

УДК 662.612:32

# ОСЛАБЛЕНИЕ И ПОДАВЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ ОБЛАКАМИ ИНЕРТНЫХ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ

Д. А. Тропин, А. В. Фёдоров

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

Предложены физико-математические модели для описания процессов распространения, ослабления и подавления детонации в смесях водород — кислород, метан — кислород и силан — воздух с инертными микро- и наночастицами. На основе этих моделей найдены зависимости дефицита скорости детонации от размера и концентрации инертных микро- и наночастиц. Выявлены три типа детонационных течений в газозвесах реагирующих газов и инертных наночастиц: стационарное распространение ослабленной детонационной волны в газозвеси, распространение галопирующей детонационной волны вблизи концентрационного предела, разрушение детонационного процесса. Определено, что механизмы подавления детонации микро- и наночастицами близки и заключаются в распаде детонационной волны на ослабляющуюся замороженную ударную волну и отстающий фронт воспламенения и горения. Концентрационные пределы детонации в рассматриваемых реагирующих газовых смесях с частицами диаметром от 10 нм до 1 мкм также сопоставимы. Оказалось, что при переходе от микрочастиц к наночастицам эффективность подавления детонации не увеличивается.

Ключевые слова: подавление детонации, смеси водорода, метана и силана, детальная химическая кинетика, математическое моделирование, газозвесь.

DOI 10.15372/FGV20180209

## ВВЕДЕНИЕ

Добавление инертных частиц в реагирующие газовые смеси — один из способов модификации и контроля процессов горения и детонации в таких смесях. Так, например, добавление химически инертных микрочастиц приводит к уменьшению скорости детонации [1–3], изменению длины зоны химических реакций в детонационных волнах (ДВ) [4]. В работах [5, 6] были определены концентрационные пределы детонации в смесях водород — кислород, метан — кислород и метан — водород — кислород при подавлении ДВ облаками инертных микрочастиц, а также установлено, что более мелкие частицы эффективнее подавляют детонацию. В работах [7, 8] показано, что добавление инертных микрочастиц разрушает ячеистую структуру ДВ в некоторой модельной смеси. В [9] аналитически рассчитаны зависимости размера ячейки ДВ в стехиометри-

ческой силановоздушной смеси с микрочастицами  $Al_2O_3$  и выявлено, что увеличение массовой доли частиц в смеси приводит к увеличению размера ячейки. В [10, 11] представлена математическая модель механики гетерогенной среды (водородокислородная смесь с инертными частицами) с учетом приведенной кинетики, которая удовлетворительно описывает экспериментальные данные [12] по ослаблению детонационных течений в данной смеси газов.

Таким образом, процессы взаимодействия ДВ с облаками инертных микрочастиц получили свое описание в одномерном нестационарном приближении механики гетерогенных сред. В данной работе проведены дальнейшие расчетные исследования взаимодействия ДВ в смесях водород — кислород, метан — кислород и силан — воздух с облаками инертных наночастиц  $SiO_2$ , а также в силановоздушной смеси с облаками микрочастиц  $SiO_2$ .

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим ударную трубу, заполненную газовой смесью водорода, метана, силана и

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00010), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 15-08-01947-а, 16-08-00778-а).

© Тропин Д. А., Фёдоров А. В., 2018.

кислорода, а также облаком инертных микро- и наночастиц SiO<sub>2</sub> (диаметром от 10 нм до 100 мкм), расположенным в камере низкого давления на некотором расстоянии от мембраны, разделяющей камеры высокого и низкого давления. После разрыва диафрагмы в камере низкого давления происходит инициирование ДВ, которая до начала взаимодействия с облаком распространяется в режиме Чепмена — Жуге. Математическая модель механики реагирующей смеси газов и инертных микро- и наночастиц представляет собой систему уравнений динамики неравновесной смеси газа и твердых частиц и имеет вид, представленный в наших работах [5, 6, 13–15].

Для очень мелких частиц, размер которых становится сравнимым со средней длиной свободного пробега молекул газа, в выражение для силы сопротивления необходимо ввести поправку Каннингема:

$$C_C = 1 + \frac{2\lambda}{d} \left[ 1.257 + 0.4 \exp \left( -\frac{1.1d}{2\lambda} \right) \right],$$

где  $d$  — диаметр частиц,  $\lambda = k_B T / (\sqrt{2} \pi d_g^2 p)$  — средняя длина свободного пробега молекул газа,  $p$ ,  $T$  — давление и температура газа,  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $d_g$  — диаметр молекул окружающего газа. Сила сопротивления в этом случае имеет вид

$$f = \frac{3m_2\rho_{11}}{4d} \frac{C_D}{C_C} |u_1 - u_2|(u_1 - u_2),$$

где  $C_D$  — коэффициент сопротивления,  $m_2$  — объемная концентрация частиц,  $\rho_{11}$  — истинная плотность газовой смеси,  $u_1$ ,  $u_2$  — скорость газовой смеси и частиц соответственно.

Оценим поправку Каннингема в рассматриваемых нами течениях. Длина свободного пробега молекул газа изменяется в диапазоне  $\lambda \in [7.3 \cdot 10^{-9}, 1.2 \cdot 10^{-7}]$  м, где наименьшее значение соответствует длине свободного пробега молекул вблизи пика Неймана детонационной волны в водородокислородной смеси, наибольшее значение — невозмущенному потоку перед фронтом ДВ в силановоздушной смеси. Таким образом, число Кнудсена меняется в диапазоне  $\text{Kn} \in [7.3 \cdot 10^{-5}, 12]$ , где наименьшее значение соответствует течению вблизи пика Неймана детонационной волны в водородокислородной смеси с частицами диаметром 100 мкм, наибольшее — невозмущенному течению перед фронтом ДВ в силановоздушной

смеси с частицами диаметром 10 нм. Этот диапазон чисел Кнудсена соответствует значениям поправки Каннингема, лежащей в диапазоне  $C_C \in [1, 35]$ . Здесь также максимальное значение поправки Каннингема ( $C_C = 35$ ) соответствует невозмущенному течению перед фронтом ДВ, в котором и газ, и частицы покоятся и сила сопротивления равна нулю. Интерес представляет область течения в структуре ДВ, в которой скорости газовой смеси и частиц различаются. В таком течении в газозвесах микро- и наночастиц ( $d = 1 \div 100$  мкм) поправка Каннингема изменяется от  $C_C = 1$  ( $d = 10 \div 100$  мкм) до значения 1.2 ( $d = 1$  мкм), в газозвесах с наночастицами поправка Каннингема монотонно увеличивается до значений  $C_C \approx 9 \div 13$  в зависимости от типа топлива (водород, метан, силан) в реагирующей газовой смеси.

Следует отметить, что для микро- и наночастиц диаметром  $d = 1 \div 100$  мкм во всех рассматриваемых реагирующих газовых смесях во всей области течения реализуется континуальный режим обтекания, для наночастиц диаметром  $10 \div 100$  нм — переходный режим, для частиц диаметром менее 10 нм — свободномолекулярный режим [16].

Характерное время тепловой релаксации  $\tau_T$  для наноразмерных частиц определяется соответственно изменению режима обтекания частиц с континуального к свободномолекулярному [17]. В континуальном режиме обтекания (при  $\text{Kn} = \lambda/d < 0.01$ )  $\tau_T^{\text{cont}} = d^2 \rho_{22} c_{v2} / 6 \lambda_1 \text{Nu}$ , в свободномолекулярном (при  $\text{Kn} > 10$ ) [18] —

$$\tau_T^{\text{fm}} = \frac{\rho_{22} c_{p2} d}{6 \alpha p} \sqrt{\frac{8 \pi \mu T}{R}} \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right). \text{ Здесь } \rho_{22}, c_{p2} \text{ — истинная плотность и теплоемкость частиц, } \mu \text{ — молярная масса окружающего газа, } \alpha \text{ — коэффициент аккомодации. В диапазоне } \text{Kn} = 0.01 \div 10 \text{ режим обтекания является переходным [17], здесь будем применять аппроксимацию вида } \tau_T^{\text{tr}} = [(\log \text{Kn} + 2) \tau_T^{\text{fm}} + (1 - \log \text{Kn}) \tau_T^{\text{cont}}] / 3 \text{ [16].}$$

Для описания химических превращений в реагирующей газовой смеси будем использовать следующие модели детальной кинетики.

Водородокислородная смесь — модель [6, 19, 20], учитывающая 38 реакций для 8 компонентов. Ранее с использованием этой модели нам удалось описать экспериментально наблюдаемое время задержки воспламенения водородокислородной смеси [19, 21], рассчитать концентрационные пределы детонации [1, 2, 6, 21],

определить геометрические пределы детонации [6, 22].

Метанокислородная смесь — модель [5, 23], учитывающая 92 реакции для 15 компонентов. С помощью этой модели мы описали экспериментально наблюдаемое время задержки воспламенения смеси метан — кислород и концентрационные пределы детонации в смесях метан — кислород и метан — водород — кислород [5].

Силановоздушная смесь — модель [13, 24]. С помощью данной модели нами ранее были описаны структура ДВ в силановоздушной смеси [13], время задержки воспламенения смесей силан — кислород и силан — воздух [9, 13], силан — водород [25], пределы воспламенения смесей силан — кислород и силан — воздух [26]. Физико-математическая постановка задачи соответствовала задаче о распаде разрыва в газозвеси инертных частиц и какой-либо смеси реагирующих газов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ. ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ НА СКОРОСТЬ ДВ

Для начала рассмотрим распространение, ослабление и подавление ДВ в водородокислородной смеси с инертными наночастицами. На рис. 1 представлена зависимость дефицита скорости детонации ( $\eta = D/D_{CJ}$ , где  $D$  — скорость детонации в смеси газа и частиц,  $D_{CJ}$  — скорость детонации Чепмена — Жуке) от объемной концентрации инертных частиц  $m_2$  диаметром от 10 нм до 100 мкм. Данные о микрочастицах взяты из [6]. Из рис. 1 видно, что дефицит скорости детонации в случае распространения ДВ в частицах диаметром 10 ÷ 100 мкм уменьшается до значения  $\eta = 0.75$ , после чего происходят срыв и подавление ДВ. В то же время в газозвеси с частицами диаметром 1 мкм дефицит скорости детонации также уменьшается до  $\eta = 0.75$ , а затем стационарный режим распространения ДВ сменяется режимом, схожим с галолирующим, который существует вплоть до  $\eta = 0.45$ . После этих значений при увеличении объемной концентрации частиц наблюдаются срыв и подавление детонации. В газозвеси с наночастицами ( $d = 10 \div 100$  нм) стационарный режим распространения ослабленной ДВ наблюдается до  $\eta = 0.45$ . Известно, что галолирующая детонация — это регулярно повторяющийся пульсирующий процесс [27, 28]: пересжатая ДВ зату-

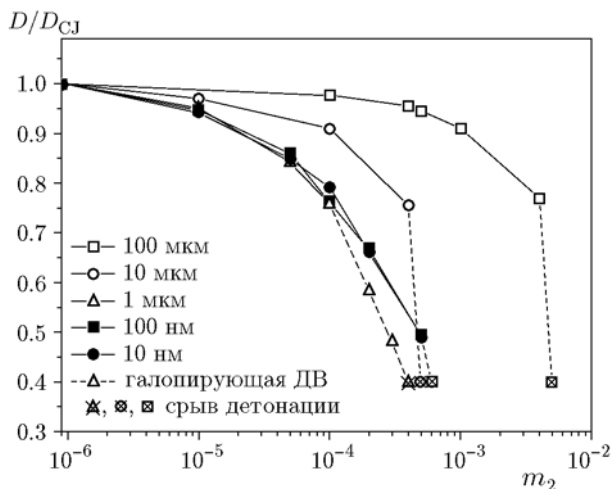


Рис. 1. Зависимость дефицита скорости детонационной волны в стехиометрической водородокислородной смеси от объемной концентрации инертных частиц. Сравнение эффективности ослабления и подавления ДВ микро- и наночастицами

хает, фронт воспламенения и горения отстает от замороженной ударной волны (УВ), за фронтом замороженной УВ в непрореагировавшем газе происходит инициирование вторичной ДВ (взрыв во взрыве), которая догоняет замороженную УВ с формированием вновь пересжатой ДВ, далее процесс повторяется. Для иллюстрации наблюдаемого нами в газозвеси реагирующих газов и инертных частиц галолирующего режима детонации на рис. 2, а показаны распределения давления в ударной трубе, заполненной водородокислородной смесью с частицами  $\text{SiO}_2$  диаметром 1 мкм при их объемной концентрации  $m_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ . Видно, что в газозвеси режим распространения детонации носит периодический характер: подавление детонации с распространением затухающей УВ и последующее реиницирование детонации. На рис. 2, б показаны распределения давления и концентрации радикала ОН сразу после входа ДВ в облако частиц, т. е. в первый период распространения галолирующей детонации. Видно, что ДВ после входа в облако частиц расщепляется на затухающую замороженную УВ и фронт воспламенения и горения, передняя граница которого определяется появлением в смеси радикалов ОН и который до некоторого момента времени отстает от фронта замороженной УВ. После этого момента в непрореагировавшей смеси газов за фронтом заморожен-

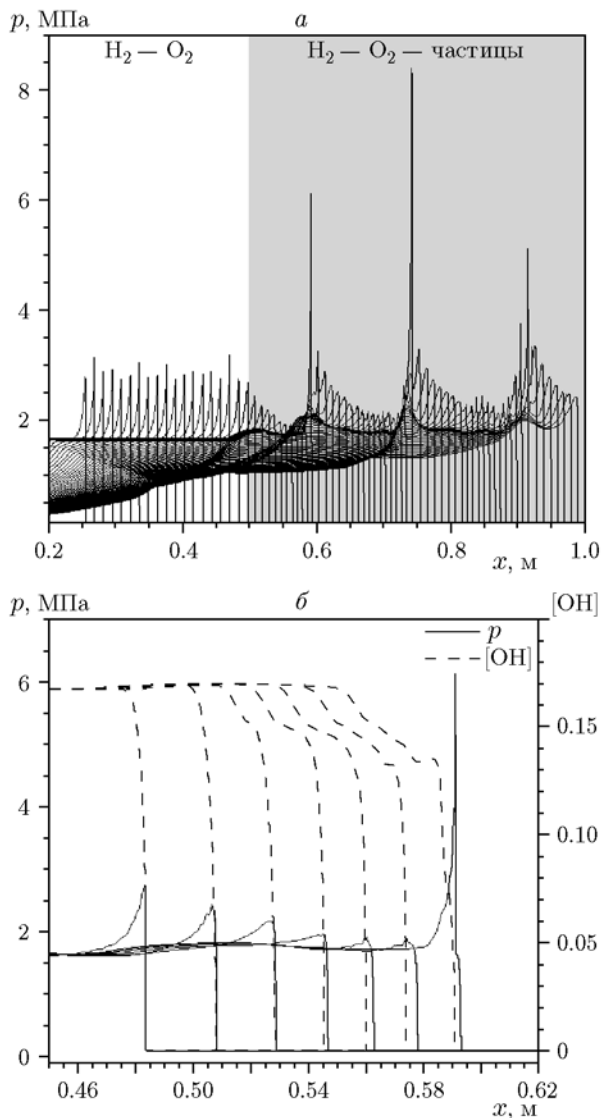


Рис. 2. Распределения давления газа (а) и давления газа и концентрации радикалов ОН (б) в ударной трубе. Галопирующий детонационный режим

ной УВ инициируется воспламенение и горение газовой смеси, фронт воспламенения и горения начинает догонять замороженную УВ и при их слиянии наблюдается реиницирование детонации. Отметим, что в чистой метанохлоридной смеси в экспериментах [27] минимальная протяженность пульсаций (галопа) наблюдалась при давлении 0.07 атм и составляла 2.2 м. В наших расчетах в газозвеси водород — кислород при давлении 1 атм с инертными частицами диаметром 1 мкм протяженность пульсаций (галопа) составила 15 см. Также видно, что дефицит скорости детонации в облаке на-

частиц больше дефицита скорости детонации в облаке микрочастиц диаметром 1 мкм при объемных концентрациях  $m_2 > 2 \cdot 10^{-4}$ . Это вызвано тем, что в этой области в газозвеси наночастиц происходит стационарное распространение ослабленной ДВ, а в газозвеси микрочастиц диаметром 1 мкм наблюдается галопирующий режим детонации и дефицит скорости детонации считается как среднее по периоду пульсаций (амплитуда изменения скорости ДВ за один период пульсаций составляет 25 % от среднего значения).

Таким образом, для всех рассматриваемых размеров частиц существуют два общих режима течения: 1) стационарное распространение ослабленной ДВ со скоростью  $D$ , меньшей  $D_{СД}$  (рис. 3, а); 2) подавление ДВ (рис. 3, б). А для частиц диаметром 1 мкм при концентрациях, близких к предельным, наблюдается галопирующий режим распространения детонации. Возможные типы детонационных течений в газозвесах реагирующих газов и инертных микрочастиц, а также сценарий подавления ДВ микрочастицами подробно описаны в работах [1, 2, 21]. В этих работах, а также в [29, 30] под подавлением подразумевается распад ДВ на замороженную УВ и отстающий от нее фронт воспламенения и горения. В случае подавления ДВ наночастицами также наблюдается распад ДВ на замороженную УВ и отстающий от нее фронт воспламенения и горения. То есть механизмы подавления детонации микро- и наночастицами в этом смысле близки.

Кроме того, следует отметить, что концентрационные пределы детонации, т. е. минимальные объемные концентрации инертных частиц, подавляющих ДВ, в водородокислородной смеси близки для частиц диаметрами 10 нм, 100 нм, 1 мкм, 10 мкм. Для обеих нанометровых частиц их критическая (минимальная) объемная концентрация равна  $m_2^* = 6 \cdot 10^{-4}$ , для  $d = 1$  мкм —  $m_2^* = 4 \cdot 10^{-4}$ , для  $d = 10$  мкм —  $m_2^* = 5 \cdot 10^{-4}$ . Таким образом, видно, что при переходе от микрочастиц к наночастицам эффективность подавления детонации не возрастает. В наших предыдущих работах [6, 15], а также в [7] было показано существование двух типов детонационных течений в газозвесах реагирующих газов и инертных частиц — замороженное (при  $d > 100$  мкм) и равновесное (при  $d < 1$  мкм) с непрерывным переходом между ними. Оказалось, что при уменьшении диаметра частиц менее 1 мкм при постоянной объем-

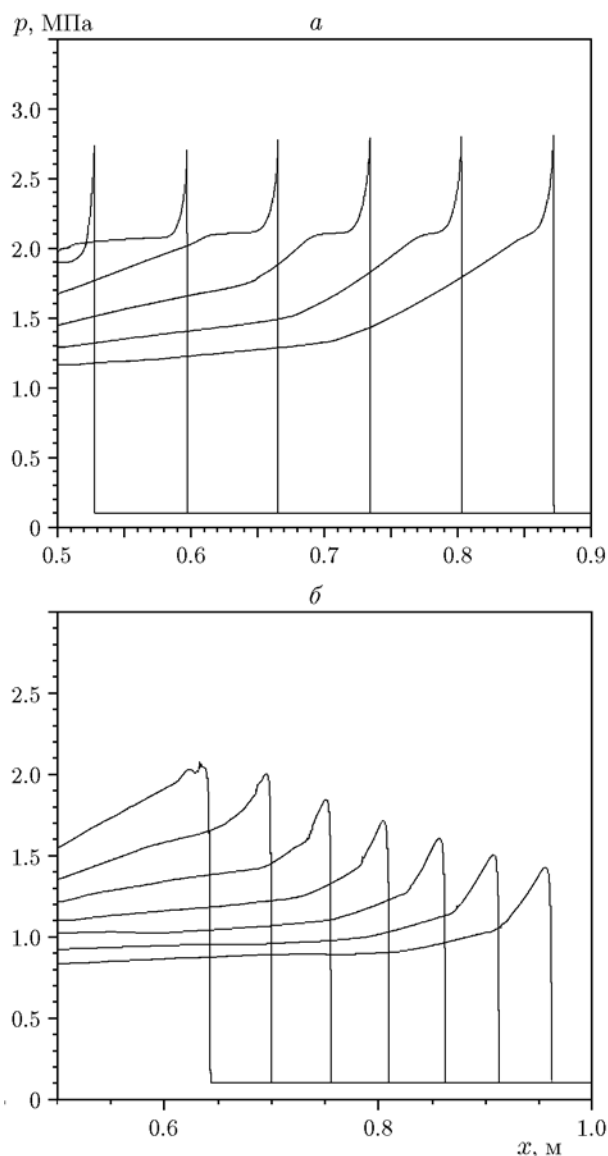


Рис. 3. Стационарное распространение ослабленной детонационной волны (а) и ее подавление (б) в газозвеси водород — кислород — инертные частицы

ной концентрации частиц скорость детонации практически не меняется, выходит на асимптотическое значение. То же самое наблюдается на рис. 1, 4, 5 при  $d = 10$  нм, 100 нм, 1 мкм: все зависимости вдали от концентрационного предела практически накладываются друг на друга.

На рис. 4 представлены зависимости дефицита скорости детонации в стехиометрической метанокислородной смеси от объемной концентрации инертных частиц диаметром от 10 нм до 100 мкм. Данные для микро-

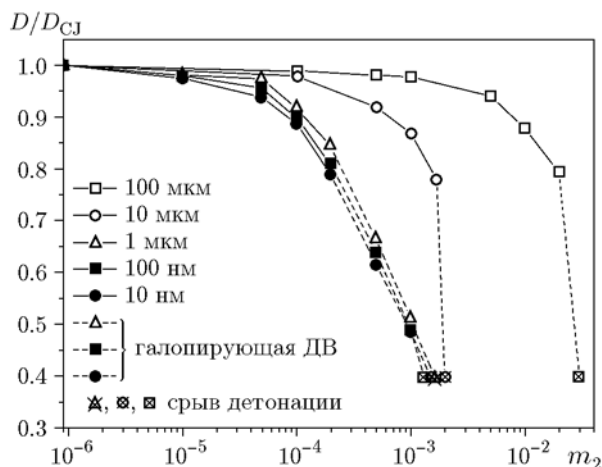


Рис. 4. Зависимость дефицита скорости детонационной волны в стехиометрической метанокислородной смеси от объемной концентрации инертных частиц. Сравнение эффективности ослабления и подавления ДВ микро- и наночастицами

из [5]. Все описанные выше режимы течения в водородокислородной смеси сохраняются и в метанокислородной смеси: распространение ослабленной ДВ; подавление детонации в газозвесах с частицами всех рассматриваемых диаметров; существование галолирующей детонации в газозвесах частиц диаметром от 10 нм до 1 мкм вблизи концентрационного предела. Переход от стационарного распространения ослабленной ДВ к галолирующему режиму наблюдается при объемной концентрации частиц всех трех диаметров, равной  $m_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ . Протяженность пульсаций (галопа) составила 7.6 см при  $d = 1$  мкм, 4 см при  $d = 100$  нм, 1.3 см при  $d = 10$  нм. В метанокислородной смеси, так же как и в водородокислородной, уменьшение диаметра частиц менее 1 мкм не приводит к увеличению эффективности подавления детонации: зависимости дефицита скорости детонации в газозвесах частиц диаметром от 10 нм до 1 мкм идут практически друг по другу. Кроме того, близкими оказались критические объемные концентрации инертных частиц диаметром от 10 нм до 10 мкм:  $m_2^* = 1.5 \cdot 10^{-3}$  при  $d = 10$  нм,  $m_2^* = 1.3 \cdot 10^{-3}$  при  $d = 100$  нм,  $m_2^* = 1.8 \cdot 10^{-3}$  при  $d = 1$  мкм,  $m_2^* = 2 \cdot 10^{-3}$  при  $d = 10$  мкм.

На рис. 5 представлены зависимости дефицита скорости детонации в стехиометрической силановоздушной смеси от объемной концентрации инертных частиц диаметром от 10 нм

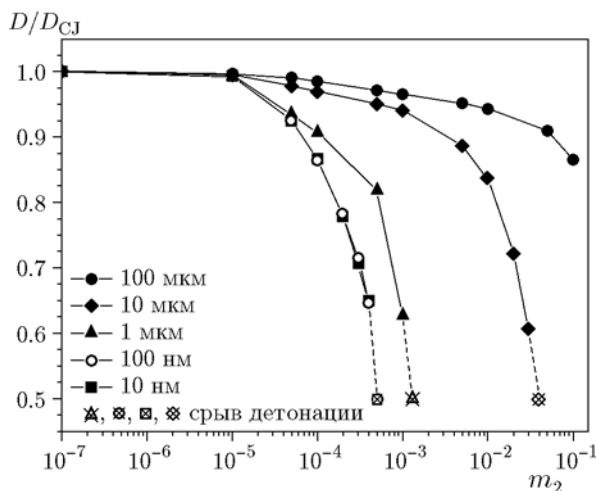


Рис. 5. Зависимость дефицита скорости детонационной волны в стехиометрической силановоздушной смеси от объемной концентрации инертных частиц. Сравнение эффективности ослабления и подавления ДВ микро- и наночастицами

до 100 мкм. В силановоздушной смеси, в отличие от двух предыдущих, реализуются только два режима течения: распространение ослабленной ДВ по газозвеси и подавление ДВ. Галолирующих режимов распространения ДВ не наблюдалось. Также эффективность подавления ДВ в силановоздушной смеси инертными частицами намного ниже, чем в водородо- и метаноокислородной смесях. Дефицит скорости детонации в силановоздушной смеси уменьшается намного медленнее с увеличением концентрации частиц по сравнению с водородо- и метаноокислородной смесями. Кроме того, в силановоздушной смеси при уменьшении диаметра частиц от 1 мкм до 100 нм эффективность подавления детонации увеличивается. При дальнейшем уменьшении диаметра частиц эффективность подавления практически не меняется. Критические объемные концентрации инертных частиц, подавляющих ДВ в силановоздушной смеси, следующие:  $m_2^* = 5 \cdot 10^{-4}$  при  $d = 10$  нм,  $m_2^* = 5 \cdot 10^{-4}$  при  $d = 100$  нм,  $m_2^* = 1.5 \cdot 10^{-3}$  при  $d = 1$  мкм,  $m_2^* = 4 \cdot 10^{-2}$  при  $d = 10$  мкм. Кроме того, в смесях с наночастицами пределы детонации (критические объемные концентрации инертных частиц, которые подавляют детонацию) близки в силановоздушной и водородокислородной смесях.

## ВЫВОДЫ

Предложены физико-математические мо-

дели для описания процессов распространения, ослабления и подавления детонации в смесях водород — кислород, метан — кислород и силан — воздух инертными микро- и наночастицами. На их основе найдены зависимости дефицита скорости детонации от размера и концентрации инертных микро- и наночастиц.

Выявлено, что в газозвесах с наночастицами существуют те же типы детонационных течений, что и в газозвесах микрочастиц: 1) стационарное распространение ослабленной ДВ при скоростях, меньших скорости Чепмена — Жуге; 2) подавление ДВ. Кроме того, в газозвесах водород — кислород с частицами диаметром 1 мкм и метан — кислород с частицами диаметром от 10 нм до 1 мкм вблизи концентрационного предела реализуется галолирующий режим распространения ДВ, который отсутствует в силановоздушной смеси.

Показано, что в случае подавления ДВ наночастицами также наблюдается распад ДВ на замороженную УВ и отстающий от нее фронт воспламенения и горения, т. е. механизмы подавления детонации микро- и наночастицами близки.

Рассчитаны концентрационные пределы детонации. Показано, что пределы детонации в рассматриваемых реагирующих газовых смесях близки для частиц диаметром от 10 нм до 1 мкм. Определено, что уменьшение диаметра частиц менее 1 мкм в водородо- и метаноокислородной смесях и менее 100 нм в силановоздушной смеси не приводит к увеличению эффективности подавления детонации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Fedorov A. V., Fomin P. A., Fomin V. M., Tropin D. A., Chen J.-R. Mathematical Analysis of Detonation Suppression by Inert Particles. — Kaohsiung, Taiwan: Kao Tech Publ., 2012.
2. Федоров А. В., Фомин П. А., Фомин В. М., Тропин Д. А., Чен Дж.-Р. Физико-математическое моделирование подавления детонации облаками мелких частиц. — Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2011.
3. Фомин П. А., Чен Дж.-Р. Влияние химически инертных частиц на параметры и подавление детонации в газах // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 3. — С. 77–88.
4. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М. Влияние твердых инертных частиц на детонацию горючей газовой смеси // Физика горения и взрыва. — 1975. — Т. 11, № 6. — С. 909–914.

5. Тропин Д. А., Федоров А. В. Физико-математическое моделирование подавления детонации инертными частицами в смесях метан — кислород и метан — водород — кислород // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 5. — С. 48–52.
6. 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.
7. Papalexandris M. V. Numerical simulation of detonations in mixtures of gases and solid particles // J. Fluid Mech. — 2004. — V. 507. — P. 95–142.
8. Shafiee H., Djavarehshkian M. H. CFD simulation of particles effects on characteristics of detonation // Intern. J. Computer Theory Eng. — 2014. — V. 6, N 6. — P. 466–471.
9. Федоров А. В., Фомин П. А., Тропин Д. А., Чен Д. Р. Моделирование опасности взрыва и смягчение его последствий в силановоздушных смесях // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 9-10. — С. 108–125.
10. Fedorov A. V., Fomin V. M. Detonation of gas mixtures with inert solid particles / IUTAM Symp. on Combustion in Supersonic Flows. — Kluwer Acad. Publ., 1997. — P. 147–191.
11. Казаков Ю. В., Миронов Ю. В., Федоров А. В. Расчет детонации газовой смеси при наличии инертных твердых частиц // Моделирование в механике. — 1991. — Т. 5 (22), № 3. — С. 152.
12. Wolinski M., Wolanski P. Gaseous detonation processes in presence of inert particles // Arch. Combust. — 1987. — V. 7, N 3/4. — P. 353–370.
13. Тропин Д. А., Федоров А. В. Физико-математическое моделирование воспламенения и горения силана в проходящих и отраженных ударных волнах // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 4. — С. 37–45.
14. Казаков Ю. В., Федоров А. В., Фомин В. М. Детонационная динамика газозвесей. — Новосибирск, 1987. — (Препринт / АН СССР. Сиб. отд-ние. ИТПМ; № 23-87).
15. Казаков Ю. В., Федоров А. В., Фомин В. М. Режимы нормальной детонации в релаксирующих средах // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 1. — С. 119–127.
16. Хмель Т. А., Федоров А. В. Физико-математическая модель детонации газозвеси микро и наночастиц алюминия // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016): сб. тр. IX Всерос. науч. конф., посвященной 55-летию полета Ю. А. Гагарина (Томск, 21–25 сент. 2016 г.). — С. 108–110.
17. Сандарам Д., Янг В., Зарко В. Е. Горение наночастиц алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 2. — С. 37–63.
18. Filippov A. V., Rosner D. E. Energy transfer between an aerosol particle and gas at high temperature ratios in the Knudsen transition regime // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 2000. — V. 43, N 1. — P. 127–138.
19. Бедарев И. А., Федоров А. В. Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 1. — С. 26–33.
20. Tien J. H., Stalker R. J. Release of chemical energy by combustion in a supersonic mixing layer of hydrogen and air // Combust. Flame. — 2002. — N 130. — P. 329–348.
21. 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.
22. 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.
23. Вестбрук Ч., Уртьев П. Применение химической кинетики для определения критических параметров газовой детонации // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 6. — С. 65–76.
24. Britten J. A., Tong J., Westbrook C. K. A numerical study of silane combustion // Twenty-Third Symp. (Intern.) on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1990. — P. 195–202.
25. Тропин Д. А., Федоров А. В. Воспламенение двухтопливной смеси водород/силан в воздухе // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 1. — С. 3–10.
26. Тропин Д. А., Федоров А. В. Расчет пределов воспламенения смесей силан — кислород и силан — воздух // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 46–51.
27. Ульяницкий В. Ю. Исследование галолирующего режима газовой детонации // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 1. — С. 118–124.
28. Николаев Ю. А., Васильев А. А., Ульяницкий В. Ю. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 4. — С. 22–54.
29. Teodorczyk A. Mitigation of gaseous detonations // 11th Intern. Symp. on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (11th ISHPMIE) (China, Dalian, 24–29 July 2016): Proc. — Dalian, 2016. — P. 55–64.
30. Gelfand V. E. Breakup phenomena in flows with velocity lag // Prog. Energy Combust. Sci. — 1996. — V. 22. — P. 201–265.

Поступила в редакцию 21/IV 2017 г.