

УДК 533.27: 534.222.2: 544.454.3

## УПРАВЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ В КАНАЛЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ ПОСРЕДСТВОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

© 2020 г. Т. А. Журавская<sup>a,b,\*</sup>, В. А. Левин<sup>a,b,c,\*\*</sup>

<sup>a</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики, Москва, Россия

<sup>b</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Механико-математический факультет, Москва, Россия

<sup>c</sup> Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

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

\*\*E-mail: levin@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 29.01.2020 г.

После доработки 12.03.2020 г.

Принята к публикации 12.03.2020 г.

Используя детальный кинетический механизм химического взаимодействия, численно исследовано влияние предварительной подготовки стехиометрической водородно-воздушной смеси (разложения части молекулярных водорода и кислорода на атомарные газы) на характеристики волны детонации с целью управления детонационным горением в плоских каналах с препятствиями. Установлено, что указанная частичная начальная диссоциация может использоваться для предотвращения гашения детонации в каналах как с одиночным препятствием, так и с множественными барьерами. Обнаружено, что получаемая в результате подготовки смесь отличается от начальной водородно-воздушной смеси качественно иным характером реинициирования детонации после взаимодействия с препятствиями.

*Ключевые слова:* численное моделирование, детальная кинетика, плоский канал, детонация, барьер, сохранение/гашение детонационного горения

DOI: 10.31857/S0568528120040131

Определение механизмов управления детонационным горением как в покоящейся газовой смеси, так и в сверхзвуковом потоке является одним из основных направлений изучения детонационных волн. В последнем случае большой интерес представляют способы стабилизации волны детонации и управления ее положением в высокоскоростном потоке газа, одним из которых является подбор специальной формы канала. Подробный обзор исследований, посвященных данной проблеме, представлен в [1]. В частности, в [2] для некоторых значений числа Маха входящего потока определены геометрические параметры плоского симметричного канала с сужением поперечного сечения (с пережатием), обеспечивающие стабилизацию в потоке волны детонации. В указанной работе детонационная волна, инициируемая энергоподводом в начале выходной части постоянной ширины, проходит против потока и стабилизируется в расширяющейся части канала. Выполненное в [3] исследование устойчивости формирующегося течения к вызванным энергоподводом сильным возмущениям показало, что данное течение со стабилизированной волной устойчиво к возмущениям, которые не приводят к переносу детонации выше по потоку некоторого (критического) сечения канала. В таком случае детонационное горение остается в расширяющейся части канала и с течением времени течение со стабилизированной волной детонации восстанавливается. В противном случае детонационная волна оказывается в сужающейся части и выходит из канала против потока. Полученный результат полностью соответствует установленному в [4] условию устойчивости квазиодномерного течения газа с замыкающей ударной волной в канале переменного сечения, которое было распространено на течение горючей смеси с пересжатой детонационной волной в качестве замыкающего скачка [5]. Решение задачи о распространении разрыва по неоднородному статическому фону представлено в [6].

Рассмотрена возможность управления детонационными и ударными волнами в сверхзвуковом потоке с помощью периодического подвода энергии [2, 7].

Исследованы стабилизация детонационной волны и управление ее положением в высокоскоростном потоке посредством добавления в газ мелких инертных частиц [8, 9], благодаря умень-

шению скорости распространения детонации в смеси с подобными добавками. В результате обнаружено, что в ряде случаев, когда геометрические параметры канала с пережатием не обеспечивают стабилизацию детонации и волна выходит из канала против потока, добавление в поступающую газовую смесь мелких инертных частиц приводит к формированию в канале течения со стабилизированной детонационной волной, при этом изменение концентрации частиц может рассматриваться как механизм управления положением стабилизированной детонации.

Наличие инертных частиц позволяет управлять детонационной волной и в покоящейся смеси. Так, в [10] численно изучено разрушение детонации помещенными в газ неподвижными частицами. В [11] экспериментально установлен факт полного гашения детонационного горения завесой из нереагирующих частиц пыли.

Ряд исследований посвящен управлению волной детонации, распространяющейся в покоящемся газе, с помощью расположенных поперек канала щелевых пластин, перфорированных стенок, а также посредством различных пористых вставок на внутренней поверхности канала, например, [12–18]. Так, согласно результатам эксперимента, пористые покрытия стенок могут использоваться как для предотвращения выхода детонации в открытое пространство [14], так и для полного гашения детонационного горения в канале или трубе [15–18]. В частности, в [16] экспериментально установлено, что механизмы разрушения детонации в каналах с пористыми вставками в смесях с нерегулярной и регулярной ячеистой детонационной структурой качественно отличаются друг от друга.

Однако в случаях использования детонации большой интерес представляют механизмы, препятствующие разрушению волн. В данной работе исследуется влияние предварительной подготовки покоящейся стехиометрической водородно-воздушной смеси (диссоциации части молекулярных водорода и кислорода) на распространение детонации с целью определения условий сохранения детонационного горения в плоских каналах с препятствиями (барьерами). В частности, рассматривается взаимодействие волны с областью барьеров, моделирующей вставку с пористым покрытием на внутренней поверхности канала (например, покрытую стальной ватой). Использование предварительной подготовки смеси для управления детонацией было впервые предложено в [19].

## 1. 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 стехиометрической водородно-воздушной смеси, которая моделируется как смесь газов  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  и Ar в молярном соотношении 42:21:78:1 соответственно, и подготовленной смеси, представляющей собой стехиометрическую водородно-воздушную смесь, в которой часть водорода  $H_2$  и кислорода  $O_2$  предварительно разложена на атомы H и O. В работе рассматриваются смеси со степенью предварительной диссоциации горючего и окислителя, равной 1% (далее “смесь 1”) и 1.5% (“смесь 2”).

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

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

**Таблица 1.** Параметры волны детонации в смесях при нормальных условиях: средняя скорость самоподдерживающейся ячеистой детонационной волны  $D$  в плоском канале, скорость детонации Чепмена–Жуге  $D_{CJ}$  и ширина зоны индукции  $\Delta_{ind}$  для плоской одномерной стационарной волны

смесь	$D$ , м/с	$D_{CJ}$ , м/с	$\Delta_{ind}$ , мм
$H_2$ +воздух	1963	1973	0.225
смесь 1	1974	1988	0.045
смесь 2	1983	1995	0.037

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, рассматриваемой как совершенный газ, 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 [20].

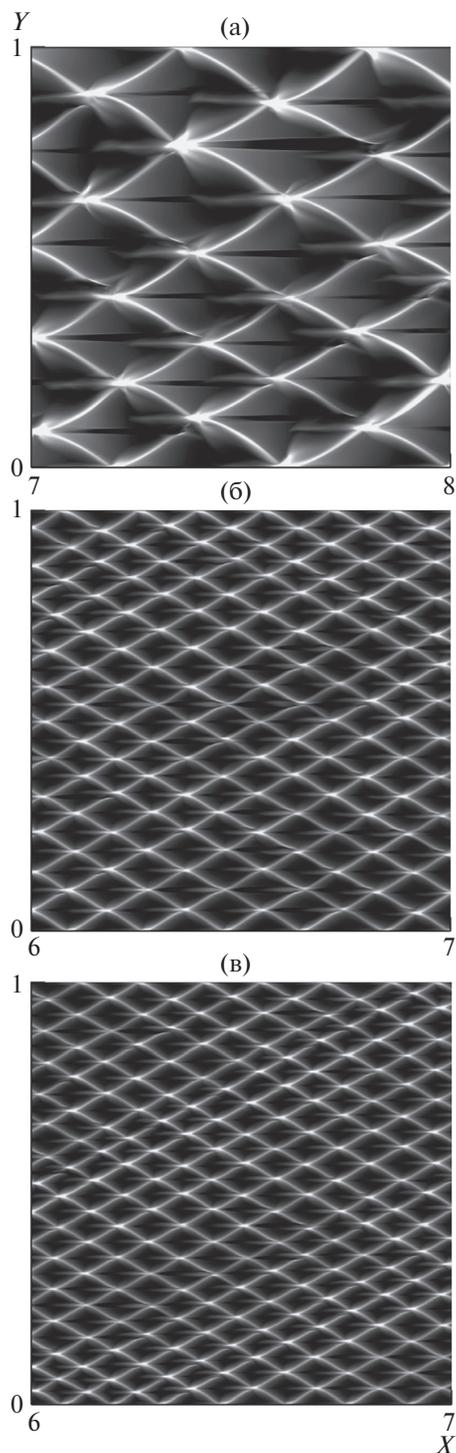
Для описания химического взаимодействия используется модифицированный детальный кинетический механизм окисления водорода, предложенный в [21].

Решение уравнений газовой динамики совместно с уравнениями детальной химической кинетики было проведено конечно-разностным методом, основанным на схеме Годунова [22]. Для численного моделирования использовался разработанный авторами и апробированный ранее [1–3, 8, 9] программный комплекс, в котором реализовано гибридное распараллеливание расчетов MPI/OpenMP. Моделирование проведено при шаге разбиения расчетной сетки  $\Delta = 5$  мкм, обеспечивающем корректное разрешение структуры детонационной волны.

## 2. ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ НА ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ СМЕСИ

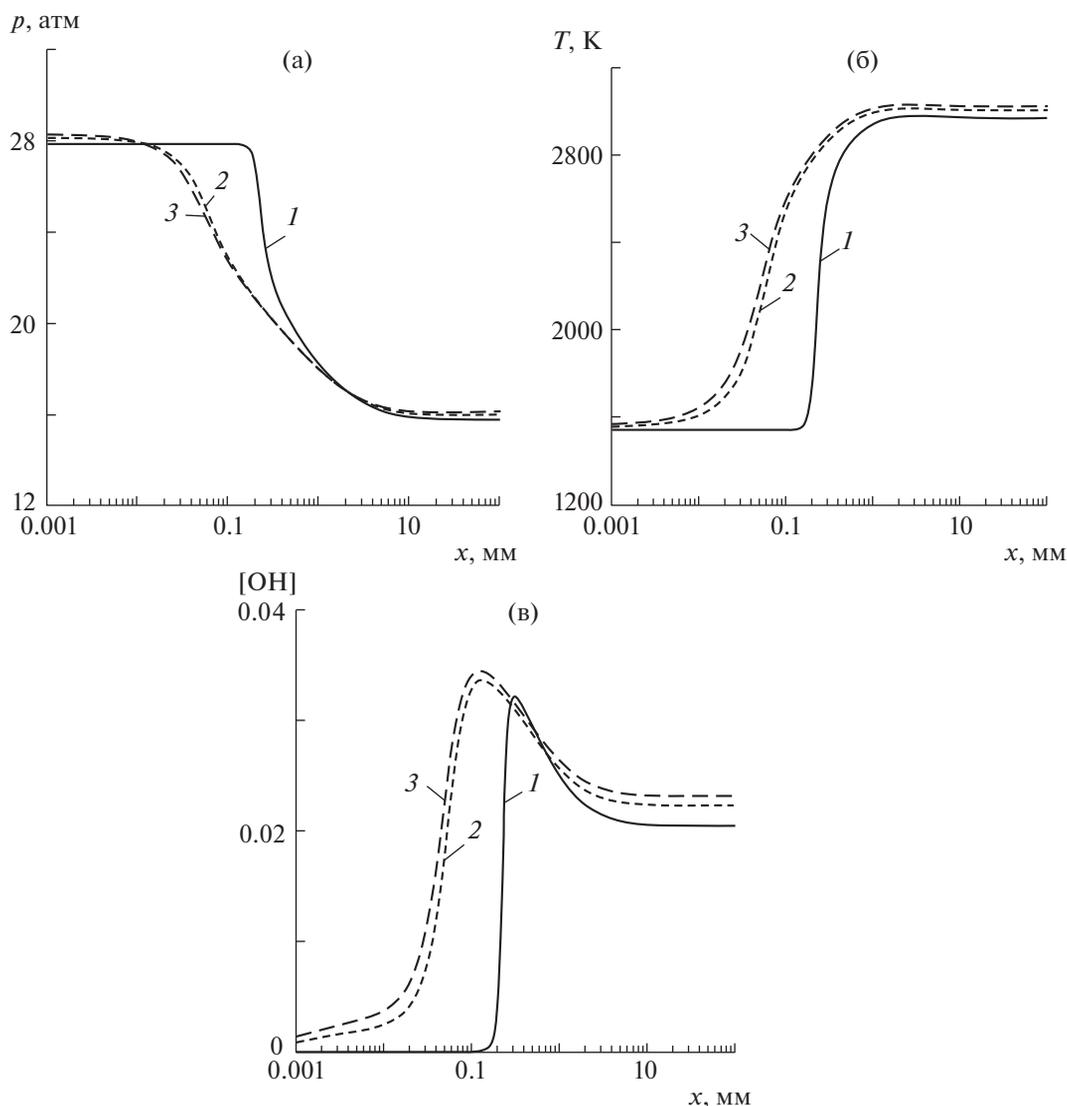
В результате начального однородного подвода энергии в газе инициируется плоская детонационная волна. Однако постепенно фронт волны искривляется, возникают поперечные волны, в канале формируется детонационная волна с устойчивой ячеистой структурой [23, 24]. Численное моделирование показало, что предварительная подготовка смеси приводит к существенному уменьшению размера детонационной ячейки. На рис. 1 представлены численные аналоги следа, который оставляет в эксперименте распространяющаяся в плоском канале детонационная волна на расположенной вдоль стенки закопченной пластине [23]. Хорошо видно, что в рассмотренных смесях 1 и 2 (рис. 1б, 1в) детонационная ячейка меньше ячейки в неподготовленной смеси (рис. 1а) более чем в 2 и 3 раза соответственно. В то же время установлено, что предварительная диссоциация приводит к незначительному увеличению скорости распространения самоподдерживающейся волны детонации  $D$ . Так, скорость детонационного горения в рассмотренных в работе подготовленных смесях превышает скорость волны в неподготовленном газе не более чем на 1% (табл.).

Изучение структуры плоской одномерной стационарной детонационной волны в указанных смесях (структуры детонации Зельдовича–Неймана–Дёринга (ЗНД детонации)) показало, что предварительная подготовка увеличивает скорость детонации Чепмена–Жуге  $D_{CJ}$  не более чем на 1.12%, при этом протяженность зоны индукции  $\Delta_{ind}$  существенно уменьшается (табл.). Приведенные в таблице значения ширины зоны индукции были определены, согласно [25], как расстояние между ударным фронтом и точкой максимального градиента температуры в зоне реакции. На рис. 2 представлены графики зависимостей давления, температуры и мольной доли ОН от расстояния до лидирующей ударной волны в ЗНД модели детонации. Хорошо видно, что в результате предварительной подготовки смеси полная протяженность области реакции (зон индукции и интенсивного тепловыделения) меняется незначительно. Интересно отметить, что подобное влияние предварительная частичная диссоциация оказывает на характеристики детона-



**Рис. 1.** Ячеистая структура детонационной волны, распространяющейся в плоском канале: а – неподготовленная стехиометрическая водородно-воздушная смесь; б, в – предварительно подготовленные смеси 1; 2; здесь и далее  $X = x/L$ ,  $Y = y/L$ ,  $L$  – ширина канала; волна распространяется слева направо.

ционной волны и в случае водородно-кислородной смеси, разбавленной аргоном. Так, в смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 12\text{Ar}$  при начальных условиях  $p_0 = 20$  кПа,  $T_0 = 298.15$  К предварительное разложение 0.1%  $\text{H}_2$  и  $\text{O}_2$  приводит к уменьшению размера детонационной ячейки более чем 2.4 раза. Рассмотрение ЗНД структуры волны показало, что в результате указанной подготовки протяжен-



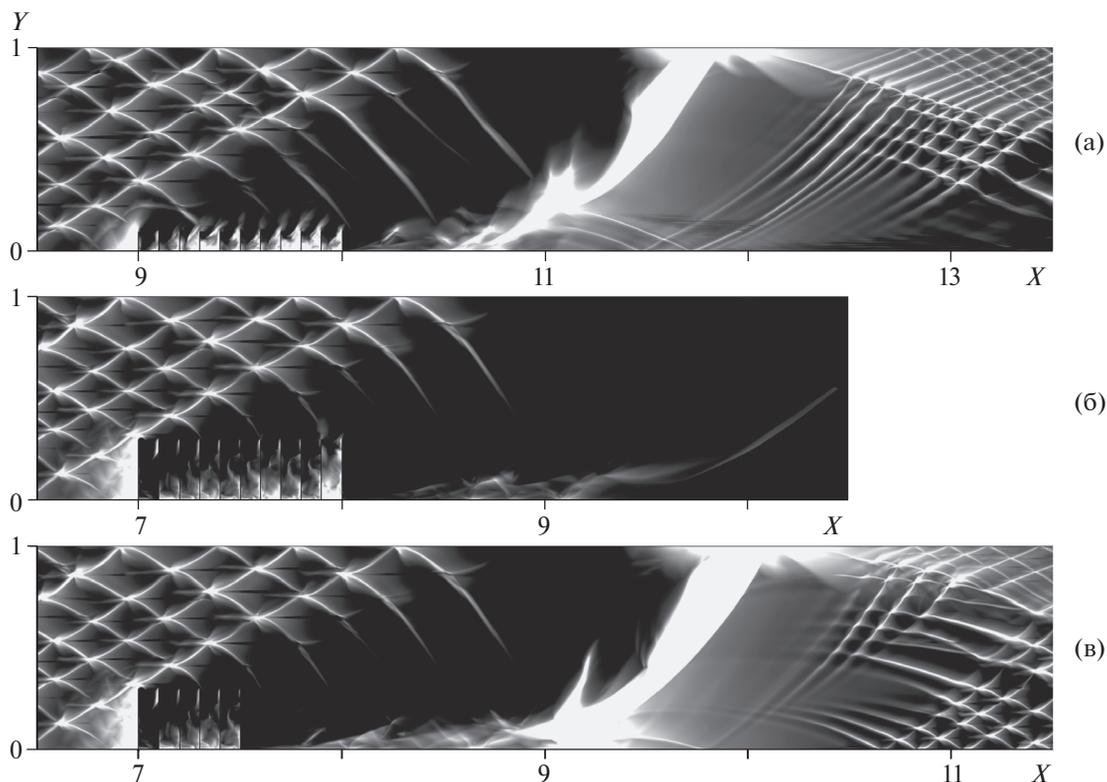
**Рис. 2.** Профили давления (а), температуры (б) и мольной доли  $\text{OH}$  ( $[\text{OH}]$ ) (в) в плоской стационарной волне детонации (здесь  $x$  – расстояние до лидирующей ударной волны): 1 – неподготовленная смесь, 2, 3 – смеси 1, 2.

ность зоны индукции уменьшается более чем в 1.5 раза, при этом скорость  $D_{CJ}$  увеличивается лишь на 0.07%.

### 3. УПРАВЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ В КАНАЛЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Установленные особенности детонационного горения новой смеси, получаемой в результате диссоциации части горючего и окислителя, позволяют использовать предварительную подготовку для управления детонацией.

Рассмотрено взаимодействие сформированной ячеистой детонационной волны с поперечным бесконечно-тонким неразрушающимся одиночным препятствием (барьером), расположенным в канале. Известно, что взаимодействие детонационной волны с препятствием, высота которого превышает некоторое (критическое) значение, зависящее от ширины канала, приводит к срыву детонации [26]. В результате численного моделирования установлено, что критическая высота препятствия для подготовленной смеси превышает значение критической высоты для неподготовленной при прочих равных условиях. Таким образом, подготовка газа может использоваться для предотвращения разрушения волны детонации расположенным в канале барьером.

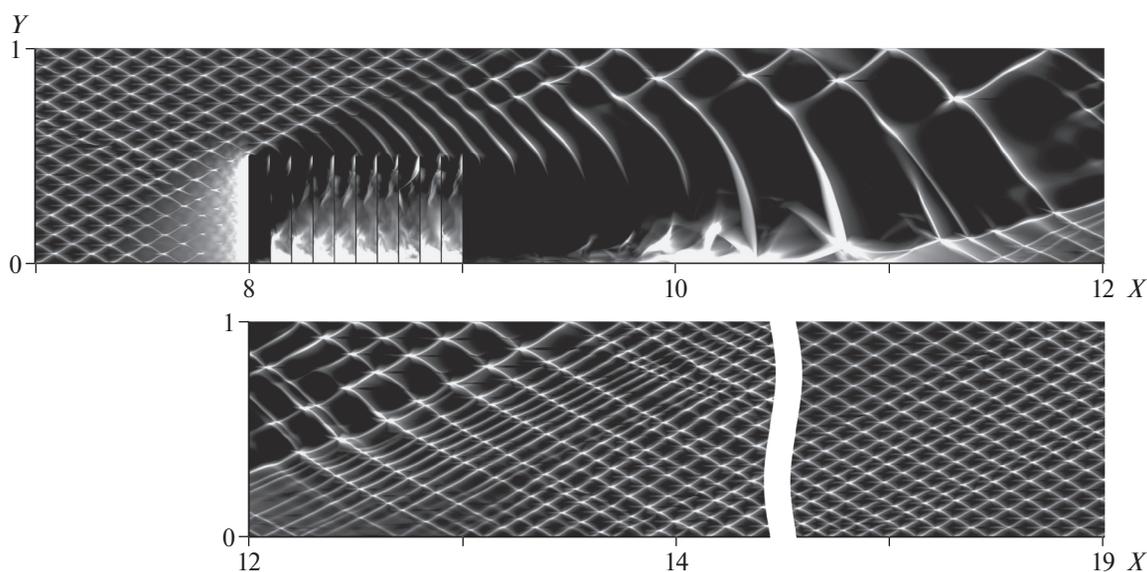


**Рис. 3.** Взаимодействие детонационной волны с областью препятствий (барьеров) при  $\Delta L_b = 0.1$  см в неподготовленной стехиометрической водородно-воздушной смеси: а –  $L_b = 1$ ,  $H_b = 0.1$ ; 1, 0.3; 0.5, 0.3 см; а, в – восстановление детонации; б – гашение детонационного горения.

Продолжая исследование, рассмотрено взаимодействие распространяющейся в плоском канале ячеистой детонационной волны с областью бесконечно-тонких поперечных барьеров, расположенной на одной из его стенок. Подобная область может рассматриваться как простая модель вставки с пористым покрытием на внутренней поверхности канала (например, покрытой стальной ватой).

Численное моделирование показало, что результат взаимодействия волны с препятствиями зависит от протяженности области  $L_b$ , высоты барьеров  $H_b$  и расстояния между соседними барьерами  $\Delta L_b$  (рис. 3). Так, в случае неподготовленной смеси область протяженностью  $L_b = 1$  см с барьерами высотой  $H_b = 0.1$  см ( $\Delta L_b = 0.1$  см) не разрушает детонационную волну (рис. 3а), однако увеличение высоты барьеров до  $H_b = 0.3$  см при прочих постоянных параметрах области приводит к срыву детонации (рис. 3б). Не изменяя высоту препятствий, детонацию можно сохранить, в частности, уменьшив протяженность области барьеров до  $L_b = 0.5$  см (рис. 3в).

Численное моделирование показало, что при фиксированных параметрах области  $L_b$  и  $\Delta L_b$  существует критическая высота барьеров (зависящая от ширины канала), при превышении которой препятствия гасят детонационное горение газовой смеси. Получено, что, как и при одиночном препятствии, критическая высота барьеров в случае подготовленной смеси существенно превышает критическую высоту для неподготовленного газа. Так, в случае  $L_b = 1$  и  $\Delta L_b = 0.1$  см препятствия высотой  $H_b = 0.3$  см гасят детонационное горение в неподготовленной смеси (рис. 3б), в то время как взаимодействие волны с областью барьеров высотой  $H_b = 0.5$  см в подготовленной смеси не приводит к разрушению детонации (рис. 4). Более того, получено, что при увеличении высоты барьеров в ряде случаев достаточным условием для сохранения детонационного горения является повышение степени предварительной диссоциации газов (рис. 5). Так, при увеличении высоты препятствий до  $H_b = 0.7$  см при прочих постоянных параметрах ( $L_b = 1$ ,  $\Delta L_b = 0.1$  см) предварительной диссоциации 1% горючего и окислителя оказывается не-



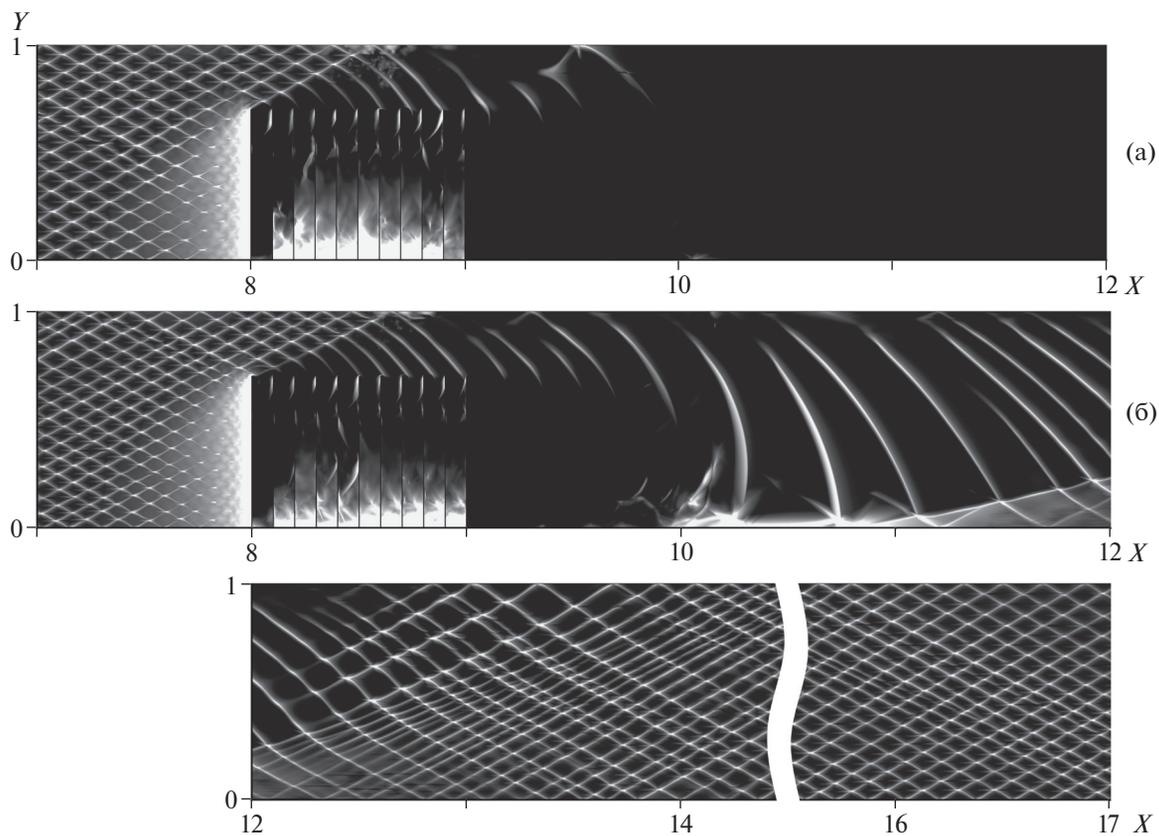
**Рис. 4.** Восстановление детонационной волны в предварительно подготовленной смеси 1 после взаимодействия с областью барьеров в случае  $L_b = 1$ ,  $H_b = 0.5$ ,  $\Delta L_b = 0.1$  см.

достаточным для сохранения детонации: область с барьерами гасит детонационное горение в смеси 1 (рис. 5а). Однако использование смеси 2 в рассматриваемом канале позволяет предотвратить гашение детонации (рис. 5б). Таким образом, установленный рост критической высоты как одиночного поперечного препятствия, так и области барьеров в случае подготовленной смеси по сравнению с неподготовленной указывает на возможность использования предварительной диссоциации части горючего и окислителя для предотвращения разрушения волны детонации в каналах с подобными вставками.

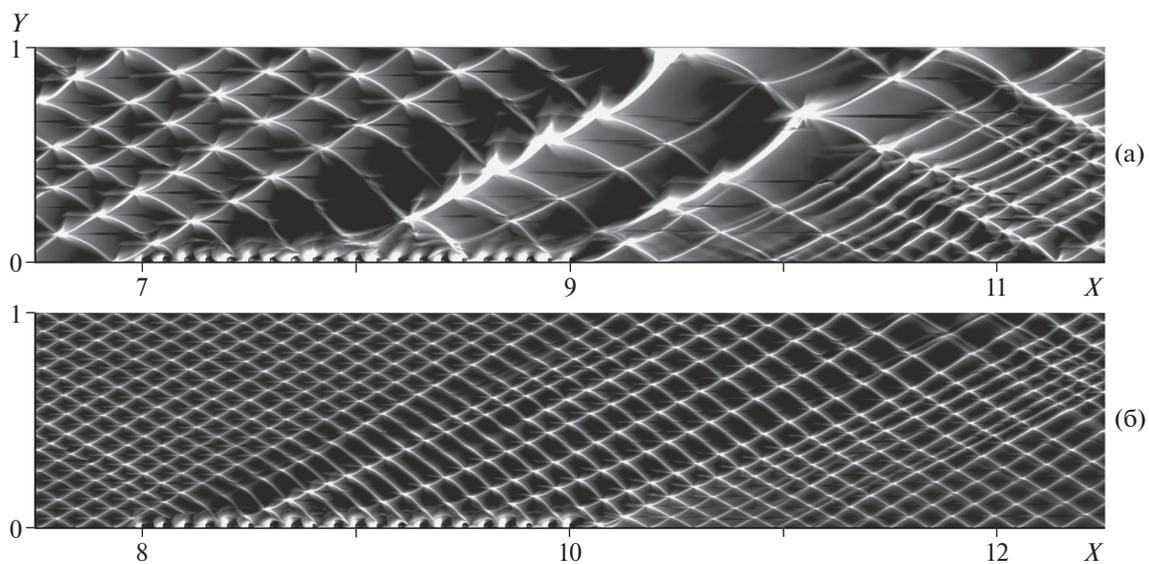
В случаях, когда высота барьеров много меньше критической, детонационное горение сохраняется при взаимодействии волны с препятствиями (рис. 6). Представленные на рис. 6 численные аналоги следового отпечатка распространяющейся волны хорошо иллюстрируют гашение поперечных волн в области барьеров и зарождение новых в волне детонации. Размер детонационной ячейки волны, проходящей вдоль препятствий, увеличивается, что соответствует результатам экспериментов по распространению детонации в каналах с пористыми стенками [15, 16]. В случае неподготовленной смеси (рис. 6а) в результате взаимодействия с барьерами структура волны становится сильно нерегулярной, в то время как в подготовленной смеси детонация сохраняет регулярную структуру (рис. 6б). После прохождения барьеров размер детонационных ячеек постепенно уменьшается.

При увеличении высоты препятствий (высота по-прежнему меньше критической) волна детонации разрушается (локально или полностью) взаимодействием с барьерами и реиницируется после их прохождения. Представленные численные аналоги следа детонационной волны в случаях восстановления детонации в неподготовленной водородно-воздушной смеси (рис. 3а, 3в) показывают, что детонация реиницируется после отражения от нижней стенки канала расходящейся волны, вышедшей из области барьеров. Подобно результатам экспериментов по восстановлению детонации после взаимодействия с препятствиями [27], 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 (рис. 7а). Формирование детонации поперек всего канала происходит на некотором расстоянии от области барьеров. Восстановленная детонационная волна является сильно пересжатой, о чем свидетельствует ее мелкая ячейчатая структура (рис. 3а, 3в). Постепенно размер детонационной ячейки увеличивается. Согласно результатам экспериментального исследования [13], такой характер восстановления детонации соответствует газовым смесям с нерегулярной структурой детонационной волны.

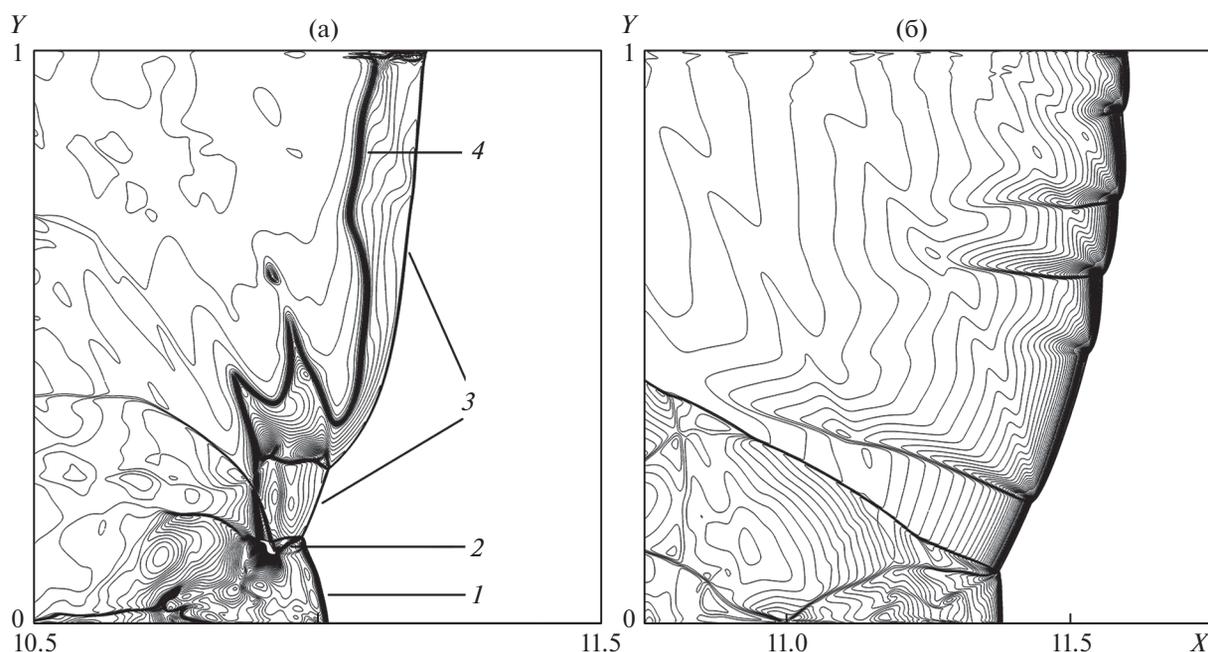
В случаях восстановления детонационного горения подготовленных смесей (рис. 4, 5б) после прохождения препятствий и отражения вышедшей из области барьеров волны от нижней стенки



**Рис. 5.** Распространение детонационной волны в плоском канале с областью препятствий (барьеров) в случае  $L_b = 1$ ,  $H_b = 0.7$ ,  $\Delta L_b = 0.1$  см: а – разрушение детонации в подготовленной смеси 1; б – восстановление детонационного горения в подготовленной смеси 2.



**Рис. 6.** Распространение детонационной волны в канале с областью барьеров ( $L_b = 2$ ,  $H_b = 0.02$ ,  $\Delta L_b = 0.1$  см): а – неподготовленная смесь; б – подготовленная смесь 1.



**Рис. 7.** Изолинии плотности, иллюстрирующие структуру волны после ее дифракции на препятствиях и отражения от нижней стенки канала в случаях реиницирования детонации ( $L_b = 1$ ,  $\Delta L_b = 0.1$  см): а – неподготовленная смесь,  $H_b = 0.1$  см,  $t = 0.058$  мс, 1 – маховская ножка (детонация), 2 – поперечная детонационная волна, 3 – ударная волна, 4 – область интенсивного тепловыделения; б – формирование детонации поперек канала в случае подготовленной смеси 2,  $H_b = 0.7$  см,  $t = 0.06$  мс.

детонационное горение формируется поперек всего канала (рис. 7б). Первоначально волна имеет более крупную детонационную ячейку, размер которой постепенно уменьшается, и с течением времени восстанавливается первоначальная структура волны. Отметим, что механизм восстановления детонации в случае подготовленных смесей существенно отличается от механизма реиницирования детонационного горения в неподготовленном газе и, согласно экспериментальным данным [13], характерен для смесей с регулярной ячейистой структурой волны детонации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численно исследована возможность управления детонационным горением покоящейся стехиометрической водородно-воздушной смеси в плоском канале с препятствиями посредством предварительной подготовки газа (разложения части молекулярных водорода и кислорода на атомарные газы).

В результате численного моделирования обнаружено, что начальная диссоциация части горючего и окислителя приводит к существенному уменьшению размера детонационной ячейки при незначительном увеличении скорости распространения самоподдерживающейся волны.

Установленные особенности детонационного горения новой смеси, получаемой в результате предварительного частичного разложения, позволяют использовать подготовку для управления детонацией в каналах с препятствиями. Так, обнаружено, что как для одиночного препятствия, так и для области барьеров критическая высота (препятствия, высота которых превышает критическую, гасят детонационное горение) в случае подготовленной смеси существенно больше, чем в случае неподготовленной. Это дает возможность использовать предварительную диссоциацию части горючего и окислителя для предотвращения гашения детонационного горения в плоских каналах с подобными вставками.

Кроме того, обнаружено, что получаемая в результате подготовки смесь отличается от начальной водородно-воздушной смеси качественно иным характером реиницирования детонации после взаимодействия с препятствиями, соответствующим смесям с регулярной ячейистой детонационной структурой.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (075-15-2019-1890). Изучение гашения детонации в каналах с барьерами проведено при поддержке РФФИ

(проект 18-01-00883). Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [28].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление детонационным горением в высокоскоростном потоке газовой смеси // Труды Математического ин-та им. В.А. Стеклова. 2018. Т. 300. С. 123–134.
2. Журавская Т.А., Левин В.А. Исследование некоторых способов стабилизации детонационной волны в сверхзвуковом потоке // Изв. РАН. МЖГ. 2012. № 6. С. 126–136.
3. Журавская Т.А., Левин В.А. Устойчивость течения газовой смеси со стабилизированной детонационной волной в плоском канале с сужением // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 4. С. 120–129.
4. Чёрный Г.Г. Неустойчивые движения газа в каналах с проницаемыми стенками. Об устойчивости скачка уплотнения в каналах // Тр. ЦИАМ. 1953. № 244. 12 с.
5. Газовая динамика. Избранное. В 2 т. Т. 1 / Под общей ред. А.Н. Крайко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 720 с.
6. Голубятников А.Н., Ковалевская С.Д. О распространении разрывов по неоднородному статическому фону // Изв. РАН. МЖГ. 2017. № 2. С. 165–172.
7. Замураев В.П., Калинина А.П. Формирование устойчивой околосзвуковой области в сверхзвуковом потоке в осесимметричном канале при воздействии струи и источников энергии // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. 2016. Т. 11. № 4. С. 45–51.
8. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление положением стабилизированной детонационной волны в сверхзвуковом потоке газовой смеси в плоском канале // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 6. С. 78–85.
9. Levin Vladimir A., Zhuravskaya Tatiana A. The Methods of Control of Stabilized Detonation Location in a Supersonic Gas Flow in a Plane Channel // Combustion Science and Technology. 2019. <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1557641>
10. Bedarev I.A., Fedorov A.V. Mathematical modeling of the detonation wave and inert particles interaction at the macro and micro levels // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 894. № 1. 012008.
11. 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.
12. 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.
13. 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 // Proc. Combustion Institute. 2015. V. 35(2). P. 1973–1979.
14. 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 / Proc. Combustion Institute. 2015. V. 35(2). P. 1981–1987.
15. Teodorczyk A., Lee J.H.S. Detonation attenuation by foams and wire meshes lining the walls // Shock Waves. 1995. V. 4(4). P. 225–236.
16. Radulescu M.I., Lee J.H.S. The failure mechanism of gaseous detonations: experiments in porous wall tubes // Combustion and Flame. 2002. V. 131(1–2). P. 29–46.
17. Wang L., Ma H., Shen Z., Fan Z. Detonation characteristics of stoichiometric H<sub>2</sub>–O<sub>2</sub> diluted with Ar/N<sub>2</sub> in smooth and porous tubes // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. V. 91. P. 345–353.
18. 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(5). P. 1011–1018.
19. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление детонационным горением посредством предварительной подготовки газовой смеси // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. Вып. 4. С. 40–44.
20. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. / Под ред. Глушко В.П. и др. Т. I. М.: Наука, 1978. 495 с.
21. Bezgin L.V., Korchenov 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(1). С. 62–94.
22. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
23. Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах. Москва: ГИФМЛ, 1963. 176 с.
24. Lee J.H.S. The Detonation Phenomenon. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 400 p.
25. Shepherd J.E. Chemical kinetics of hydrogen-air-diluent detonations / Progress in Astronautics and Aeronautics. 1986. V. 106. P. 263–293.
26. Журавская Т.А. Распространение волн детонации в плоских каналах с препятствиями // Изв. РАН. МЖГ. 2007. № 6. С. 135–143.
27. 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. Proc. Combustion Institute. 2013. V. 34(2). P. 1893–1901.
28. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В. // Открытые системы. 2012. № 7. С. 36–39.