

УДК 662.612.31

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ИНЖЕКЦИЕЙ ХИМИЧЕСКИ ИНЕРТНЫХ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Д. А. Тропин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск, d.a.tropin@itam.nsc.ru

Проведены расчеты инжекции струи инертных частиц в стехиометрическую водородовоздушную смесь со скоростями от 0.1 до 1.0 от скорости детонации Чепмена — Жуге. Проанализированы реализующиеся режимы течения. Выявлено, что увеличение температуры частиц приводит к воспламенению смеси, а увеличение скорости частиц — к инициированию детонационной волны. Определены критические условия инициирования детонации в терминах «концентрация частиц, размер частиц, скорость инжекции». Показаны различные сценарии инициирования детонации в зависимости от диаметра и концентрации частиц, в том числе с множественными очагами инициирования. Построены карты режимов течений в плоскости параметров «скорость инжекции, температура частиц различных размеров».

Ключевые слова: гомогенная детонация, инициирование детонации, инертные частицы, детальная кинетика, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV2022.9280

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов инициирования горения и детонации горючих газовых смесей в различных условиях имеет фундаментальное значение. В первую очередь подобные исследования связаны с пониманием природы детонационных процессов и определением критериев и условий воспламенения, горения и взрыва газовых смесей. Такая направленность исследований обусловлена проблемами взрыво- и пожаробезопасности, уменьшением последствий аварийных взрывов и разработкой методов их прогнозирования, а также проблемами проектирования различных энергетических установок, работающих на детонационных волнах.

В настоящее время существует множество методов инициирования детонационных волн: прямым способом; точечным или распределенными в пространстве источниками энергии [1–7]; фокусировкой ударных волн [8, 9]; электрическим разрядом, бегущим по смеси со скоростью Чепмена — Жуге [10]; путем дефлаграционно-детонационного перехода при введении различных источников турбулентности в канал [2, 11–13].

Стоит также отметить еще один способ

инициирования детонации — быстролетящим телом в реагирующей газовой смеси [14–21]. В [14, 15] экспериментально исследовано инициирование детонации при высокоскоростном движении тела (со скоростями $800 \div 1400$ м/с) по ацетиленокислородной смеси. Была предложена аналитическая зависимость между аэродинамическими характеристиками быстролетящего тела и физико-химическими параметрами горючей смеси в качестве критерия инициирования газовой детонации. В работе [16] представлены результаты экспериментального исследования инициирования наклонной детонации в водородовоздушной смеси снарядом, летящим со скоростью 2700 м/с. Получен режим инициирования детонации, аналогичный переходу дефлаграции в детонацию, а также выявлен режим прямого инициирования. В [17–19] экспериментально исследованы режимы распространения самоподдерживающихся наклонных детонационных волн, возникающих вблизи сферических тел, летящих со скоростью, превышающей скорость Чепмена — Жуге. Установлено, что снаряд, летящий с меньшей скоростью, может более эффективно стабилизировать самоподдерживающуюся наклонную детонационную волну, чем снаряд с большей скоростью. Показано, что для стабилизации детонационной волны определяющим параметром является диаметр быстролетящего тела. В [20, 21] проведено численное моделирование дви-

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00861, <https://rscf.ru/project/22-29-00861>).

© Тропин Д. А., 2023.

жения быстролетящего тела по водородовоздушной смеси. Получены режимы формирования наклонных детонационных волн и поля течения, согласующиеся с экспериментами [19]. Проведена оценка энергии инициирования детонации в зависимости от начального давления и диаметра снаряда. Полученные результаты согласуются не только с экспериментальными данными [19], но и с теоретической моделью [15].

В данной работе предложен еще один метод инициирования детонации путем выдува высокоскоростной струи инертных микрочастиц в реагирующую газовую смесь.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим одномерный канал, заполненный покоящейся стехиометрической водородовоздушной смесью с начальными параметрами $p_0 = 1$ атм, $T_0 = 300$ К. С левой границы канала осуществляется инъекция монодисперсных химически инертных частиц диоксида кремния SiO_2 диаметром 1, 10, 100 мкм. Объемные концентрации варьируются от 10^{-5} до 10^{-3} , температуры — от 300 до 1 000 К. Скорость частиц изменяется от 0.1 до 1 от скорости Чепмена — Жуге D_{CJ} в водородовоздушной смеси. Анализируются различные режимы течения, которые реализуются при взаимодействии облака частиц с реагирующей газовой смесью. Данные процессы описываются двухскоростной двухтемпературной моделью с постоянным давлением, которая дополнена законами сохранения массы, импульса и энергии, записанными для каждой из фаз, и замыкается термическим и калорическим уравнениями состояния фаз, законами силового и теплового взаимодействия фаз, уравнениями детальной кинетики химических реакций в детонационной волне. Подробно данная модель представлена в [22, 23].

Для описания воспламенения и горения водородовоздушной смеси используется детальная кинетическая схема [24], учитывающая 38 прямых и обратных реакций 9 компонентов. В наших предыдущих исследованиях эта модель позволила описать экспериментально наблюдаемые времена задержки воспламенения водородокислородной смеси [25, 26], рассчитать концентрационные пределы детонации [27, 28] и определить геометрические пределы детонации [22, 29, 30].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Малые скорости инъекции $((0.1 \div 0.5)D_{\text{CJ}})$

Рассмотрим инъекцию частиц диаметром $d = 1, 10$ или 100 мкм, объемной концентрации $m_2 = 10^{-3}$, температуры $T_2 = 300 \div 1000$ К со скоростью инъекции $u_2 = (0.1 \div 0.5)D_{\text{CJ}}$. Здесь $D_{\text{CJ}} = 1934$ м/с — скорость детонации Чепмена — Жуге в водородовоздушной смеси, рассчитанная с использованием данной модели кинетики. Если параметры за образующимися ударными волнами недостаточны для воспламенения смеси, химические реакции за фронтом волны не инициируются. Здесь реализуется режим 1 — распространение слабой ударной волны с давлением за фронтом до 6 атм и температурой газа до 570 К. Данный режим реализован для холодных частиц (температурой $300 \div 600$ К) во всем диапазоне скоростей и диаметров частиц. При скоростях $(0.1 \div 0.2)D_{\text{CJ}}$ режим 1 реализуется при температурах инжектируемых частиц вплоть до 700 К (табл. 1). При увеличении температуры частиц смесь воспламеняется за ударной волной и реализуется режим с инициированием химических реакций. Такой режим, если он не приводит к установлению самоподдерживающейся детонации, обозначим как режим 2.

На рис. 1 представлены распределения па-

Таблица 1

Режимы течения при малых скоростях инъекции частиц

u_2/D_{CJ}	d , мкм	T_2 , К	Режим
0.1	100, 10, 1	300 ÷ 700	Режим 1
		800 ÷ 1000	Режим 2
0.2	100	300 ÷ 700	Режим 1
		800 ÷ 1000	Режим 2
	10, 1	300 ÷ 600	Режим 1
		700 ÷ 1000	Режим 2
0.3 ÷ 0.4	100, 10, 1	300 ÷ 600	Режим 1
		700 ÷ 1000	Режим 2
0.5	100, 10	300 ÷ 600	Режим 1
		700 ÷ 1000	Режим 2
	1	300 ÷ 600	Режим 1
		700	Режим 2
		800 ÷ 1000	Режим 3

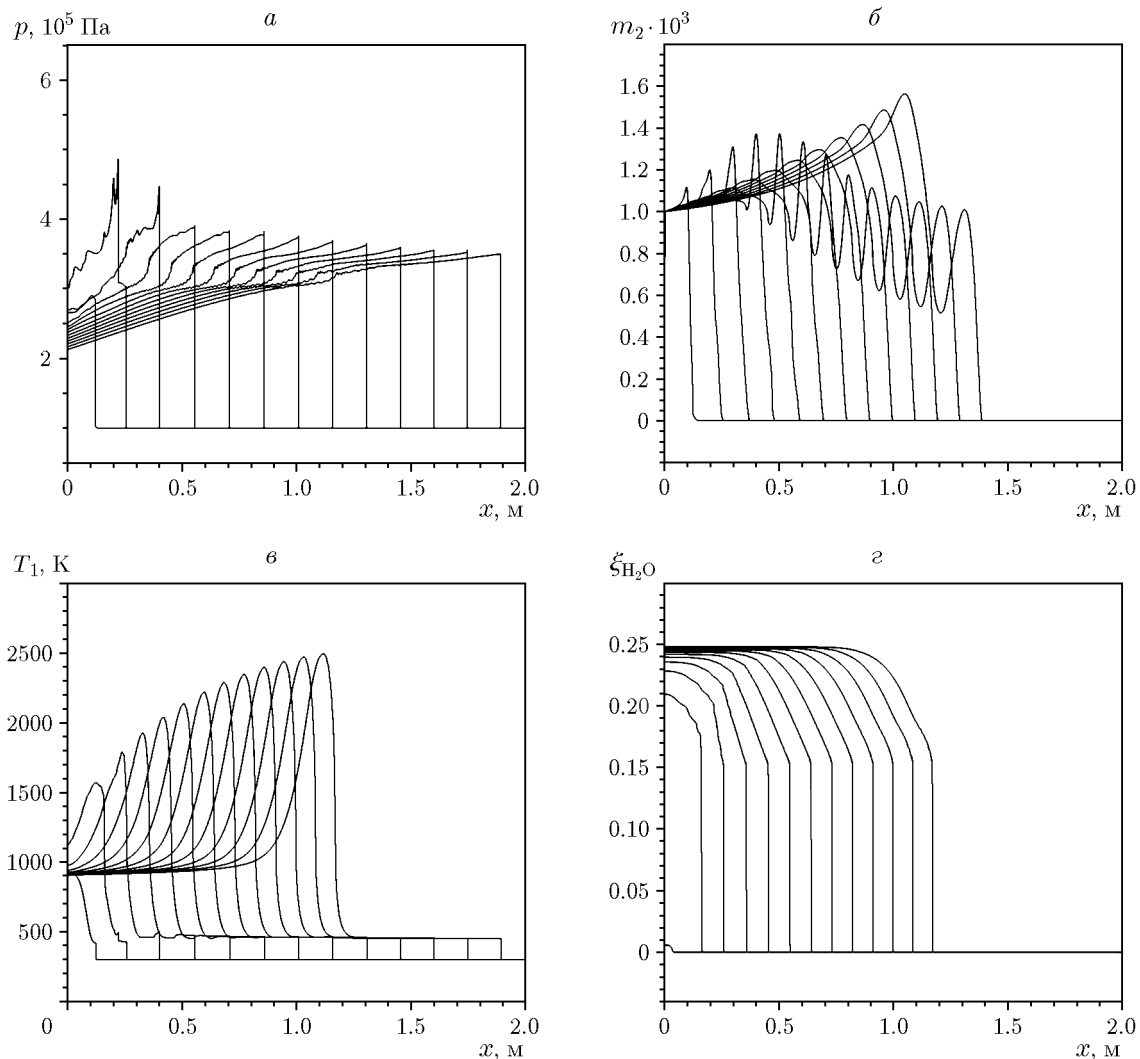


Рис. 1. Распределения давления (*a*), объемной концентрации частиц (*б*), температуры газа (*в*), массовой концентрации водяного пара в канале (*г*). Режим с инициированием химических реакций (параметры струи: $u_2 = 0.3D_{CJ}$, $d = 100$ мкм, $m_2 = 10^{-3}$, $T_2 = 900$ K)

раметров потока в канале при инжекции частиц диаметром 100 мкм и температурой 900 K со скоростью $u_2 = 0.3D_{CJ}$. Распределения построены с шагом $\Delta t = 2 \cdot 10^{-4}$ с, первое распределение соответствует моменту времени $t_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ с после начала инжекции. Из первого, крайнего левого, распределения видно, что формируется ударная волна (рис. 1, *a*) на переднем фронте струи частиц (рис. 1, *б*). По мере распространения данной головной ударной волны за ее фронтом в струе частиц происходит воспламенение смеси с формированием вторичной ударной волны (рис. 1, *a*), температура газа достигает значения 1500 K (рис. 1, *в*), которого достаточно для воспламенения сме-

си. За вторичной ударной волной смесь начинает гореть, и из рис. 1, *г* видно образование продукта реакции (водяного пара) в данной области. При этом не происходит инициирования детонационной волны, из последующих распределений следует, что зона химических реакций отстает от вторичной ударной волны. Последняя, в свою очередь, догоняет головную ударную волну, сливается с ней, и наблюдается распространение затухающей замороженной по химическим реакциям ударной волны. При увеличении скорости инжекции частиц до $u_2 = 0.5D_{CJ}$ и тем самым увеличении энергии, подводимой к газовой смеси, за фронтом головной ударной волны в струе частиц

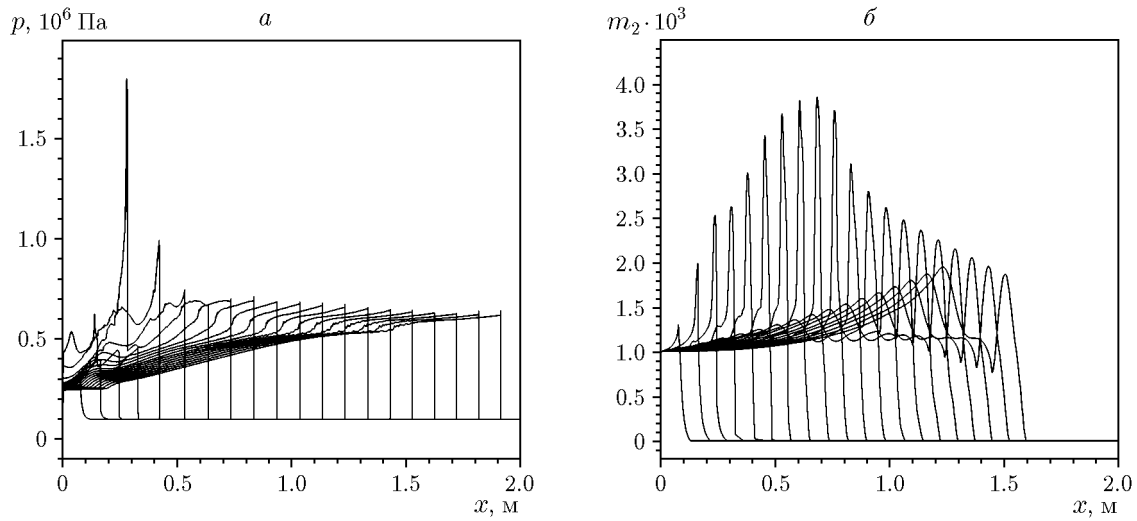


Рис. 2. Распределения давления (а) и объемной концентрации частиц в канале (б). Режим инициирования и срыва детонации (параметры струи: $u_2 = 0.5D_{CJ}$, $d = 100$ мкм, $m_2 = 10^{-3}$, $T_2 = 900$ К)

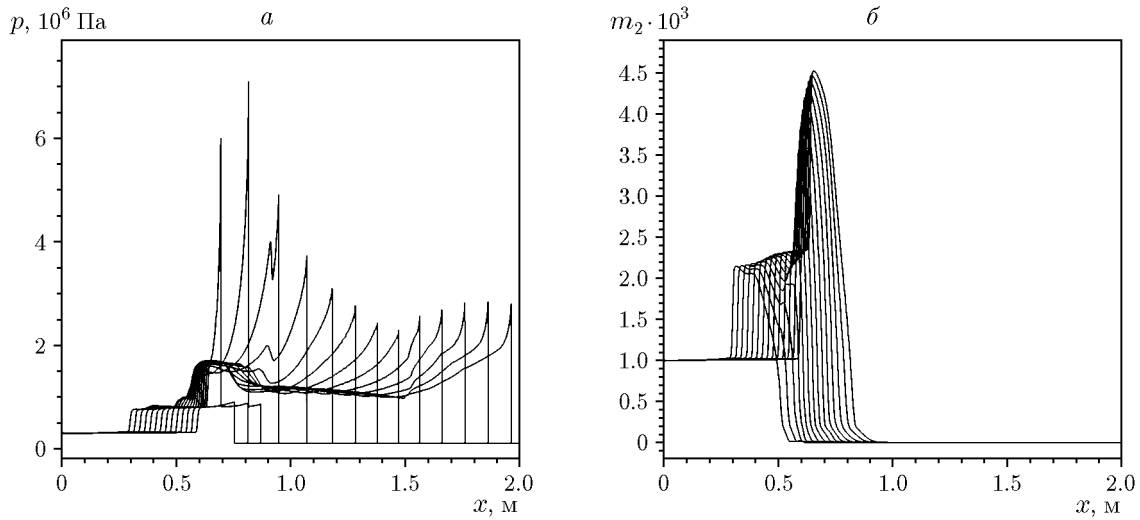


Рис. 3. Распределения давления (а) и объемной концентрации частиц в канале (б). Режим инициирования детонации (параметры струи: $u_2 = 0.5D_{CJ}$, $d = 1$ мкм, $m_2 = 10^{-3}$, $T_2 = 900$ К)

происходят воспламенение смеси и формирование внутренней пересжатой детонационной волны (рис. 2,а). Распределения на рис. 2 построены с шагом $\Delta t = 10^{-4}$ с, первое распределение соответствует моменту времени $t_0 = 10^{-4}$ с после начала инжекции. Таким образом, структура некоторое время является двухфронтной. Однако ввиду того, что концентрация частиц в этой области достигает значения $m_2 = 2.5 \cdot 10^{-3}$ (рис. 2,б), которое существенно превышает критическую концентрацию частиц, приводящую к срыву детонации [27, 30], в дальнейшем происходит срыв детонационной

волны в струе частиц (рис. 2,а). Под срывом детонации, как и в [25, 28], понимается расщепление детонационной волны на замороженную по химическим реакциям ударную волну и отстающий от нее фронт воспламенения и горения. В дальнейшие моменты времени, как и в предыдущем случае, наблюдаются слияние двух ударных волн и распространение затухающей замороженной ударной волны.

Уменьшение диаметра частиц при сохранении неизменными остальных параметров струи ($u_2 = 0.5D_{CJ}$, $m_2 = 10^{-3}$, $T_2 = 900$ К) приводит к увеличению суммарной площади

поверхности частиц в единице объема $S = 6m_2/d$, а также к увеличению площади поперечного сечения частиц в единице объема $S' = 3m_2/2d$. Это увеличивает передачу энергии от частиц к газовой смеси за счет теплообмена и трения по сравнению с более крупными частицами. Данной энергии достаточно для того, чтобы инициировать детонационную волну. На рис. 3 представлены распределения давления газа и объемной концентрации частиц в рассматриваемом случае ($u_2 = 0.5D_{CJ}$, $d = 1$ мкм, $m_2 = 10^{-3}$, $T_2 = 900$ К). Распределения построены с шагом $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ с, первое распределение соответствует моменту времени $t_0 = 7 \cdot 10^{-4}$ с после начала инъекции. Из рис. 3 видно, что на переднем фронте струи частиц происходит инициирование пересжатой детонации с давлением в пике Неймана порядка 63 атм. Данная детонационная волна ослабляется, выходит из струи частиц, догоняет головную ударную волну, сливается с ней, и в дальнейшем наблюдается распространение одной детонационной волны, которая по мере своего распространения выходит на режим Чепмена — Жуге (при $x > 1.5$ м). Таким образом, в данном случае реализуется режим с инициированием и распространением детонационной волны, обозначим его как режим 3.

Высокие скорости инъекции ($(0.6 \div 1.0) D_{CJ}$)

Высокие скорости инъекции частиц, от $0.6D_{CJ}$ до $1.0D_{CJ}$, соответствуют диапазону 1160 ÷ 1934 м/с. Следует отметить, что в экспериментах такие скорости инъекции частиц достижимы, например, при использовании рельсотрона в качестве ускорителя частиц [31]. Режим инициирования и распространения детонации (режим 3) получен для всех рассматриваемых скоростей и диаметров частиц при температурах более 700 К, а при скоростях инъекции $(0.8 \div 1.0)D_{CJ}$ — во всем диапазоне температур 300 ÷ 1 000 К для всех исследуемых диаметров частиц (табл. 2).

Рассмотрим влияние объемной концентрации выдуваемых частиц на реализующиеся режимы. Параметры струи частиц следующие: $u_2 = D_{CJ}$, $d = 100$ мкм, $m_2 = 10^{-4}$, $T_2 = 300$ К. На рис. 4 представлены распределения давления газа и объемной концентрации частиц. Распределения построены с шагом $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ с, первое распределение соответствует моменту времени $t_0 = 1.4 \cdot 10^{-3}$ с после начала инъекции. Видно, что для данных параметров струи

Таблица 2

Режимы течения
при больших скоростях инъекции частиц

u_2/D_{CJ}	d , мкм	T_2 , К	Режим
0.6	100	300 ÷ 600	Режим 1
		700 ÷ 1000	Режим 2
	10, 1	300 ÷ 600	Режим 1
		700 ÷ 1000	Режим 3
0.7	100	300 ÷ 600	Режим 1
		700 ÷ 1000	Режим 3
	10, 1	300 ÷ 1000	Режим 3
0.8 ÷ 1.0	100, 10, 1	300 ÷ 1000	Режим 3

реализуется третий режим течения. При этом происходит инициирование двух расходящихся в разных направлениях пересжатых детонационных волн. Первая детонационная волна движется против потока частиц, концентрации которых меньше критических, поэтому срыва детонации не происходит. Имеет место ослабление детонации и выход на режим устойчивого распространения в неоднородном потоке смеси. Вторая пересжатая детонационная волна, движущаяся в направлении движения частиц, ослабляется в облаке частиц. И хотя концентрации частиц достигают значений больше критического (до 10^{-2}), срыв детонации не успевает произойти ввиду малой протяженности области высокой концентрации частиц (ρ -слоя). Выйдя из облака частиц, детонационная волна догоняет головную ударную волну (при $x \approx 1.45$ м на рис. 4,а), сливается с ней и в дальнейшем распространяется по чистой газовой смеси.

Уменьшим диаметр частиц до $d = 10$ мкм и объемную концентрацию до $m_2 = 10^{-5}$ при сохранении остальных параметров неизменными ($u_2 = D_{CJ}$, $T_2 = 300$ К). На рис. 5 приведены распределения давления газа и объемной концентрации частиц для данного случая. Распределения построены с шагом $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ с, первое распределение соответствует моменту времени $t_0 = 1.45 \cdot 10^{-3}$ с после начала инъекции. Видно, что в первый момент времени происходит инициирование детонационной волны (рис. 5,а, $x \approx 0.6$ м), движущейся к точке инъекции по струе частиц с докритическими объемными концентрациями (рис. 5,б). При этом в направлении движения частиц наблю-

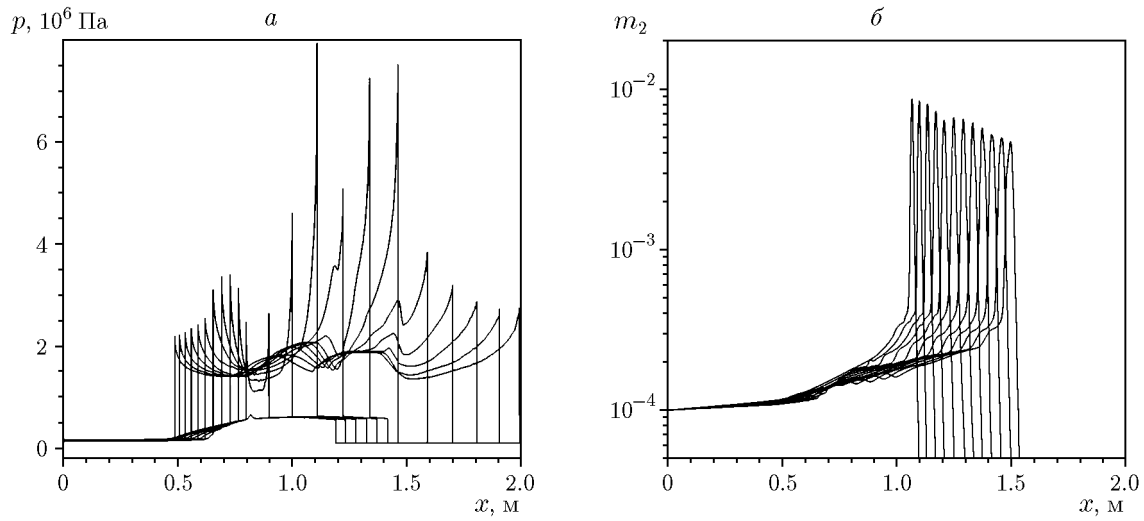


Рис. 4. Распределения давления (а) и объемной концентрации частиц в канале (б). Режим инициирования двух детонационных волн (параметры струи: $u_2 = D_{CJ}$, $d = 100$ мкм, $m_2 = 10^{-4}$, $T_2 = 300$ К)

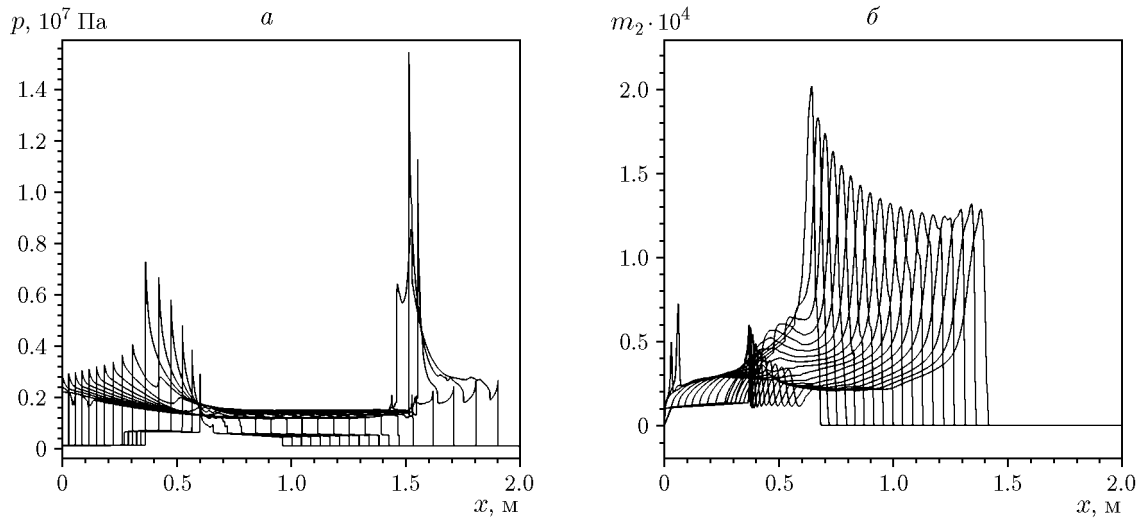


Рис. 5. Распределения давления (а) и объемной концентрации частиц в канале (б). Режим двойного инициирования детонации (параметры струи: $u_2 = D_{CJ}$, $d = 10$ мкм, $m_2 = 10^{-5}$, $T_2 = 300$ К)

дается распространение ударной волны по смеси со сверхкритическими концентрациями частиц. Данная ударная волна выходит из струи частиц (рис. 5, а, $x \approx 1.2$ м), и в зоне за головной ударной волной в момент времени $t = 2.1 \cdot 10^{-3}$ с ($x \approx 1.45$ м) происходит инициирование детонации за фронтом второй ударной волны. В дальнейшие моменты времени происходит слияние детонационной и головной ударной волн ($x \approx 1.55$ м) и идет распространение детонационной волны по чистой газовой смеси. Таким образом, в данном случае реализуется режим с двойным инициированием детонации.

На рис. 6 представлены карты режимов течения при инъекции струи частиц диаметром 1, 10 и 100 мкм с объемной концентрацией $m_2 = 10^{-3}$. Видно, что при скоростях, меньших либо равных $0.6D_{CJ}$, и температурах частиц, меньших либо равных 600 К, наблюдается режим формирования ударной волны без инициирования химических реакций. При увеличении температуры выдуваемых частиц реализуется режим с инициированием горения, возможным инициированием детонации в струе частиц, которая впоследствии в этой струе частиц прерывается. Режим инициирова-

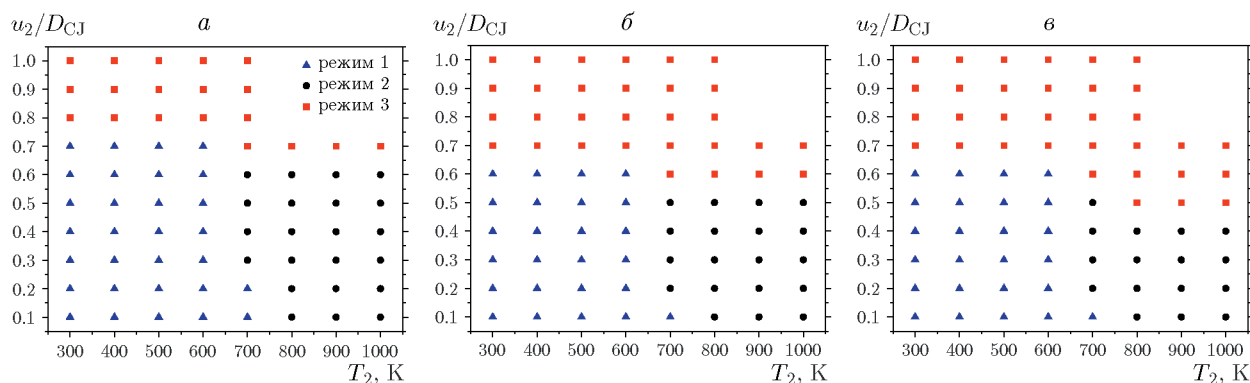


Рис. 6. Карты режимов течения (параметры частиц: $m_2 = 10^{-3}$, $d = 100$ (а), 10 (б), 1 мкм (в))

ния детонации без ее срыва реализуется только при инъекции частиц с высокими скоростями — более $0.6D_{CJ}$. При этом следует отметить, что при увеличении скорости от $0.6D_{CJ}$ до $0.7D_{CJ}$ для частиц диаметром 1 или 10 мкм и от $0.7D_{CJ}$ до $0.8D_{CJ}$ для частиц диаметром 100 мкм наблюдается переход из режима распространения ударной волны без химических реакций (режим 1) сразу в режим инициирования детонации (режим 3), минуя режим распространения ударной волны без инициирования детонации (режим 2). Таким образом, предварительный нагрев частиц способствует инициированию химических реакций горения смеси, а увеличение скорости частиц — инициированию детонационной волны.

ВЫВОДЫ

На основе разработанной ранее математической модели детонационных течений в смесях реагирующих газов и твердых инертных частиц, основанной на детальной кинетике химических реакций в газовой фазе, проведены расчеты инъекции струи инертных частиц диаметром 1, 10, 100 мкм при объемных концентрациях $10^{-5} \div 10^{-3}$ в реагирующую газовую смесь со скоростями $(0.1 \div 1.0)D_{CJ}$.

Установлено, что реализуются следующие режимы течения:

- распространение ударной волны по газовой смеси без инициирования химических реакций при малых скоростях инъекции частиц (менее $0.6D_{CJ}$) и температурах частиц менее 600 К;

- распространение ударной волны с инициированием химических реакций горения смеси либо инициированием детонационной волны, разрушающейся в струе частиц, при малых

скоростях инъекции частиц (менее $0.6D_{CJ}$) и температурах частиц более 600 К;

- инициирование и распространение детонации без срыва при больших скоростях инъекции частиц (более $0.6D_{CJ}$) во всем рассматриваемом диапазоне температур частиц ($300 \div 1000$ К).

При этом выявлено, что предварительный нагрев частиц способствует инициированию химических реакций горения смеси, а увеличение скорости частиц — инициированию детонационной волны.

Показано, что уменьшение концентрации частиц диаметром 100 мкм ниже критического значения приводит к инициированию двух детонационных волн, движущихся в противоположные стороны по струе частиц без срыва. При уменьшении диаметра частиц до 10 мкм реализуется режим с двойным инициированием детонации: первой детонационной волны в струе частиц и второй детонационной волны перед передней границей струи частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А. А. Иницирование газовой детонации при пространственном распределении источников // Физика горения и взрыва. — 1988. — Т. 24, № 2. — С. 118–124.
2. Васильев А. А. Ячеистые структуры многофронтной детонационной волны и инициирование (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 9–30.
3. Vasil'ev A. A., Vasiliev V. A. Initiation and structures of gaseous detonation // AIP Conf. Proc. — 2018. — V. 1939. — 020042. — DOI: 10.1063/1.5027354.
4. Kamenskihs V., Ng H. D., Lee J. H. S. Measurement of critical energy for direct initiation of spherical detonations in stoichiometric high-pressure H_2 - O_2 mixtures // Combust. Flame. —

2010. — V. 157, N 9. — P. 1795–1799. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.02.014.
5. **Zhang B., Ng H. D., Mével R., Lee J. H. S.** Critical energy for direct initiation of spherical detonations in $H_2/N_2O/Ar$ mixtures // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2011. — V. 36, N 9. — P. 5707–5716. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.01.175.
6. **Zhang B., Bai C.** Critical energy of direct detonation initiation in gaseous fuel-oxygen mixtures // *Safety Sci.* — 2013. — V. 53. — P. 153–159. — DOI: 10.1016/j.ssci.2012.09.013.
7. **Efremov V. P., Ivanov M. F., Kiverin A. D., Yakovenko I. S.** Mechanisms of direct detonation initiation via thermal explosion of radiatively heated gas-particles layer // *Results Phys.* — 2015. — V. 5. — P. 290–296. — DOI: 10.1016/j.rinp.2015.10.003.
8. **Bengoechea S., Gray J. A. T., Reiss J., Moeck J. P., Paschereit O. C., Sesterhenn J.** Detonation initiation in pipes with a single obstacle for mixtures of hydrogen and oxygen-enriched air // *Combust. Flame*. — 2018. — V. 198. — P. 290–304. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.09.017.
9. **Xiao H., Oran E. S.** Shock focusing and detonation initiation at a flame front // *Combust. Flame*. — 2019. — V. 203. — P. 397–406. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.02.012.
10. **Фролов С. М., Басевич В. Я., Аксенов В. С., Полихов С. А.** Иницирование газовой детонации бегущим импульсом принудительного зажигания // *Докл. АН. Физ. химия*. — 2004. — Т. 394, № 2. — С. 1–3.
11. **Ivanov M. F., Kiverin A. D., Yakovenko I. S., Liberman M. A.** Hydrogen-oxygen flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in three-dimensional rectangular channels with no-slip walls // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2013. — V. 38, N 36. — P. 16427–16440. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.08.124.
12. **Heidari A., Wen J. X.** Numerical simulation of flame acceleration and deflagration to detonation transition in hydrogen-air mixture // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2014. — V. 39, N 36. — P. 21317–21327. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.10.066.
13. **Azadboni R. K., Wen J. X., Heidari A., Wang C.** Numerical modeling of deflagration to detonation transition in inhomogeneous hydrogen/air mixtures // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2017. — V. 49, Pt B. — P. 722–730. — DOI: 10.1016/j.jlp.2017.04.024.
14. **Vasiljev A. A.** Initiation of gaseous detonation by a high speed body // *Shock Waves*. — 1994. — V. 3. — P. 321–326. — DOI: 10.1007/BF01415830.
15. **Васильев А. А.** Основные результаты исследований детонационного горения газовых смесей, возбуждаемого быстролетящим телом // *Физика горения и взрыва*. — 1997. — Т. 33, № 5. — С. 85–102.
16. **Kaneshige M. J., Shepherd J. E.** Oblique detonation stabilized on a hypervelocity projectile // *Symp. (Int.) Combust.* — 1996. — V. 26, N 2. — P. 3015–3022. — DOI: 10.1016/S0082-0784(96)80145-7.
17. **Kasahara J., Arai T., Chiba S., Takazawa K., Tanahashi Y., Matsuo A.** Criticality for stabilized oblique detonation waves around spherical bodies in acetylene/oxygen/krypton mixtures // *Proc. Combust. Inst.* — 2002. — V. 29, N 2. — P. 2817–2824. — DOI: 10.1016/S1540-7489(02)80344-3.
18. **Maeda S., Sumiya S., Kasahara J., Matsuo A.** Initiation and sustaining mechanisms of stabilized oblique detonation waves around projectiles // *Proc. Combust. Inst.* — 2013. — V. 34, N 2. — P. 1973–1980. — DOI: 10.1016/j.proci.2012.05.035.
19. **Maeda S., Sumiya S., Kasahara J., Matsuo A.** Scale effect of spherical projectiles for stabilization of oblique detonation waves // *Shock Waves*. — 2015. — V. 25, N 2. — P. 141–150. — DOI: 10.1007/s00193-015-0549-4.
20. **Bedarev I., Temerbekov V.** Estimation of the energy of detonation initiation in a hydrogen-oxygen mixture by a high velocity projectile // *Thermal Sci.* — 2021. — V. 25, N 5B. — P. 3889–3897. — DOI: 10.2298/TSCI210115180B.
21. **Бедарев И. А., Темербеков В. М., Федоров А. В.** Моделирование режимов наклонных детонационных волн, возникающих при инициировании детонации снарядом малого диаметра // *Теплофизика и аэромеханика*. — 2019. — Т. 26, № 1. — С. 63–73.
22. **Федоров А. В., Тропин Д. А.** Моделирование прохождения детонационной волны через облако частиц в двухскоростной двухтемпературной постановке // *Физика горения и взрыва*. — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 61–70.
23. **Tropin D. A., Bochenkov E. S.** Influence of inert particles on the ignition processes of hydrogen-silan-air mixtures // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2020. — V. 45, N 35. — P. 17953–17960. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.220.
24. **Tien J. H., Stalker R. J.** Release of chemical energy by combustion in a supersonic mixing layer of hydrogen and air // *Combust. Flame*. — 2002. — V. 131, N 3. — P. 329–348. — DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00371-1.
25. **Федоров А. В., Тропин Д. А., Бедарев И. А.** Математическое моделирование подавления детонации водородокислородной смеси инертными частицами // *Физика горения и взрыва*. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 103–115.
26. **Бедарев И. А., Федоров А. В.** Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // *Физика горения и взрыва*. — 2006. — Т. 42, № 1. — С. 26–33.
27. **Tropin D. A., Bedarev I. A.** Problems of detonation wave suppression in hydrogen-air mix-

- tures by clouds of inert particles in one- and two-dimensional formulation // Combust. Sci. Technol. — 2021. — V. 193, N 2. — P. 197–210. — DOI: 10.1080/00102202.2020.1763323.
28. **Tropin D., Fedorov A.** Physical and mathematical modeling of interaction of detonation waves in mixtures of hydrogen, methane, silane, and oxidizer with clouds of inert micro- and nanoparticles // Combust. Sci. Technol. — 2019. — V. 191, N 2. — P. 275–283. — DOI: 10.1080/00102202.2018.1459584.
29. **Федоров А. В., Тропин Д. А.** Определение критического размера облака частиц, необходимого для подавления газовой детонации // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 100–108.
30. **Tropin D. A.** Numerical modeling of suppression of detonation waves in hydrogen-air mixture by system of inert particles clouds // Int. J. Hydrogen Energy. — 2022. — V. 47, N 66. — P. 28699–28709. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.169.
31. **Yadrenkin M. A., Tyustin R. E.** Features of high-speed microparticles flow accelerated by railgun // XXI Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022), (8–14 Aug. 2022, Novosibirsk): Abstr. — Novosibirsk: SB RAS, 2022. — Pt I. — P. 210–211. — DOI: 10.53954/9785604788967_210.

Поступила в редакцию 13.12.2022.

После доработки 16.02.2023.

Принята к публикации 01.03.2023.
