

Управление детонационным горением водородно-воздушной смеси

В.А. Левин*, Т.А. Журавская

Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,
пр. Мичуринский, 1, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты численных исследований, проведенных с целью определения новых способов управления детонационным горением стехиометрической водородно-воздушной смеси в плоском канале. Предложен ряд конструктивных решений, усиливающих разрушающее воздействие расположенных в канале множественных препятствий на распространяющуюся детонационную волну. Исследовано влияние добавок пероксида водорода и гелия в рассматриваемую горючую смесь на параметры волны детонации с целью снижения температуры продуктов горения без существенного изменения размера детонационной ячейки и уменьшения скорости волны.

Ключевые слова: стехиометрическая водородно-воздушная смесь, детонационная волна, плоский канал, управление детонацией

1. Введение

Определение механизмов, позволяющих управлять детонационным горением, является одним из основных направлений исследования детонации. Здесь в равной степени интерес представляют как способы, обеспечивающие сохранение волны, так и условия, гарантирующие гашение детонационного горения для обеспечения взрывобезопасности.

Установлено, что в качестве конструктивных элементов, подавляющих распространяющуюся в канале волну детонации, можно рассматривать завесы из не реагирующих частиц пыли [1], неподвижные инертные частицы или облака частиц [2, 3], расположенные поперек канала щелевые пластины [4] или перфорированные стенки [5, 6], пористые покрытия стенок канала (например, [7-10]), расположенные в канале препятствия различной конфигурации [11-14]. С другой стороны, в работах [13, 14] установлено, что предварительная диссоциация небольшого количества молекулярного водорода и кислорода на атомы в стехиометрической водородно-воздушной смеси, приводящая к существенному измельчению яче-

истой структуры детонационной волны при незначительном увеличении ее скорости, повышает устойчивость распространяющейся волны детонации к сильным возмущениям, вызванным расположенными на внутренней поверхности канала множественными препятствиями (барьерами). Исследования показали, что инертные включения можно использовать не только для подавления детонации, но и для управления ее распространением. Так, в результате численного моделирования детонационного горения водородно-воздушной смеси, поступающей со сверхзвуковой скоростью в плоский симметричный канал с сужением (перезажем), установлено, что для стабилизации детонации в потоке и управления ее положением с целью повышения эффективности детонационного сжигания газовой смеси можно использовать не только геометрические параметры канала, но и внесение в поступающую смесь инертных частиц пыли [15, 16].

Потребность использовать детонационное горение в различных энергетических установках требует решения сложной проблемы охлаждения стенок детонационной камеры. Задача существенно упрощается снижением температуры продуктов горения. В работах [17-19] было установлено, что при одновременном внесении в стехиометрическую водородно-воздушную смесь

*Ответственный автор

E-mail: levin@imec.msu.ru

добавок озона и аргона их мольные доли могут быть подобраны так, что размер ячейки волны детонации в полученной смеси будет близок к среднему размеру ячейки в чистой горючей смеси, при этом температура продуктов детонации будет существенно снижена. Однако внесение указанных добавок приводит к существенному падению скорости волны.

В данной работе представлены результаты численных исследований, проведенных с целью определения новых способов управления детонационной волной в покоящейся стехиометрической водородно-воздушной смеси. Рассмотрены способы усиления разрушающего воздействия множественных барьеров на распространяющуюся самоподдерживающуюся волну детонации. Исследовано влияние добавок пероксида водорода и гелия в горючую смесь на параметры детонационной волны с целью снижения температуры продуктов горения без уменьшения скорости волны и значимого изменения размера детонационной ячейки.

2. 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 . Для инициирования детонации используется мгновенный однородный сверхкритический (достаточный для прямого инициирования детонации) подвод энергии в области, имеющей форму тонкого слоя, 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:

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

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

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

$$\frac{\partial(\rho(u^2 + v^2)/2 + \rho h - p)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u((u^2 + v^2)/2 + h))}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v((u^2 + v^2)/2 + h))}{\partial y} = 0;$$

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

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 – удельная концентрация и скорость образования i -го компонента смеси; M – количество компонентов. Уравнения состояния горючей смеси есть:

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

здесь: T – температура; R_0 – универсальная газовая постоянная. Зависимости парциальных энтальпий от температуры $h_i(T)$ определяются по приведенным энергиям Гиббса соответствующих компонентов смеси [20]. Для описания химического взаимодействия используется детальный кинетический механизм окисления водорода, предложенный в работе [21].

Для решения уравнений газовой динамики использовалась явная схема второго порядка аппроксимации на основе схемы С.К. Годунова [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].

3. Результаты и обсуждение

3.1. Управление детонацией в канале с множественными барьерами

Рассматривается распространение детонационной волны в стехиометрической водородно-воздушной смеси в плоском канале, на одной из стенок которого локально расположена область с препятствиями (барьерами). Подобные серии препятствий можно рассматривать как модель вставки с пористым покрытием на внутренней поверхности канала, например, покрытой

металлической шерстью [10]. Средний диаметр волокон данного покрытия равен 30 мкм, что позволяет пренебречь толщиной препятствий и рассматривать их как бесконечно-тонкие твердые поверхности.

Иницируемая начальным однородным энергоподводом плоская детонационная волна неустойчива. Ее фронт постепенно искривляется, возникают поперечные волны, в результате в канале формируется самоподдерживающаяся ячеистая детонация [24, 25]. Нерегулярность полученной в расчетах ячеистой структуры волны согласуется с результатами экспериментального исследования детонационного горения, разбавленных азотом водородно-кислородных смесей [26]. Положение препятствий выбиралось так, чтобы к ним подходила сформировавшаяся ячеистая детонационная волна.

Интенсивность воздействия исследуемых в работе препятствий на волну определяется протя-

женностью области L_b , высотой препятствий H_b и расстоянием между соседними барьерами ΔL_b [27, 28]. Рассмотрены области с шагом расстановки препятствий $\Delta L_b = 1$ мм. Расчеты показали, что увеличение протяженности области с препятствиями или высоты барьеров при прочих равных условиях способствуют гашению детонационного горения, а размещение препятствий в углублении в стенке канала (в нише), напротив, ослабляет их разрушающее воздействие на волну (рис. 1).

Подобно наблюдаемому в экспериментах при детонационном горении смесей с нерегулярной ячеистой структурой в каналах с пористыми вставками [9] получено, что сохранение/подавление детонации при взаимодействии с барьерами определяется конкуренцией двух противоположных процессов: ослаблением поперечных волн на барьерах и зарождением новых из локальных возмущений в зоне реакции. Следовательно, конструктивные изменения, усиливающие пер-

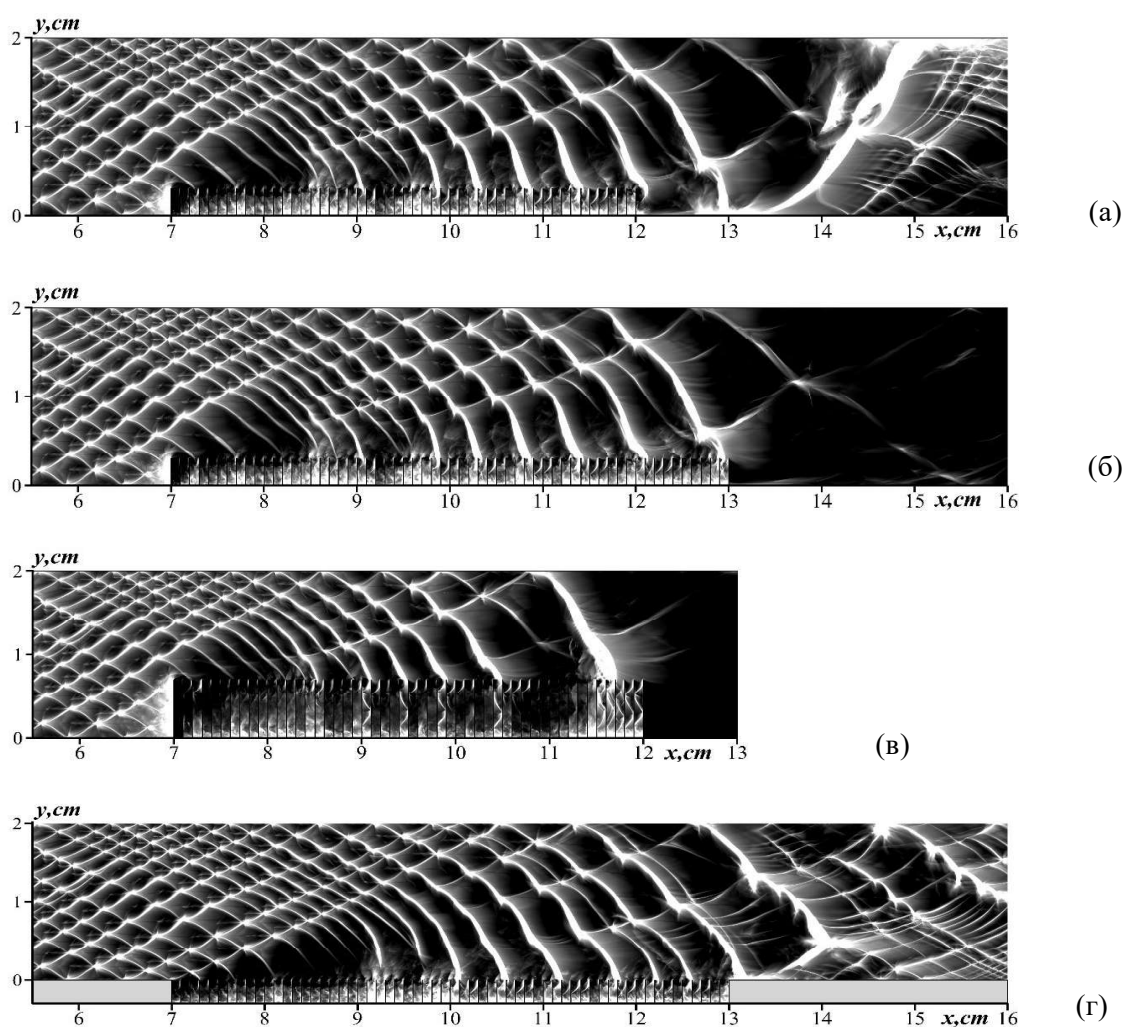


Рис. 1. Численные аналоги следа детонационной волны при взаимодействии с множественными барьерами ($\Delta L_b = 1$ мм), расположенными на внутренней поверхности канала (а-в) и в нише (г): (а) – реиницирование детонации при $L_b = 5$ см и $H_b = 3$ мм; (б, в) – гашение детонационного горения при $L_b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

вый из них, будут способствовать разрушению детонации. В этой связи рассмотрено взаимодействие детонационной волны с расположенным вдоль стенки канала слоем покоящегося нереагирующего газа при нормальных условиях, ограниченным с обеих сторон одиночными барьерами. Расчеты показали, что разрушающее воздействие слоя на волну определяется как его геометрическими параметрами, так и составом заполняющей его газовой смеси [28]. В результате численного моделирования определен ряд нереагирующих газов, использование которых для заполнения слоя приводит к активному гашению поперечных волн в волне детонации. Более того, установлено, что слой, заполненный некоторыми нереагирующими газовыми смесями, подавляет детонационную волну эффективнее области с препятствиями той же высоты и протяженности с расстоянием между барьерами $\Delta L_b = 1$ мм. Так, использование слоя протяженностью $L_b = 5$ см и высотой $H_b = 6$ мм, заполненного смесью 7,1 He-16,9 N₂, позволяет погасить детонационное горение (рис. 2 а), в то время как область с препятствиями с теми же параметрами не разрушает детонацию (рис. 2 б).

Продолжая исследование, рассмотрено взаимодействие волны детонации с областью с препятствиями при замене первоначальной горючей смеси между барьерами на нереагирующий газ. В результате проведенных расчетов для серии неразрушающих детонацию барьеров (рис. 1 а) предложен ряд нереагирующих газовых смесей, использование которых для заполнения пространства между препятствиями обеспечивает подавление детонации (рис. 3).

3.2. Влияние добавок пероксида водорода и гелия на параметры детонационного горения смеси

Численно исследовано распространение ячеистой детонационной волны в плоском канале в покоящейся при нормальных условиях стехиометрической водородно-воздушной смеси с добавками пероксида водорода H₂O₂ и гелия He.

Внесение активной добавки H₂O₂ незначительно меняет скорость волны и параметры продуктов детонации. Так, при рассмотрении структуры плоской одномерной стационарной детонационной волны (структуры детонации Зельдовича-Неймана-Деринга (ЗНД структуры)) получено, что температура продуктов горения при внесении H₂O₂ (доля активной добавки увеличивалась в расчетах до 1%), как и в случае чистой смеси, близка к 3000 К. Однако добавление пероксида водорода существенно уменьшает протяженность зоны индукции, что согласуется с работой [29], а также размер ячейки детонационной волны, распространяющейся в плоском канале. Это связано с быстрым разложением пероксида водорода за лидирующим ударным фронтом с образованием активного радикала OH. Следует отметить, что влияние H₂O₂ на параметры детонационного горения стехиометрической водородно-воздушной смеси существенно слабее влияния добавки озона при прочих равных условиях.

При добавлении в чистую водородно-воздушную смесь существенного количества гелия, как при внесении аргона, напротив, температура за волной Чепмена-Жуге уменьшается, при этом существенно увеличивается протяженность зоны индукции, что отмечалось в работе [29]. Кроме

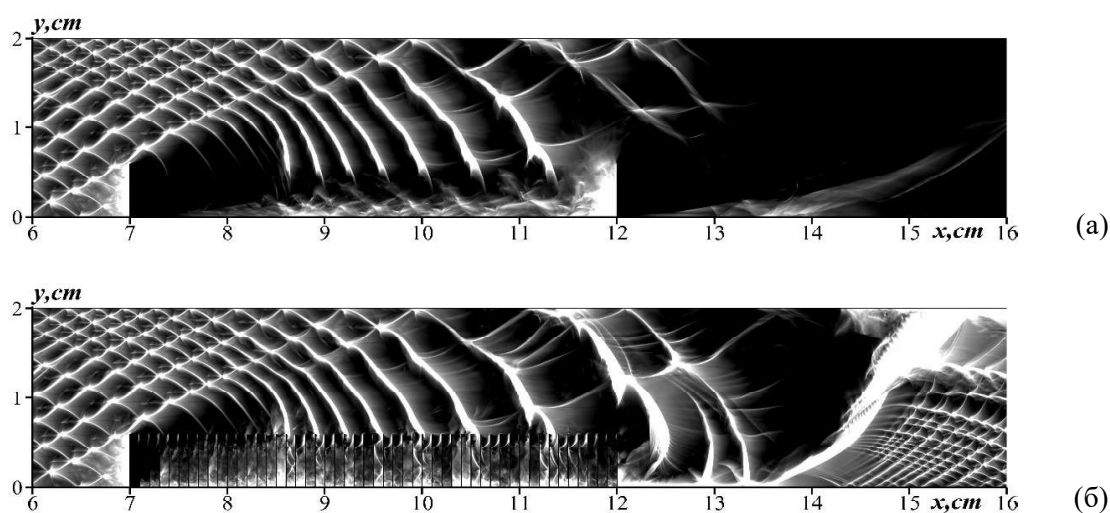


Рис. 2. Численный след детонационной волны при взаимодействии со слоем нереагирующего газа 7,1 He-16,9 N₂ и областью с барьерами ($\Delta L_b = 1$ мм) при $L_b = 5$ см и $H_b = 6$ мм: (а) – гашение детонационного горения слоем нереагирующего газа; (б) – реиницирование детонации после прохождения области с барьерами.

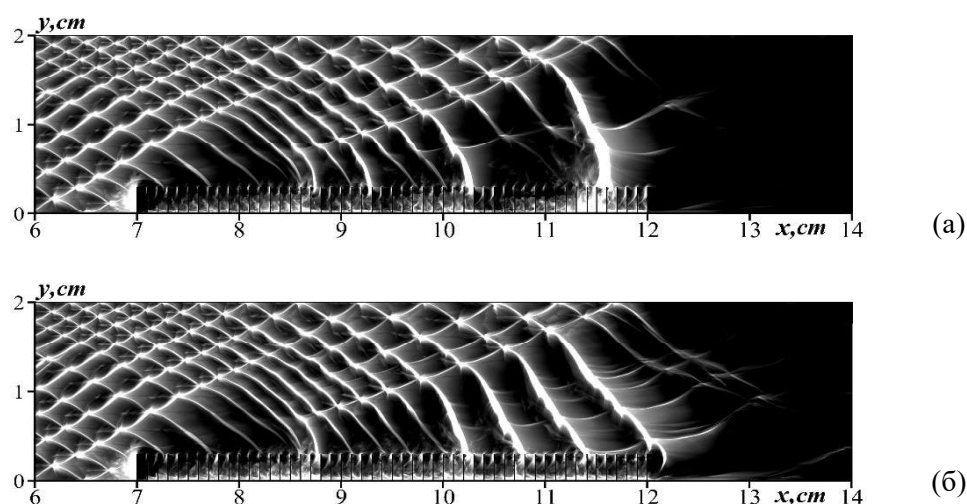


Рис. 3. Гашение детонационного горения заполненной нереагирующим газом областью с барьерами ($L_b = 5$ см, $H_b = 3$ мм, $\Delta L_b = 1$ мм): (а) – воздух; (б) – Ar.

того, разбавление горючей смеси гелием приводит к увеличению размера детонационной ячейки [30]. Однако при внесении гелия (в отличие от аргона) скорость волны детонации Чепмена-Жуге существенно больше скорости детонации в

чистой смеси. Для валидации численного моделирования детонационного горения водородосодержащей смеси с добавлением гелия проведено сравнение скорости детонации Чепмена-Жуге в разбавленной гелием водородно-кислородной

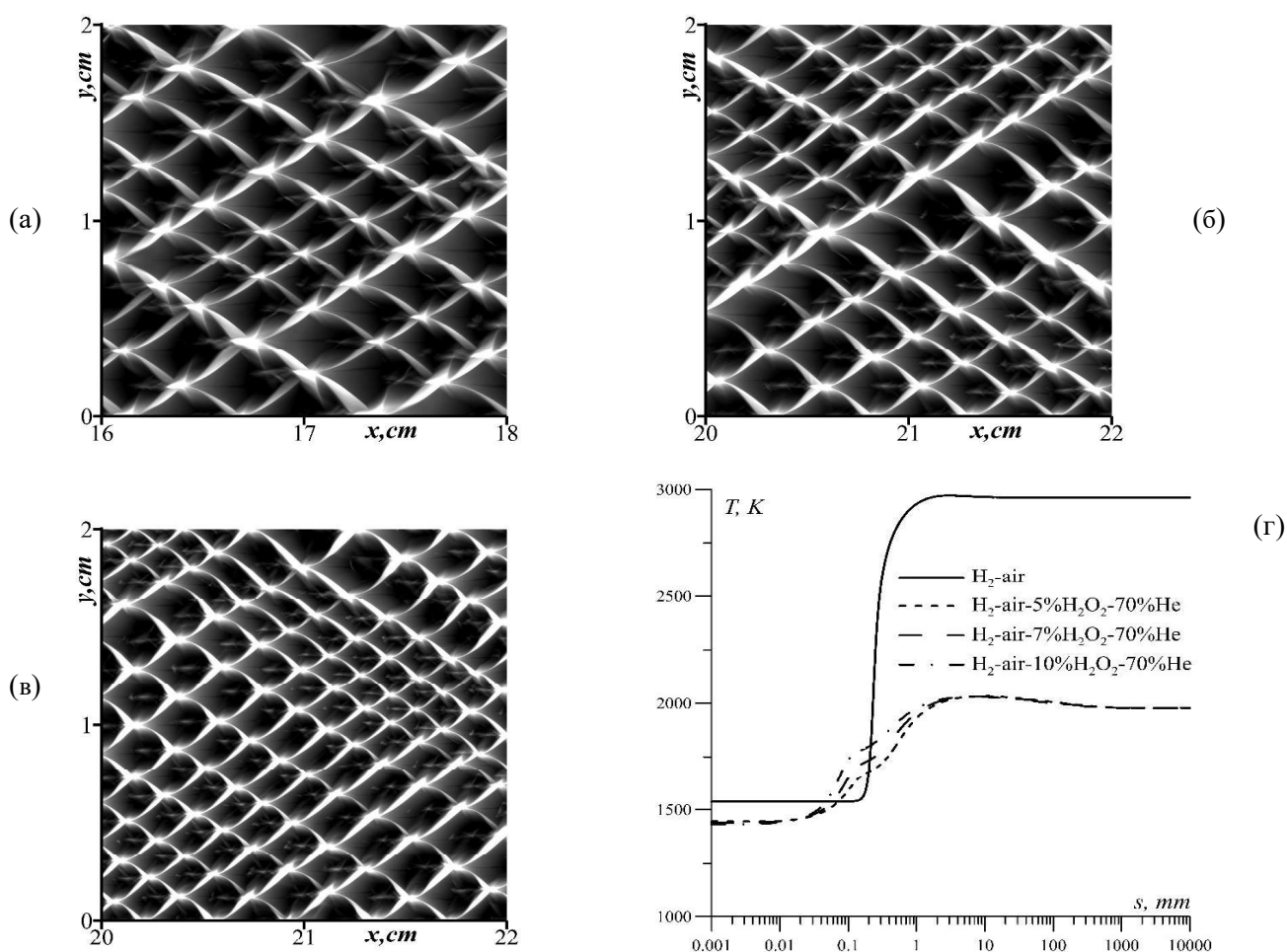


Рис. 4. Влияние добавок H_2O_2 и He в стехиометрическую водородно-воздушную смесь на параметры волны детонации: (а, б, в) – ячеистая структура плоской детонационной волны (а) – H_2 -воздух-5% H_2O_2 -70% He; (б) – H_2 -воздух-7% H_2O_2 -70% He; (в) – H_2 -воздух-10% H_2O_2 -70% He; (г) – графики зависимостей температуры от расстояния до лидирующей ударной волны ($= 0$) в ЗНД модели детонации для чистой смеси и рассмотренных смесей с добавками (а-в).

смеси с экспериментальными данными [30, 31]. Относительное отклонение полученных расчетных значений скорости детонации от экспериментальных для различных мольных долей гелия не превышает 1,1%.

Согласно сказанному выше следует ожидать, что ячейку детонационной волны, увеличенную после разбавления исследуемой стехиометрической водородно-воздушной смеси гелием, можно уменьшить соответствующей добавкой пероксида водорода, сохранив при этом пониженную температуру продуктов детонации. В результате проведенного численного исследования было установлено, что мольные доли вносимых добавок H_2O_2 и He могут быть подобраны так, что размер ячейки волны детонации в полученной смеси будет близок к среднему размеру ячейки в чистой смеси, при этом температура продуктов детонации будет снижена до значений, близких к 2000 К (рис. 4). Так, в случае внесения 5% H_2O_2 и 70% He (рис. 4 а) размер детонационной ячейки немного превышает средний размер ячейки в чистой смеси (рис. 1), однако небольшое увеличение вносимого в данную смесь пероксида водорода (рис. 4 б, в) позволяет получить детонацию с ячеистой структурой близкой к структуре детонации в чистой смеси. Отметим, что для всех рассмотренных смесей с добавками (рис. 4 а-в) скорость распространения самоподдерживающейся волны превышает скорость детонации в чистой смеси более, чем на 20%.

Таким образом, добавки H_2O_2 и He в указанных концентрациях обеспечивают существенное уменьшение температуры в продуктах детонации без падения скорости волны и значимого изменения размера детонационной ячейки, являющейся фундаментальной характеристикой детонационной способности смеси.

4. Заключение

В работе представлены результаты численных исследований, проведенных с целью определения новых способов управления детонационным горением стехиометрической водородно-воздушной смеси в плоском канале.

Предложен ряд конструктивных решений, усиливающих разрушающее воздействие расположенных в канале множественных препятствий на распространяющуюся самоподдерживающуюся детонационную волну.

Численно исследовано влияние добавок пероксида водорода и гелия в горючую смесь на

параметры волны детонации. Установлено, что мольные доли вносимых добавок могут быть подобраны так, что размер ячейки волны детонации в полученной смеси будет близок к среднему размеру ячейки в чистой смеси, при этом температура продуктов детонации будет существенно снижена, а скорость волны будет превышать скорость распространения самоподдерживающейся детонации в смеси без добавок.

Благодарность

Работа выполнена в НИИ механики МГУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543).

Список литературы

- [1]. 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.
- [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. – Vol. 894. – P. 012008.
- [3]. Тропин Д.А., Федоров 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.
- [4]. Obara T., Sentanuhady J., Tsukada Y., Ohayagi S. Reinitiation process of detonation wave behind a slit-plate // Shock Waves. – 2008. – Vol. 18. – P. 117-127.
- [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.
- [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. Vol. 35(2). – P. 1973-1979.
- [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. – 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. – P. 1011-1018.
- [11]. Tropin D., Temerbekov V. Numerical simulation of detonation wave propagation through a rigid permeable barrier // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – Vol. 47(87). – P. 37106-37124.
- [12]. 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(25). – P. 12711-12725.
- [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.
- [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.
- [15]. 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.
- [16]. Levin, V.A., Zhuravskaya, T.A. The Methods of Control of Stabilized Detonation Location in a Supersonic Gas Flow in a Plane Channel // *Combustion Science and Technology*. – 2023. – Vol. 195(7). – P. 1-13.
- [17]. 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.
- [18]. Левин, В., Журавская, Т. Детонационное горение газовой смеси в плоском канале с множественными барьерами // *Горение и плазмохимия*. – 2022. – № 2. – С. 93-101.
- [19]. Левин В.А., Журавская Т.А. Детонационное горение водородно-воздушной смеси с добавками аргона и озона // *Инженерно-физический журнал*. – 2023. – Т. 96, № 7. – С. 1792-1802.
- [20]. Глушко В.П. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Т. I, Кн. 2. – Москва: Наука, 1978. – 328 с.
- [21]. 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.
- [22]. Родионов А.В. Монотонная схема второго порядка аппроксимации для сквозного расчета неравновесных течений // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 1987. – Т. 27, № 4. – С. 585-593.
- [23]. Voevodin V., 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. – Vol. 6(2). – P. 4-11.
- [24]. Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах. – Москва: ГИФМЛ, 1963. – 176 с.
- [25]. Lee J.H.S. The Detonation Phenomenon. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – P. 400.
- [26]. 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(3). – P. 211-229.
- [27]. 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.
- [28]. Zhuravskaya T.A., Levin V.A. Failure of a Detonation Wave in a Plane Channel with Multiple Obstacles // *Fluid Dyn.* – 2024. – Vol. 59. – P. 304-313.
- [29]. 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. – V. 38(3). – P. 3825-3834.
- [30]. Yujie H., Xiaoyang L., Xianshu L., Xiaozhe Y., Xingqing Y., Jianliang Y. Detonation behaviors of stoichiometric H_2-O_2 mixture diluted with He, N_2 , CO_2 at different initial pressures // *Fuel*. – 2022. – V. 330. – 125555.
- [31]. Kumar R. Detonation cell widths in hydrogen-oxygen-diluent mixtures // *Combust Flame*. – 1990. – V. 80(2). – P. 157.

References

- [1]. Vasil'ev AA, Pinaev AV, Trubitsyn AA, Grachev AYu, Trotsyuk AV, Fomin PA, Trilis AV (2017) *Combust. Explos. Shock Waves* 53: 8-14. <https://doi.org/10.1134/S0010508217010026>
- [2]. Bedarev IA, Fedorov AV (2017) *Journal of Physics: Conference Series* 894: 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/894/1/012008>

- [3]. Tropin DA, Fedorov AV (2018) Combust. Explos. Shock Waves 54: 200-206. <https://doi.org/10.1134/S0010508218020090>
- [4]. Obara T, Sentanuhady J, Tsukada Y, Ohayagi S (2008) Shock Waves 18: 117-127. <https://doi.org/10.1007/s00193-008-0147-9>
- [5]. Medvedev SP, Khomik SV, Gel'fand BE (2009) Russian Journal of Physical Chemistry B 3: 963-970. <https://doi.org/10.1134/S1990793109060165>
- [6]. Qin H, Lee JHS, Wang Z, Zhuang F (2015) Proceeding the Combustion Institute 35(2): 1973-1979. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.07.056>
- [7]. Sharypov OV, Pirogov YA (1995) Comb. Expl. Shock Waves 31: 466-470. <https://doi.org/10.1007/BF00789368>
- [8]. Teodorczyk A, Lee JHS (1995) Shock Waves 4: 225-236. <https://doi.org/10.1007/BF01414988>
- [9]. Radulescu MI, Lee JHS (2002) Combustion and Flame 131(1-2): 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 GYu, Golovastov SV, Golub VV (2018) Shock Waves 28: 1011-1018. <https://doi.org/10.1007/s00193-018-0831-3>
- [11]. Tropin D, Temerbekov V (2022) International Journal of Hydrogen Energy 47(87): 37106-37124. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.256>
- [12]. Yang T, He Q, Ning J, Li J (2022) International Journal of Hydrogen Energy 47(25): 12711-12725. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.230>
- [13]. Levin VA, Zhuravskaya TA (2020) Tech. Phys. Lett 46(2): 189-192. <https://doi.org/10.1134/S1063785020020248>
- [14]. Zhuravskaya TA, Levin VA (2020) Fluid Dynamics 55: 488-497. <https://doi.org/10.1134/S0015462820040138>
- [15]. Levin VA, Zhuravskaya TA (2018) Proc. Steklov Inst. Math. 300: 114-125. <https://doi.org/10.1134/S0081543818010091>
- [16]. Levin VA, Zhuravskaya TA (2023) Combustion Science and Technology 195(7): 1-13. <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1557641>
- [17]. Levin VA, Zhuravskaya TA (2021) Doklady Physics 66: 320-324. <https://doi.org/10.1134/S1028335821110057>
- [18]. Levin V, Zhuravskaya T (2022) Combustion and Plasma Chemistry 20(2): 93-101. <https://doi.org/10.18321/cpc533>
- [19]. Levin VA, Zhuravskaya TA (2023) J Eng Phys Thermophy 96: 1759-1768. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02846-2>
- [20]. Gurvich LV, Veyts IV (1989) Thermodynamic Properties of Individual Substances Ed [Termodinamicheskie svoystva individualnykh veshchestv] Vol. 1, Part 2. Hemisphere, New York. ISBN 0891167609.
- [21]. Bezgin LV, Kopchenov VI, Sharipov AS, Titova NS, Starik AM (2013) Combustion Science and Technology 185(1): 62-94. <https://doi.org/10.1080/00102202.2012.709562>
- [22]. Rodionov AV (1987) USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics 27(2): 175-180. [https://doi.org/10.1016/0041-5553\(87\)90174-1](https://doi.org/10.1016/0041-5553(87)90174-1)
- [23]. 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. <https://doi.org/10.14529/jfsi190201>
- [24]. Soloukhin RI (1966) Shock Waves and Detonations in Gases. Mono Book, Baltimore. P. 176.
- [25]. Lee JHS (2008) The Detonation Phenomenon. Cambridge University Press, Cambridge. P. 400. ISBN 978-0521897235
- [26]. Pintgen F, Eckett CA, Austin JM, Shepherd JE (2003) Combustion and Flame 133(3): 211-229. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00458-3](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00458-3)
- [27]. Levin VA, Zhuravskaya TA (2023) Technical Physics Letters 49(9): 79-82. <https://journals.ioffe.ru/articles/56717>
- [28]. Zhuravskaya TA, Levin VA (2024) Fluid Dyn 59: 304-313. <https://doi.org/10.1134/S0015462823603224>
- [29]. Kumar DS, Ivin K, Singh AV (2021) Proceedings of the Combustion Institute 38(3): 3825-3834. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.08.061>
- [30]. Yujie H, Xiaoyang L, Xianshu L, Xiaozhe Y, Xingqing Y, Jianliang Y (2022) Fuel 330: 125555. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125555>
- [31]. Kumar R (1990) Combust Flame 80(2): 157. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(90\)90124-A](https://doi.org/10.1016/0010-2180(90)90124-A)

Control of detonation combustion of hydrogen-air mixture

V.A. Levin*, T.A. Zhuravskaya

Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Michurinskiy ave. 1, Moscow, Russia

ABSTRACT

The paper presents the results of numerical studies carried out to determine new methods for controlling the detonation combustion of a stoichiometric hydrogen-air mixture in a plane channel. A number of design solutions have been proposed that enhance the destructive effect of multiple obstacles located in the channel on the propagating detonation wave. The influence of additions of hydrogen peroxide and helium to the combustible mixture on the parameters of the detonation wave has been studied in order to decrease the temperature of the combustion products without significantly changing the size of the detonation cell and reducing the wave velocity.

Keywords: stoichiometric hydrogen-air mixture, detonation wave, plane channel, detonation control

Сутегі-ауа қоспасының детонациялық жануын бақылау

В.А. Левин*, Т.А. Журавская

М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университетінің механика ғылыми-зерттеу институты, Мичуринский даңғылы, 1, Мәскеу, Ресей

АННОТАЦИЯ

Жұмыста жазық арнадағы стехиометриялық сутегі-ауа қоспасының детонациялық жануын бақылаудың жаңа әдістерін анықтау үшін жүргізілген сандық зерттеулердің нәтижелері берілген. Арнада орналасқан көптеген кедергілердің таралатын детонациялық толқынға деструктивті әсерін күшейтетін бірқатар жобалық шешімдер ұсынылды. Детонациялық ұяшық өлшемін айтарлықтай өзгертпей және толқын жылдамдығын төмендетпей жану өнімдерінің температурасын төмендету мақсатында қарастырылып отырған жанғыш қоспаға сутегі мен гелий асқын тотығының қосындыларының детонациялық толқынның параметрлеріне әсері зерттелді.

Түйін сөздер: стехиометриялық сутегі-ауа қоспасы, детонациялық толқын, жалпақ арна, детонацияны бақылау