канале препятствия [2-3], поперечные щелевые пластины [4] и перфорированные стенки [5], а также различные пористые вставки на внутренней поверхности канала [6-10]. Согласно результатам экспериментов, пористые покрытия стенок могут приводить как к предотвращению выхода детонации в открытое пространство [6], так и к

полному гашению детонационного горения в канале или трубе [7-10].

Качественно другим механизмом управления детонацией является внесение в газовую смесь различных добавок. Так, было установлено, что добавление инертных частиц пыли в горючую смесь, поступающую со сверхзвуковой скоростью в плоский канал с сужением, может использоваться для стабилизации детонационной волны в потоке и управления ее положением с целью увеличения эффективности детонационного сжигания газа [11]. С другой стороны, в [12] экспериментально установлен факт полного гашения детонационного горения газовой смеси завесой из не реагирующих частиц пыли.

В данной работе численно исследуется взаимодействие сформированной ячеистой волны детонации, распространяющейся в стехиометрической водородно-воздушной смеси в плоском канале, с расположенными на его

\*Ответственный автор  
E-mail: levin@imec.msu.ru (В.А. Левин)

стенке множественными барьерами. Исследуется влияние предварительной диссоциации части молекулярного водорода и молекулярного кислорода или добавления в горючую смесь аргона и озона на детонационное горение в канале с препятствиями.

## 2. Математическая постановка задачи

Рассматривается распространение детонационной волны в покоящейся при нормальных условиях ( $p_0 = 1$  атм,  $T_0 = 298$  К) газовой смеси в полубесконечном плоском канале шириной  $L$  ( $L = 1$  см). Для инициирования детонации используется мгновенный однородный сверхкритический (достаточный для прямого

инициирования детонации) подвод энергии в области, имеющей форму тонкого слоя, около закрытого торца канала. Изучается детонационное горение чистой стехиометрической водородно-воздушной смеси, стехиометрической водородно-воздушной смеси, в которой часть молекулярного водорода  $H_2$  и молекулярного кислорода  $O_2$  предварительно преобразована в атомарные газы  $H$  и  $O$ , а также в стехиометрической водородно-воздушной смеси с добавками аргона  $Ar$  и озона  $O_3$ .

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

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho(u^2 + v^2)/2 + \rho h - p)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u((u^2 + v^2)/2 + h))}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v((u^2 + v^2)/2 + h))}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho n_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u n_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v n_i)}{\partial y} &= \rho \omega_i\end{aligned}$$

Здесь:  $x$  и  $y$  – продольная и поперечная декартовы координаты;  $u$  и  $v$  – соответствующие компоненты скорости;  $t$  – время;  $\rho$ ,  $p$  и  $h$  – плотность, давление и удельная энтальпия смеси;  $n_i$  и  $\omega_i$  – удельные концентрация и скорость образования  $i$ -го компонента смеси. Уравнения состояния горючей смеси есть:

$$p = \rho R_0 T \sum_i n_i, \quad h = \sum_i n_i h_i(T)$$

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 [14].

Граничное условие на стенках и на расположенных в канале барьерах – условие не протекания.

Решение уравнений газовой динамики совместно с уравнениями детальной химической кинетики было проведено конечно-разностным методом, основанным на схеме Годунова [15]. Расчеты выполнены 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 имени М.В. Ломоносова [16].

## 3. Результаты и обсуждение

### 3.1 Параметры ячеистой волны детонации

Иницируемая начальным однородным энергоподводом плоская детонационная волна неустойчива. Ее фронт постепенно искри-

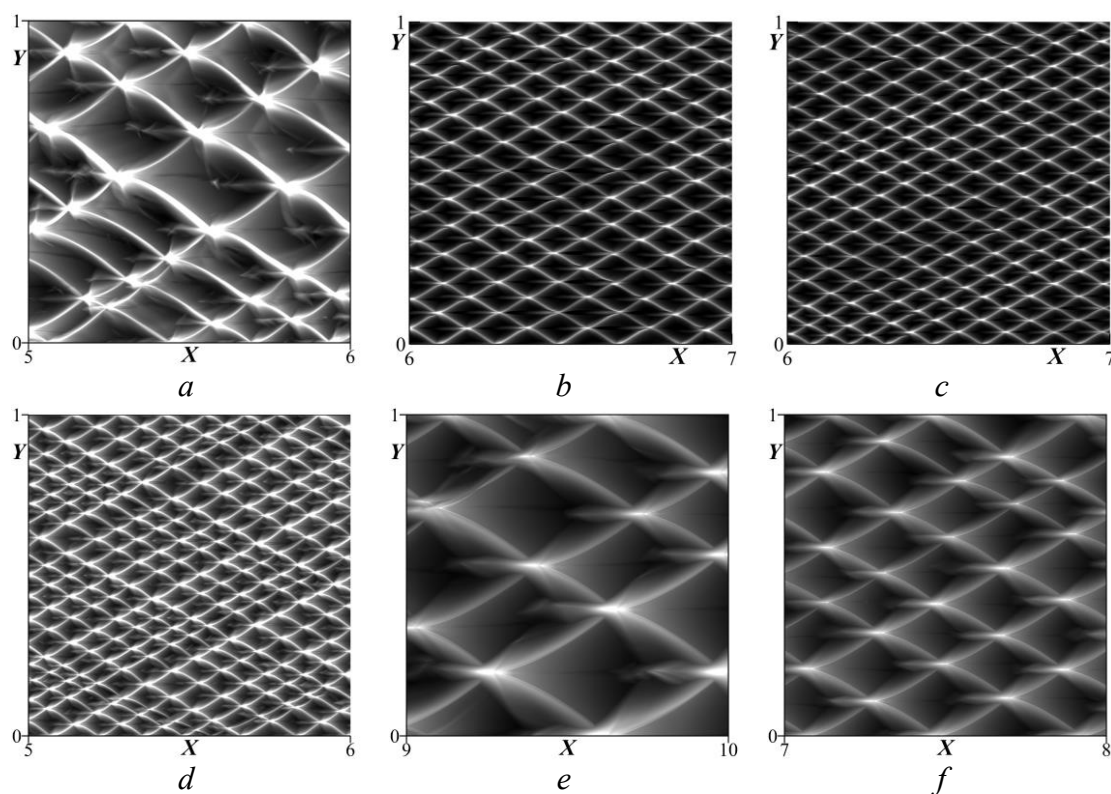


Рис. 1. Ячеистая структура детонационной волны, распространяющейся в плоском канале: а –  $\text{H}_2$  – воздух смесь; б, с –  $\text{H}_2$  – воздух смесь со степенью предварительной диссоциации  $\text{H}_2$  и  $\text{O}_2$  1 % и 1,5 % соответственно; д –  $\text{H}_2$  – воздух–1%  $\text{O}_3$ ; е –  $\text{H}_2$  – воздух – 70% Ar – 0,6%  $\text{O}_3$ ; ф –  $\text{H}_2$  – воздух – 70% Ar – 1%  $\text{O}_3$ . Здесь и далее  $X = x/L$ ,  $Y = y/L$ , где  $L$  – ширина канала. Волна распространяется слева направо.

вляется, возникают поперечные волны, в результате в канале формируется устойчивая ячеистая волна детонации [17, 18]. Численные аналоги следа, оставляемого распространяющейся в плоском канале детонационной волной на расположенной вдоль стенки заочпеченной пластине, для рассмотренных в работе смесей представлены на рис. 1.

Хорошо видно, что в случае чистой водородно-воздушной смеси получаемая в расчетах детонация имеет существенно нерегулярную ячеистую структуру рис. 1а, что соответствует наблюдаемому в экспериментах для разбавленных азотом смесей [19]. Средняя скорость распространения самоподдерживающейся волны равна  $D = 1964$  м/с, что хорошо согласуется с данными других работ, см., например, [17, 20]. Отметим, что размер детонационных ячеек при численном моделировании существенно меньше размера ячеек, наблюдаемых в эксперименте для стехиометрической водородно-воздушной смеси [21, 22]. Данное несоответствие отмечается в трудах различных авторов, например, в [23].

Исследование влияния предварительного разложения части молекулярного водорода и

молекулярного кислорода в смеси на параметры детонационного горения показало, что в результате диссоциации скорость волны детонации меняется незначительно, при этом размер детонационной ячейки существенно уменьшается [24, 25]. Так, при степени предварительной диссоциации смеси 1% и 1,5% детонационная ячейка меньше ячейки в неподготовленной смеси более чем в 2,5 и 3 раза соответственно (рис. 1б, с), при этом скорость волны увеличивается не более чем на 1%. Подобное изменение параметров детонационного горения (существенное измельчение ячеистой структуры волны при незначительном изменении скорости распространения детонации) было обнаружено при экспериментальном исследовании распространения детонации в водородно-кислородной смеси с добавлением озона, который быстро разлагается за лидирующей ударной волной с образованием атомарного кислорода [26], а также при прохождении сформированной ячеистой волны детонации через область плазмы, содержащей наряду с другими радикалами атомарный кислород [27]. Выполненное численное моделирование распространения

детонации в водородно-воздушной смеси с добавлением озона показало, что, как и наблюдалось в экспериментах [26], ячеистая детонационная структура становится существенно более мелкой, при этом скорость волны увеличивается незначительно. Так, в случае  $x_{O_3} = 1\%$  ( $x_{O_3} = n_{O_3}/\sum n_i$  – мольная доля  $O_3$ ) детонационная ячейка уменьшается в 3,2 раза (рис. 1d), а скорость ячеистой детонационной волны увеличивается лишь на 0,56%. Следует отметить, что, как добавление озона (рис. 1 d), так и предварительная частичная диссоциация (рис. 1b, c) делают ячеистую структуру волны детонации регулярной.

Хорошо известно, что добавление в смесь аргона, в отличие от озона, приводит к укрупнению ячеистой структуры и существенному уменьшению скорости волны детонации [19, 28]. В [29] было установлено, что при одновременном внесении в смесь аргона Ar и озона  $O_3$  их концентрации могут быть подобраны так, что размер ячейки волны детонации в результирующей смеси будет близок к среднему раз-

меру ячейки в чистой смеси при этом скорость распространения детонации существенно уменьшается. Так, в смеси  $H_2$  – воздух – 70% Ar – 0,6%  $O_3$  формируется детонационная волна, размер ячейки которой немного превышает средний размер детонационной ячейки в чистой смеси (рис. 1e), а увеличение доли озона до 1% приводит к формированию волны детонации с более мелкой (по сравнению с чистой смесью) ячеистой структурой (рис. 1f). Скорость волны меняется незначительно при изменении концентрации озона и в обоих рассмотренных случаях меньше скорости детонации в чистой смеси более чем в 1,5 раза. Отметим, что в смеси, разбавленной одновременно Ar и  $O_3$ , волна детонации имеет регулярную ячеистую структуру (рис. 1e, f).

### 3.2 Взаимодействие детонационной волны с множественными барьерами

Рассмотрено взаимодействие детонационной волны с областью с барьерами, располо-

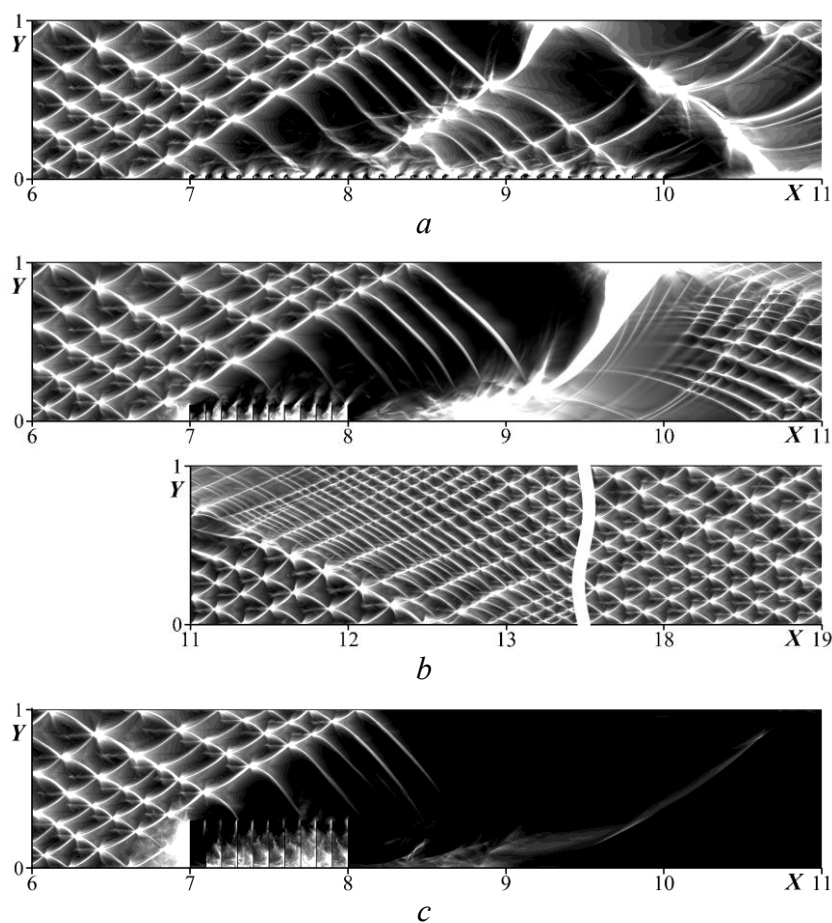


Рис. 2. Распространение детонационной волны в  $H_2$  – воздух смеси в плоском канале при наличии области с барьерами: а – сохранение детонации в случае  $L_b = 3$  см,  $\Delta L_b = 0,1$  см,  $H_b = 0,02$  см; б – восстановление детонации при  $L_b = 1$  см,  $\Delta L_b = 0,1$  см,  $H_b = 0,1$  см; в – гашение детонационного горения при  $L_b = 1$  см,  $\Delta L_b = 0,1$  см,  $H_b = 0,3$  см.



женной на одной из стенок канала. Используемая в исследовании область с препятствиями (серия барьеров) является моделью вставки с пористым покрытием на внутренней поверхности канала, например, покрытой стальной ватой [10]. Положение области выбиралось так, чтобы к барьерам подходила сформировавшаяся ячейчатая волна детонации.

Интенсивность воздействия препятствий на волну определяется протяженностью области  $L_b$ , высотой препятствий  $H_b$  и расстоянием между соседними барьерами  $\Delta L_b$ . Установлено, что, как и в случае одного препятствия [2], детонационная волна гасится в результате взаимодействия с множественными барьерами, если их высота (при фиксированных значениях протяженности области и расстояния между барьерами) превышает некоторое критическое значение, зависящее от ширины канала. При этом увеличение протяженности области с препятствиями и уменьшение расстояния между соседними барьерами могут привести к существенному уменьшению критической

высоты барьеров. Следовые отпечатки, иллюстрирующие сохранение, восстановление и гашение детонации в чистой неподготовленной водородно-воздушной смеси при различных значениях параметров области с барьерами, представлены на рис. 2. В случае, когда высота препятствий много меньше критического значения, при прохождении волны вдоль барьеров детонационное горение сохраняется поперек канала (рис. 2а). При этом происходит ослабление поперечных волн на барьерах и формирование новых в волне детонации; размер ячейки детонационной волны, проходящей вдоль области с препятствиями, увеличивается, что согласуется с результатами экспериментов по распространению детонации в каналах с пористыми стенками [8, 9]. При увеличении высоты барьеров (высота меньше критического значения) волна детонации разрушается (локально или полностью) взаимодействием с препятствиями и реиницируется после их прохождения (рис. 2б) при отражении от нижней стенки канала расходящейся

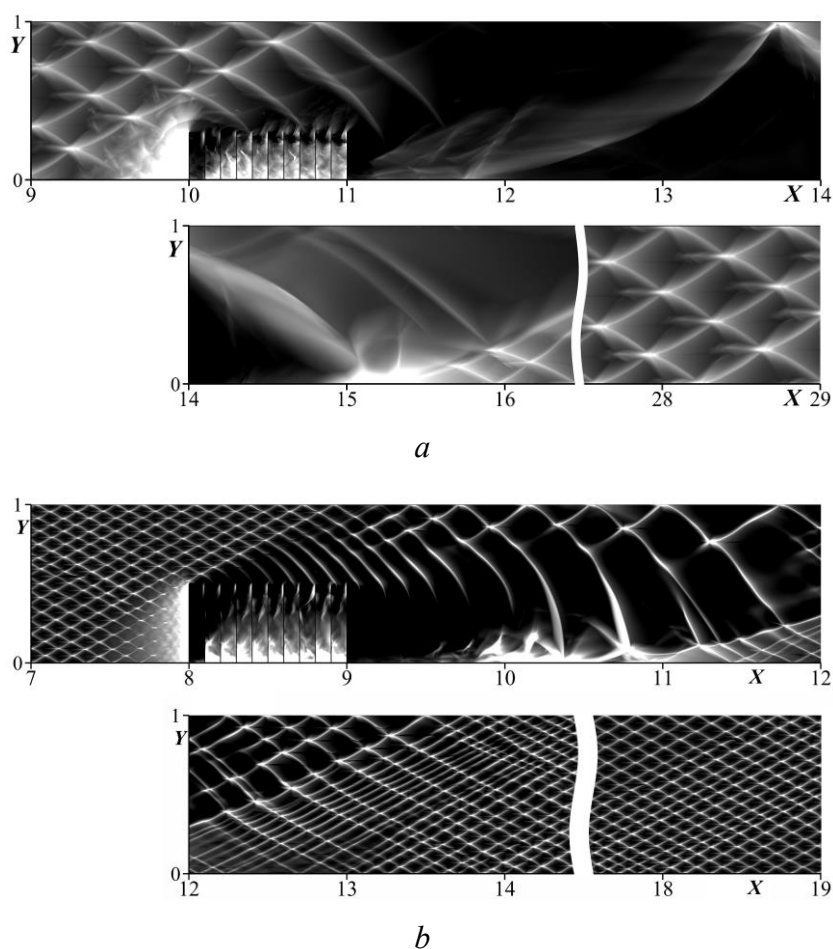


Рис. 3. Реиницирование детонации в плоском канале при наличии области с барьерами: а –  $H_2$  – воздух – 70% Ar – 0,6%  $O_3$  смесь,  $L_b = 1$  см,  $\Delta L_b = 0,1$  см,  $H_b = 0,3$  см; б –  $H_2$  – воздух смесь со степенью предварительной диссоциации 1 %,  $L_b = 1$  см,  $\Delta L_b = 0,1$  см,  $H_b = 0,5$  см.

волны, вышедшей из области барьеров. Первоначально детонационное горение формируется только вдоль маховской ножки и поперечной волны, в остальной части волна представляет собой ударную волну, за которой следует область интенсивного тепловыделения [25], что полностью согласуется с результатами экспериментов по восстановлению детонации после взаимодействия с препятствиями [30]. Формирование волны поперек всего канала происходит на некотором расстоянии от области барьеров. Восстановленная детонационная волна является сильно пересжатой, о чем свидетельствует ее мелкая ячеистая структура. Постепенно размер детонационной ячейки увеличивается. Такой характер восстановления детонации, согласно результатам экспериментального исследования [5], соответствует газовым смесям с нерегулярной структурой детонационной волны.

Исследование влияния предварительной частичной диссоциации молекулярного водорода и кислорода в водородно-воздушной смеси или внесения в смесь аргона и озона в указанных выше концентрациях на распространение детонации в канале с множественными барьерами показало, что критическая высота препятствий для полученных смесей выше, чем для чистой неизменной смеси при прочих постоянных параметрах. Так, получено, что область с препятствиями  $L_b = 1$  см,  $\Delta L_b = 0,1$  см,  $H_b = 0,3$  см гасит детонационное горение в неподготовленной чистой водородно-воздушной смеси (рис. 2с), однако в рассмотренных смесях с добавками Ar и  $O_3$  детонационное горение восстанавливается после прохождения данной области с барьерами. Численный аналог следа детонационной волны, иллюстрирующий восстановление детонации в смеси  $H_2$ -воздух-70% Ar-0,6%  $O_3$ , представлен на рис. 3а. В случае частично диссоциированной смеси при степени предварительной диссоциации 1% высота данных препятствий также является докритической: детонация восстанавливается даже после взаимодействия с препятствиями большей высоты (рис. 3б). Расчеты показали, что увеличение степени предварительной диссоциации приводит к дальнейшему увеличению критической высоты препятствий при прочих постоянных параметрах.

Следует отметить, что в случаях восстановления детонации после прохождения области с барьерами в смеси с добавками Ar и  $O_3$  (рис. 3а) или в частично диссоциированной смеси (рис. 3б) первоначально формируется волна с

более крупной ячейкой, размер которой постепенно уменьшается. Такой механизм восстановления детонации характерен для смесей с регулярной ячеистой структурой детонационной волны [5] и качественно отличается от механизма восстановления детонации в чистой неподготовленной смеси (рис. 2б).

#### 4. Заключение

В работе численно исследованы некоторые способы управления волной детонации, распространяющейся в покоящейся стехиометрической водородно-воздушной смеси в плоском канале, на одной из стенок которого расположена область с барьерами.

Изучено влияние геометрических параметров области (ее протяженности, высоты барьеров и частоты их расстановки) на детонационное горение смеси.

Рассмотрена возможность управления детонацией посредством внесения изменений в состав смеси. Установлено, что детонационная волна в смеси с частично диссоциированными горючим и окислителем или в смеси с добавками аргона и озона в концентрациях, обеспечивающих размер ячейки волны детонации близкий к среднему размеру ячейки в первоначальной смеси, более устойчива к возмущениям, вызванным расположенными в канале препятствиями, чем в чистом неподготовленном газе. Это дает возможность использовать указанные механизмы для предотвращения гашения детонационного горения в канале с множественными барьерами.

#### Благодарность

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

#### Литература

- [1]. Левин В.А., Марков В.В., Журавская Т.А., Осинкин С.Ф. Нелинейные волновые процессы при инициировании и распространении газовой детонации // Труды Математического института им. В.А. Стеклова РАН. – 2005. – Т.251. – С.200-214.
- [2]. Журавская Т.А. Распространение волн детонации в плоских каналах с препятствиями // Изв. РАН. МЖГ. – 2007. – №6. – С.135-143.
- [3]. 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. – Vol.47(25). – P.12711-12725.
- [4]. Obara T., Sentanuhady J., Tsukada Y., Ohyagi S. Reinitiation process of detonation wave behind a slit-plate // Shock Waves. – 2008. – Vol.18. – P.117-127.
- [5]. 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. – Vol.35(2). – P.1973-1979.
- [6]. Mehrjoo N., Gao Y., Kiyanda C.B., Ng H.D., Lee J.H.S. Effects of porous walled tubes on detonation transmission into unconfined space / Proceedings of the Combustion Institute. – 2015. – Vol.35(2). – P.1981-1987.
- [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.
- [8]. Teodorczyk A., Lee J.H.S. Detonation attenuation by foams and wire meshes lining the walls // Shock Waves. – 1995. – Vol.4(4). – P.225-236.
- [9]. Radulescu M.I., Lee J.H.S. The failure mechanism of gaseous detonations: experiments in porous wall tubes // Combustion and Flame. – 2002. – Vol.131(1-2). – P.29-46.
- [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. – Vol.28(5). – P.1011-1018.
- [11]. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление детонационным горением в высокоскоростном потоке газовой смеси // Труды Математического института им. В.А. Стеклова. – 2018. – Т.300. – С.123-134.
- [12]. Васильев А.А., Пинаев А.В., Трубицын А.А., Грачев 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.
- [13]. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Под ред. Глушко В.П. и др. – М.: Наука, 1978. Т.1. – 495 с.
- [14]. 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. – Vol.185(1). – P.62-94.
- [15]. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М: Наука, 1976. – 400 с.
- [16]. Voevodin V.I., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin V.I., Zhumatiy S. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community // Supercomputing Frontiers and Innovations. – 2019. – Vol.6(2). – P.4-11.
- [17]. Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах. – М: ГИФМЛ, 1963. – 176 с.
- [18]. Lee J.H.S. The Detonation Phenomenon. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 400 p.
- [19]. Pintgen F., Eckett C.A., Austin J.M., Shepherd J.E. Direct observations of reaction zone structure in propagating detonations // Combustion and Flame. – 2003. – Vol.133(3). – P.211-229.
- [20]. Kumar D.S., Ivin K., Singh A.V. Sensitizing gaseous detonations for hydrogen/ethylene-air mixtures using ozone and  $H_2O_2$  as dopants for application in rotating detonation engines // Proceedings of the Combustion Institute. – 2021. – Vol.38(3). – P.3825-3834.
- [21]. Bull D.C., Elsworth J.E., Shuff P.J. Detonation Cell Structures in Fuel/Air Mixtures // Combustion and Flame. – 1982. – Vol.45. – P.7-22.
- [22]. Ciccarelli G., Ginsberg T., Boccio J., Economos C., Sato K., Kinoshita M. Detonation cell size measurements and predictions in hydrogen-air-steam mixtures at elevated temperatures // Combustion and Flame. – 1994. – Vol.99(2). – P.212-220.
- [23]. 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. – Vol.34. – P.2009-2016.
- [24]. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление детонационным горением посредством предварительной подготовки газовой смеси // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т.46, №4. – С.40-44.
- [25]. 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.
- [26]. Crane J., Shi X., Singh A.V., Tao Y., Wang H. Isolating the effect of induction length on detonation structure: Hydrogen-oxygen detonation promoted by ozone // Combustion and Flame. – 2019. – V.200. – P.44-52.
- [27]. Cherif M.A., Shcherbanev S.A., Starikovskaia S.M., Vidal P. Effect of non-equilibrium plasma on decreasing the detonation cell size // Combustion and Flame. – 2020. – Vol.217. – P.1-3.
- [28]. Shepherd J.E. Detonation in gases // Proceedings of the Combustion Institute. – 2009. – Vol.32. – P.83-98.
- [29]. 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. – Т.501, № 1. – С.48-53.

- [30]. Bhattacharjee R.R., Lau-Chapdelaine S.S.M., Maines G., Maley L., Radulescu M.I. Detonation re-initiation mechanism following the Mach reflection of a quenched detonation // Proceedings of the Combustion Institute. – 2013. – Vol.34(2). – P.1893-1901.

## References

- [1]. Levin VA, Markov VV, Zhuravskaya TA, Osinkin SF (2005) Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics [Trudy Matematicheskogo instituta im. V.A. Steklova RAN] 251:192-205. (in Russian)
- [2]. Zhuravskaya TA (2007) Fluid Dynamics [Izv. RAN. MZHG.] 42(6):987-994. DOI:10.1134/S0015462807060142 (in Russian)
- [3]. Yang T, He Q, Ning J, Li J. (2022) International Journal of Hydrogen Energy 47(25):12711-12725. DOI:10.1016/j.ijhydene.2022.01.230
- [4]. Obara T, Sentanuhady J, Tsukada Y, Ohayagi S (2008) Shock Waves 18:117-127. DOI:10.1007/s00193-008-0147-9
- [5]. Qin H, Lee JHS, Wang Z, Zhuang F (2015) Proceeding the Combustion Institute 35(2):1973-1979. DOI:10.1016/j.proci.2014.07.056
- [6]. Mehrjoo N, Gao Y, Kiyanda CB, Ng HD, Lee JHS (2015) Proceedings of the Combustion Institute 35(2):1981-1987. DOI:10.1016/j.proci.2014.06.031
- [7]. Sharypov OV, Pirogov YA (1995) Comb. Expl. Shock Waves [Fizika gorenija i vzryva] 31(4):466-470. DOI:10.1007/BF00789368 (in Russian)
- [8]. Teodorczyk A, Lee JHS (1995) Shock Waves 4(4):225-236. DOI:10.1007/BF01414988
- [9]. Radulescu MI, Lee JHS (2002) Combustion and Flame 131(1-2):29-46. DOI:10.1016/S0010-2180(02)00390-5
- [10]. Bivol GYu, Golovastov SV, Golub VV (2018) Shock Waves 28(5):1011-1018. DOI:10.1007/s00193-018-0831-3
- [11]. Levin VA, Zhuravskaya TA (2018) Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics [Trudy Matematicheskogo instituta im. V.A. Steklova RAN] 300:114-125. DOI:10.1134/S0081543818010091 (in Russian)
- [12]. Vasil'ev AA, Pinaev AV, Trubitsyn AA, Grachev AYU, Trotsyuk AV, Fomin PA, Trilis AV (2017) Combust. Explos. Shock Waves [Fizika gorenija i vzryva] 53(1):8-14. DOI:10.1134/S0010508217010026 (in Russian)
- [13]. Thermodynamical Properties of Individual Substances [Termodinamicheskie svoystva individual'nyh veshchestv], Ed. by Glushko VP (1978), Nauka, Moscow. (in Russian)
- [14]. Bezgin LV, Kopchenov VI, Sharipov AS, Titova NS, Starik AM (2013) Combustion Science and Technology 185(1):62-94. DOI:10.1080/00102202.2012.709562
- [15]. Godunov SK, Zabrodin AV, Ivanov MYa, Kraiko AN, Prokopov GP (1976) Numerical Solution of Multidimensional Problems of Gasdynamics [CHislennoe reshenie mnogomernyh zadach gazovoj dinamiki] Nauka, Moscow (in Russian).
- [16]. Voevodin VI, Antonov A, Nikitenko D, Shvets P, Sobolev S, Sidorov I, Stefanov K, Voevodin Vad, Zhumatiy S (2019) Supercomputing Frontiers and Innovations 6(2):4-11. DOI:10.14529/jsfi190201
- [17]. Soloukhin RI Shock Waves and Detonation in Gases [Udarnye volny i detonatsiya v gazakh], (1963) GIFML, Moscow (1966) Mono Book, Baltimore. (in Russian)
- [18]. Lee JHS (2008) The Detonation Phenomenon Cambridge University Press, Cambridge. ISBN-13 978-0-511-41392-6
- [19]. Pintgen F, Eckett CA, Austin JM, Shepherd JE (2003) Combustion and Flame 133(3):211-229. DOI:10.1016/S0010-2180(02)00458-3
- [20]. Kumar DS, Ivin K, Singh AV (2021) Proceedings of the Combustion Institute 38(3):3825-3834. DOI:10.1016/j.proci.2020.08.061
- [21]. Bull DC, Elsworth JE, Shuff PJ (1982) Combustion and Flame 45:7-22. DOI:10.1016/0010-2180(82)90028-1
- [22]. Ciccarella G, Ginsberg T, Boccio J, Economos C., Sato K, Kinoshita M (1994) Combustion and Flame 99(2):212-220. DOI:10.1016/0010-2180(94)90124-4
- [23]. Taylor BD, Kessler DA, Gamezo VN, Oran ES (2013) Proceedings of the Combustion Institute 34:2009-2016. DOI:10.1016/j.proci.2012.05.045
- [24]. Levin VA, Zhuravskaya TA (2020) Technical Physics Letters [Pis'ma v ZHTF] 46(2):189-192. DOI:10.1134/S1063785020020248(in Russian)
- [25]. Zhuravskaya TA, Levin VA (2020) Fluid Dynamics [Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza] 55:488-497. DOI:10.1134/S0015462820040138 (in Russian)
- [26]. Crane J, Shi X, Singh AV, Tao Y, Wang H (2019) Combustion and Flame 200:44-52. DOI:10.1016/j.combustflame.2018.11.008
- [27]. Cherif MA, Shcherbanev SA, Starikovskaia SM, Vidal P (2020) Combustion and Flame 217:1-3. DOI:10.1016/j.combustflame.2020.03.014
- [28]. Shepherd JE (2009) Proceedings of the Combustion Institute 32:83-98. DOI:10.1016/j.proci.2008.08.006
- [29]. Levin VA, Zhuravskaya TA (2021) Doklady Physics [Doklady Rossijskoj akademii nauk.



- Fizika, tekhnicheskie nauki] 66:320-324. DOI:10.1134/S1028335821110057
- [30]. Bhattacharjee RR, Lau-Chapdelaine SSM, Maines G, Maley L, Radulescu MI (2013) Proceedings of the Combustion Institute 34(2):1893-1901. DOI:10.1016/j.proci.2012.07.063

## Detonation combustion of gas mixture in a plane channel with multiple barriers

V.A. Levin\* and T.A. Zhuravskaya

Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, 1 Michurinskiy Prospekt, Moscow, Russia

### Abstract

In this work some methods of detonation wave control in a stoichiometric hydrogen-air mixture in a plane channel, on one of the walls of which there is a region with barriers, are numerically studied. The influence of the geometrical parameters of the region (its length, the barriers height and the frequency of their position) on the detonation combustion of the mixture has been studied. The possibility of detonation control by preliminary preparation of the combustible mixture (decomposition of a part of molecular hydrogen and molecular oxygen into atomic gases) or introduction of argon and ozone additives into the combustible mixture is considered. It has been established that the detonation wave in the prepared gas and in the mixture with additives, concentrations of which ensure the cell size of the detonation wave in the resulting mixture is close to the average cell size in the initial mixture, is more resistant to disturbances caused by obstacles located in the channel. So, it is possible to use these mechanisms to prevent quenching of detonation combustion in a channel with multiple barriers.

**Keywords:** detonation wave, plane channel, hydrogen-air mixture, barriers, conservation/quenching of detonation.

## Көптеген кедергілері бар жазық арнадағы газ қоспасының детонациялық жануы

В.А. Левин\* және Т.А. Журавская

Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университетінің механика ғылыми-зерттеу институты, Мичуринский проспектісі, 1, Мәскеу, Ресей

### Аңдатпа

Жұмыста қабырғаларының бірінде кедергілері бар аймақ орналасқан жазық каналдағы стехиометриялық сутегі-ауа қоспасындағы детонация толқынын басқарудың кейбір әдістері сандық зерттелген. Әсері зерттелді геометриялық параметрлерін осы саласындағы (оның ұзындығын, биіктігін кедергілер мен жиілігін, оларды орналастыру бойынша) детонационное жану қоспасы. Жанғыш қоспаны алдын ала дайындау (молекулалық сутегі мен молекулалық оттегінің бір бөлігін атом газдарына алдын ала ыдырату) немесе жанғыш қоспаға аргон мен озон қоспаларын енгізу арқылы детонацияны басқару мүмкіндігі қаралды. Дайындалған газдағы және концентрациядағы қоспалары бар қоспадағы детонация толқыны алынған қоспадағы детонация толқынының жасуша мөлшерін таза газдағы ұяшықтың орташа мөлшеріне жақын қамтамасыз ететін детонация толқыны кедергілерден туындаған бұзылуларға неғұрлым төзімді екендігі анықталды. Бұл бірнеше кедергілері бар арнада детонациялық жануды сақтау үшін осы механизмдерді пайдалануға мүмкіндік береді.

**Кілт сөздер:** детонациялық толқын, жазық канал, сутегі-ауа қоспасы, кедергілер, детонацияны сақтау/сөндіру.