

УДК 662.612:32

# ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНЫХ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В СИЛАНОВОДОРОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

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

Проведено физико-математическое моделирование взаимодействия детонационных волн в композитных смесях силан/водород с облаками инертных микро- и наночастиц диаметром от 10 нм до 100 мкм. Рассчитаны зависимости относительной скорости детонации от объемной концентрации частиц. Определено, что увеличение эффективности подавления детонации наблюдается при уменьшении диаметра частиц только до 1 мкм. Выявлено влияние термодинамических параметров частиц на эффективность подавления детонации. Определены концентрационные пределы детонации. Показано, что при уменьшении диаметра частиц менее 1 мкм наблюдается выход на некоторое равновесное асимптотическое значение концентрационных пределов детонации. Получена аппроксимация концентрационных пределов детонации в виде аналитической зависимости предельной объемной концентрации частиц от их диаметра и концентрации топлива в композитной двухтопливной смеси силан/водород/воздух.

Ключевые слова: подавление детонации, композитные смеси силан/водород, детальная химическая кинетика, математическое моделирование, газовзвесь, наночастицы.

DOI 10.15372/FGV20190212

## ВВЕДЕНИЕ

С недавнего времени силан ( $\text{SiH}_4$ ) рассматривается как инициатор воспламенения водорода, который используется в качестве топлива в сверхзвуковых двигателях, так как может существенно уменьшать время задержки воспламенения смесей водорода с окислителем. Кроме того, силан является одним из самых популярных газовых источников кремния в полупроводниковой промышленности. В частности, чистый кремний (Si) используется для производства полупроводниковых транзисторов, а диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) — в различных электронных компонентах в качестве изолятора. Силан имеет непредсказуемые возможности для зажигания [1, 2] и может воспламениться при достаточно низкой температуре [3]. Вероятность взрыва зависит от многих параметров, например от температуры [3], скорости смеси [4, 5], влажности окружающей среды [6] и т. д. Таким образом, смеси силан/окислитель, а также композитные смеси силан/водород в окислителе являются источником постоянной взрывоопасности. Это под-

черкивает важность исследования параметров воспламенения, взрыва и детонации таких составных смесей для решения соответствующих проблем взрыво- и пожаробезопасности.

Так, задачи воспламенения композитных силановодородных смесей рассматривались в работах [7–11]. В [7–10] было показано, что добавление небольшого количества силана (до 20 % по массе) в водородовоздушную смесь значительно (до 10 раз) снижает время задержки воспламенения смеси при температуре более 800 К. При температуре менее 800 К время задержки воспламенения силановодородных смесей становится немонотонной функцией температуры смеси [11]: присутствует область так называемого отрицательного температурного коэффициента, в которой увеличение температуры смеси приводит к увеличению времени задержки воспламенения.

Вопросы взрыва и детонации силаносодержащих смесей были изучены в работах [12–15]. В [12, 13] рассчитаны структура одномерной стационарной детонационной волны и параметры Чепмена — Жуге в силановоздушных смесях. В [14] рассмотрен вопрос об управлении параметрами взрыва силановоздушной смеси путем добавления химически инертных микро- частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , рассчитаны параметры и отно-

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-69-00006).

© Тропин Д. А., Фёдоров А. В., 2019.

сительный размер ячейки детонационной волны (ДВ), а также параметры взрыва при постоянных давлении и объеме. Задача о взаимодействии ДВ в силановоздушной смеси с облаками инертных микро- и наночастиц обсуждалась в [15], были определены пределы детонации по массовой концентрации частиц. Вопросы управления взрывными и детонационными процессами в композитных силановодородных смесях не рассматривались ранее.

В [16, 17] исследовалось влияние материала инертных микрочастиц на процессы подавления детонации в смесях водорода с окислителем. Показано, что наиболее эффективно подавляют детонацию частицы с большей теплоемкостью и большей теплотой плавления. Экспериментальное исследование вопросов подавления детонации в реагирующих газовых смесях инертными микрочастицами проводилось в работах [18, 19]. Изучена динамика формирования облака инертных частиц и показано, что создание пылевого облака с равномерным по пространству распределением мелких частиц достаточно проблематично. Кроме того, установлено, что наиболее эффективно подавляют детонацию облака инертных микрочастиц меньшего диаметра.

В данной работе проведено численное моделирование взаимодействия ДВ в композитных смесях силан/водород/воздух с облаками инертных микро- и наночастиц.

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим ударную трубу, заполненную композитной газовой смесью силан/водород в воздухе, а также облаком инертных микро- и наночастиц  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (диаметром от 10 нм до 100 мкм), расположенным в камере низкого давления (КНД) на некотором расстоянии от мембраны, разделяющей камеры высокого и низкого давления. После разрыва диафрагмы в КНД происходит инициирование ДВ, которая до начала взаимодействия с облаком распространяется в режиме Чепмена — Жуге.

Математическая модель механики реагирующих газовых смесей (силан/водород и окислитель) и инертных частиц представляет собой систему уравнений динамики газовой смеси и твердых частиц и имеет форму, представленную в наших предыдущих работах [9, 15, 20]. Для очень малых частиц, когда их размер

становится сравнимым со средней длиной свободного пробега молекул газа, выражение для силы сопротивления дополняется поправочным коэффициентом Каннингема [15]. Характерное время тепловой релаксации наноразмерных частиц определяется соответственно изменению режима обтекания частиц с континуального к свободномолекулярному [21]. Для описания химических реакций в реагирующей газовой смеси будем использовать модель детальной кинетики [12, 13], учитывающую 140 реакций 25 компонентов. С помощью этой модели мы ранее описали экспериментально наблюдаемые времена задержки воспламенения композитных смесей силан/водород [12, 13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

### Влияние состава топливной смеси на скорость детонации

Рассмотрим, как влияет состав композитной силановодородной топливной смеси (концентрации силана и водорода) на скорость детонации Чепмена — Жуге. Исследовались композитные двухтопливные смеси состава от стехиометрической водородовоздушной до стехиометрической силановоздушной смеси:  $2\text{H}_2 + \text{воздух}$ ,  $1.6\text{H}_2 + 0.1\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $1.2\text{H}_2 + 0.2\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $0.8\text{H}_2 + 0.3\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $0.4\text{H}_2 + 0.4\text{SiH}_4 + \text{воздух}$  и  $0.5\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ . На рис. 1 представлены зависимости нормированной скорости детонации Чепмена — Жуге от нормированной массовой концентрации топлива: на оси ординат слева — отношение скоростей детонации Чепмена — Жуге в данной смеси и в стехиометрической водородовоздушной смеси  $D_{\text{CJ}}/D_{\text{CJ,H}_2}$ , справа — в данной смеси и в стехиометрической силановоздушной смеси  $D_{\text{CJ}}/D_{\text{CJ,SiH}_4}$ ; на верхней оси абсцисс — отношение массовых концентраций водорода в данной смеси и в стехиометрической водородовоздушной смеси  $\xi_{\text{H}_2}/\xi_{\text{H}_2}^{\text{steh}}$ , на нижней оси абсцисс — отношение массовых концентраций силана в данной смеси и в стехиометрической силановоздушной смеси  $\xi_{\text{SiH}_4}/\xi_{\text{SiH}_4}^{\text{steh}}$ . Абсолютные значения скорости детонации Чепмена — Жуге в рассматриваемых смесях равны:  $D_{\text{CJ}} = 1819$  м/с в  $0.5\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $D_{\text{CJ}} = 1831$  м/с в  $0.4\text{H}_2 + 0.4\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $D_{\text{CJ}} = 1852$  м/с в  $0.8\text{H}_2 + 0.3\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $D_{\text{CJ}} = 1898$  м/с в  $1.2\text{H}_2 + 0.2\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $D_{\text{CJ}} = 1928$  м/с в  $1.6\text{H}_2 + 0.1\text{SiH}_4 + \text{воздух}$  и  $D_{\text{CJ}} = 1934$  м/с

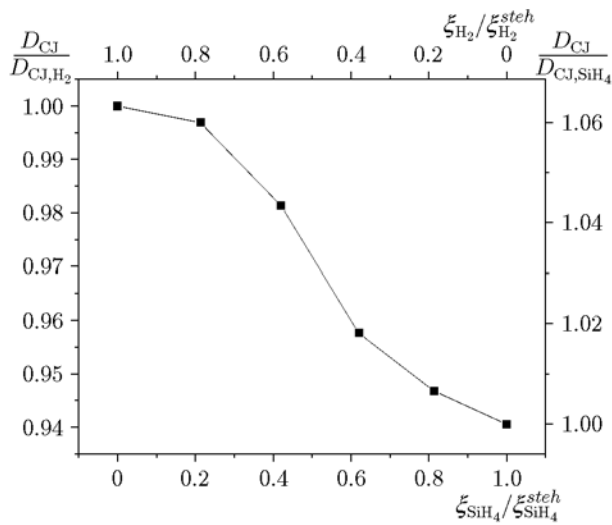


Рис. 1. Зависимость нормированной скорости детонации Чепмена — Жуге от нормированной массовой концентрации топлива в смеси

в  $2\text{H}_2 + \text{воздух}$ . Из рис. 1 видно, что как при малой концентрации силана, так и при малой концентрации водорода в смеси скорости детонации слабо отличаются от значений в соответствующих стехиометрических смесях. Основное изменение в скорости детонации происходит при промежуточных значениях концентрации топлива в смеси:  $\xi_{\text{SiH}_4} / \xi_{\text{SiH}_4}^{\text{steh}} \in (0.3, 0.7)$ ,  $\xi_{\text{H}_2} / \xi_{\text{H}_2}^{\text{steh}} \in (0.3, 0.7)$ .

### Влияние инертных микрочастиц на относительную скорость детонации

Рассмотрим, как влияют инертные микрочастицы  $\text{SiO}_2$  диаметром  $1 \div 100$  мкм на скорость детонации в композитных силановодородных смесях. На рис. 2 представлены зависимости относительной скорости детонации  $\eta = D/D_{\text{CJ}}$  от объемной концентрации инертных микрочастиц  $m_2$ . Видно, что для композитной смеси силан/водород/воздух зависимости лежат между соответствующими кривыми для смесей водород/воздух и силан/воздух. Кроме того, чем больше концентрация силана в смеси, тем сильнее данные кривые сдвигаются в сторону зависимостей для смеси силан/воздух, и, наоборот, чем больше водорода в смеси, тем сильнее кривые сдвигаются в сторону зависимостей для смеси водород/воздух.

На рисунках приведены также пределы детонации по объемной концентрации частиц (перечеркнутые знаки). Эти пределы с увеличе-

нием концентрации силана в смеси смещаются в сторону более высоких объемных концентраций частиц и стремятся к значениям для смеси силан/воздух, а при увеличении концентрации водорода в смеси сдвигаются в сторону более низких объемных концентраций частиц и стремятся к значениям для смеси водород/воздух. Концентрационные пределы детонации в газозвесах силан/водород/воздух с микрочастицами следующие:

— диаметр 100 мкм:  $m_2 = 7 \cdot 10^{-2}$  в  $1.2\text{H}_2 + 0.2\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 2 \cdot 10^{-2}$  в  $1.6\text{H}_2 + 0.1\text{SiH}_4 + \text{воздух}$  и  $m_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  в  $2\text{H}_2 + \text{воздух}$ ;

— диаметр 10 мкм:  $m_2 = 4 \cdot 10^{-2}$  в  $0.5\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 2 \cdot 10^{-2}$  в  $0.4\text{H}_2 + 0.4\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 1.5 \cdot 10^{-2}$  в  $0.8\text{H}_2 + 0.3\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 4 \cdot 10^{-3}$  в  $1.2\text{H}_2 + 0.2\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  в  $1.6\text{H}_2 + 0.1\text{SiH}_4 + \text{воздух}$  и  $m_2 = 3 \cdot 10^{-4}$  в  $2\text{H}_2 + \text{воздух}$ ;

— диаметр 1 мкм:  $m_2 = 1.15 \cdot 10^{-3}$  в  $0.5\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 9 \cdot 10^{-4}$  в  $0.4\text{H}_2 + 0.4\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 6 \cdot 10^{-4}$  в  $0.8\text{H}_2 + 0.3\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 5 \cdot 10^{-4}$  в  $1.2\text{H}_2 + 0.2\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 4 \cdot 10^{-4}$  в  $1.6\text{H}_2 + 0.1\text{SiH}_4 + \text{воздух}$  и  $m_2 = 3.5 \cdot 10^{-4}$  в  $2\text{H}_2 + \text{воздух}$ .

Кроме того, для всех рассматриваемых смесей чем меньше диаметр микрочастиц, тем меньшие объемные концентрации частиц необходимы для подавления детонации. Подобное влияние инертных микрочастиц наблюдается и в однопаливных смесях водорода, метана, пропана, силана и т. д. [9, 15, 22–24].

### Влияние инертных наночастиц на относительную скорость детонации

Рассмотрим влияние инертных наночастиц  $\text{SiO}_2$  диаметром  $10 \div 100$  нм на скорость детонации в композитных силановодородных смесях. На рис. 3 представлены зависимости относительной скорости детонации от объемной концентрации инертных наночастиц  $m_2$ . Видно, что, в отличие от микрочастиц, кривые для наночастиц во всех рассматриваемых смесях максимально приближены друг к другу. Концентрационные пределы детонации в смесях силан/водород/воздух также расположены между пределами для смесей водород/воздух и силан/воздух, причем чем больше концентрация силана в смеси, тем сильнее эти пределы сдвигаются в сторону пределов в смеси си-

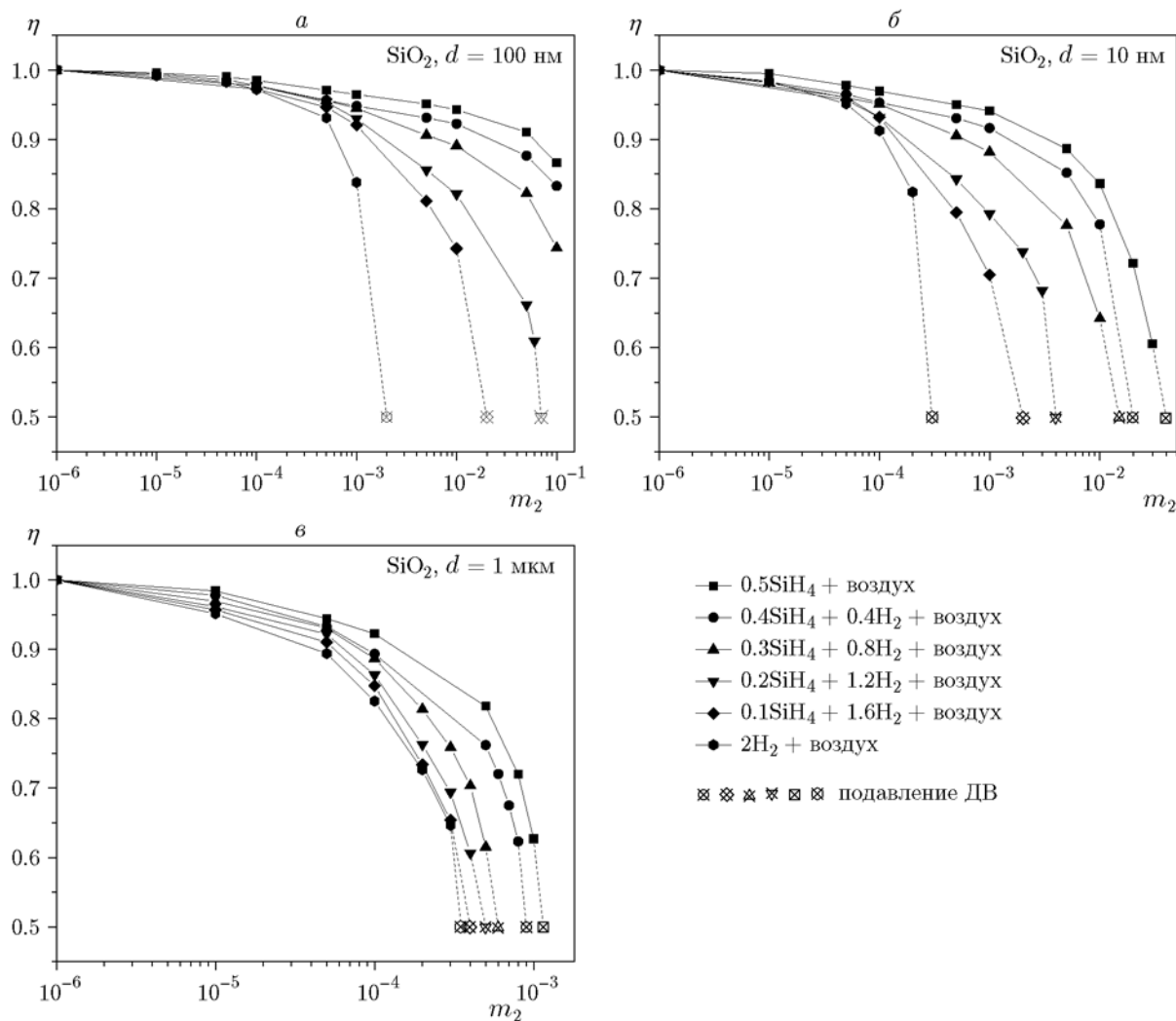


Рис. 2. Зависимость относительной скорости детонации от объемной концентрации инертных микрочастиц диаметром 100 (а), 10 (б) и 1 мкм (в)

лан/воздух. Кроме того, из рис. 3 следует, что концентрационные пределы детонации в газозвесах силан/водород/воздух с наночастицами диаметром 10 и 100 нм совпадают друг с другом и равны:  $m_2 = 6 \cdot 10^{-4}$  в  $0.5\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 5.5 \cdot 10^{-4}$  в  $0.4\text{H}_2 + 0.4\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 5 \cdot 10^{-4}$  в  $0.8\text{H}_2 + 0.3\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 4.5 \cdot 10^{-4}$  в  $1.2\text{H}_2 + 0.2\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ ,  $m_2 = 4 \cdot 10^{-4}$  в  $1.6\text{H}_2 + 0.1\text{SiH}_4 + \text{воздух}$  и  $m_2 = 3.5 \cdot 10^{-4}$  в  $2\text{H}_2 + \text{воздух}$ .

Следует отметить, что в смесях  $1.6\text{H}_2 + 0.1\text{SiH}_4 + \text{воздух}$  и  $2\text{H}_2 + \text{воздух}$  с частицами диаметрами, равными и менее 1 мкм, концентрационные пределы детонации совпадают для различных диаметров, т. е. уменьшение диаметра частиц менее 1 мкм не приводит к уменьшению критической объемной концен-

трации частиц и наблюдается выход данного параметра на некоторое асимптотическое значение.

#### Влияние термодинамических параметров частиц на эффективность подавления детонации

Далее рассмотрим влияние материала частиц на эффективность подавления детонации в смесях силан/водород/воздух. Для этого возьмем реагирующую газовую смесь  $0.4\text{H}_2 + 0.4\text{SiH}_4 + \text{воздух}$  и два сорта частиц:  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Термодинамические параметры частиц таковы:  $\text{SiO}_2$  —  $\rho_{22} = 2400 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_{p,2} = 850 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  —  $\rho_{22} = 3990 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_{p,2} = 880 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ . Здесь  $\rho_{22}$  — истинная плотность частиц,  $c_{p,2}$  — теплоемкость частиц.

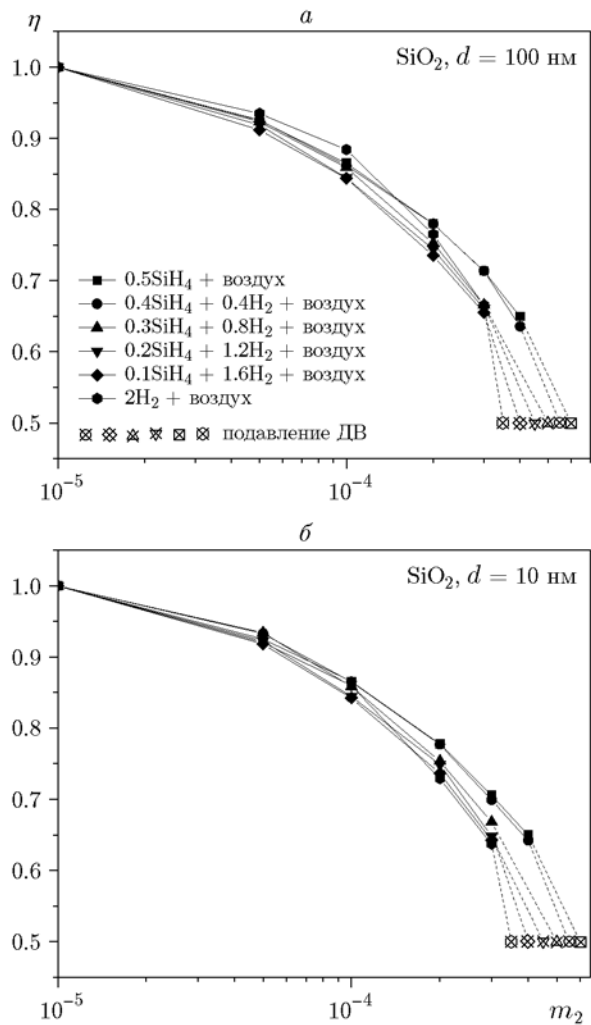


Рис. 3. Зависимость относительной скорости детонации от объемной концентрации инертных наночастиц диаметром 100 (а) и 10 нм (б)

На рис. 4 представлены зависимости относительной скорости детонации от объемной концентрации частиц  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  диаметром от 10 нм до 100 мкм. Видно, что разные сорта частиц диаметрами 10 и 100 мкм одинаково ослабляют и подавляют детонацию. Совпадают также концентрационные пределы. Однако при переходе к частицам размером 1 мкм и менее частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  начинают более эффективно ослаблять и подавлять детонацию. В данном случае кривые для частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  лежат ниже соответствующих кривых для  $\text{SiO}_2$ . Также и концентрационные пределы детонации лежат в области более меньших объемных концентраций частиц. Концентрационные пределы детонации в смеси  $0.4\text{H}_2 + 0.4\text{SiH}_4 + \text{воздух}$  с частицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$  следующие: диаметр 10 мкм —

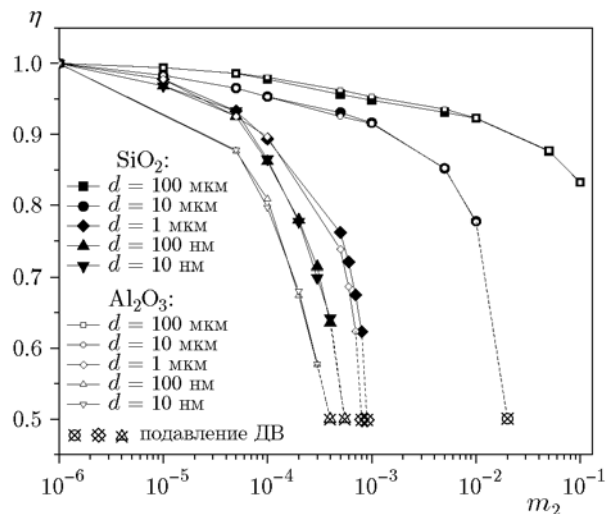


Рис. 4. Зависимость относительной скорости детонации от объемной концентрации частиц  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  диаметром от 10 нм до 100 мкм. Сравнение эффективности подавления детонации частицами  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$

$m_2^* = 2 \cdot 10^{-2}$ , диаметр 1 мкм —  $m_2^* = 8 \cdot 10^{-4}$ , диаметр 100 нм —  $m_2^* = 4 \cdot 10^{-4}$ , диаметр 10 нм —  $m_2^* = 4 \cdot 10^{-4}$ .

Отметим, что в работах [16, 17] также исследовалось влияние разного сорта инертных микрочастиц ( $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) на эффективность подавления детонации. Показано, что микрочастицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  сильнее уменьшают скорость ДВ. Однако это уменьшение в случае микрочастиц очень незначительное.

Подобное влияние сорта частиц на эффективность ослабления и подавления детонации объясняется следующим. Частицы, имеющие большую плотность и теплоемкость, способны отнять больше энергии у реагирующей газовой смеси. Однако, как было показано в [25], частицы диаметром более 10 мкм прогреваются очень медленно, их температура в зоне химических реакций в структуре ДВ меняется незначительно (примерно на 10 % относительно температуры газа). Частицы не успевают отнять максимально возможное количество энергии от газа. Поэтому для данных диаметров частиц не наблюдается влияния различия их термодинамических параметров. Однако, когда мы переходим к частицам размерами менее 1 мкм, время тепловой релаксации значительно уменьшается и тепловое равновесие между фазами наступает уже в зоне химических реакций в структуре ДВ. В этом случае

частицы успевают отнять у газа максимально возможное количество энергии. И частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , обладающие большими плотностью и теплоемкостью, наиболее эффективно ослабляют и подавляют ДВ.

### Концентрационные пределы детонации

На рис. 5 представлены концентрационные пределы детонации в смесях силан/воздух, силан/водород/воздух и водород/воздух — зависимости критической объемной концентрации частиц, подавляющей детонацию, от диаметра частиц. Видно, что уменьшение диаметра приводит к тому, что критическая концентрация частиц также уменьшается. Данный эффект наблюдается во всех рассматриваемых смесях с частицами микронных размеров ( $1 \div 100$  мкм). Дальнейшее же уменьшение диаметра в сторону наноразмеров не приводит к уменьшению критической концентрации: наблюдается выход на некоторое асимптотическое значение критической объемной концентрации частиц. Таким образом, при переходе от микрочастиц к наночастицам эффективность подавления детонации в композитных смесях не возрастает. В наших предыдущих работах [15, 26, 27], а также в [28] было показано существование двух типов детонационных течений в газовзвесьях реагирующих газов и инертных частиц — замороженное (при диаметре частиц более 100 мкм) и равновес-

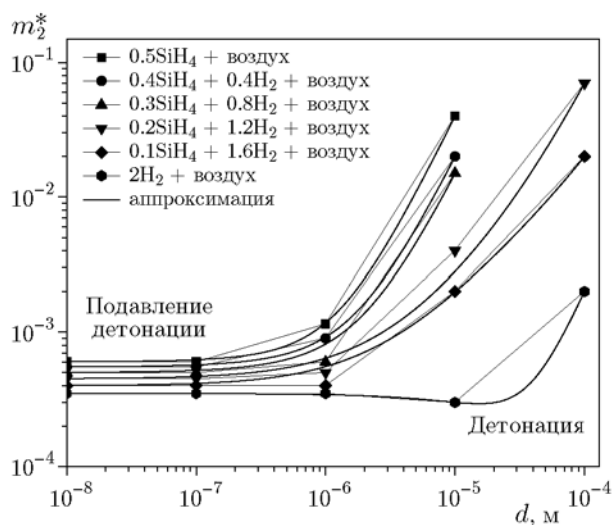


Рис. 5. Зависимость критической объемной концентрации частиц от диаметра частиц. Концентрационные пределы детонации

ное (при диаметре менее 1 мкм) с непрерывным переходом между ними. Оказалось, что при уменьшении диаметра частиц менее 1 мкм при постоянной объемной концентрации частиц скорость детонации практически не меняется, выходит на асимптотическое значение. Здесь же, в газовзвесьях частиц диаметром менее 1 мкм, наблюдается также выход на некоторое равновесное асимптотическое значение, но уже не по скорости детонации, а по концентрационным пределам детонации.

Кроме того, на рис. 5 показана аппроксимационная зависимость предельной объемной концентрации частиц от их диаметра вида  $m_{2,0}^* = m_{2,0}^* + B(\bar{\xi}_{fuel})d + C(\bar{\xi}_{fuel})d^2$ . Здесь  $m_{2,0}^*$  — критическая объемная концентрация частиц диаметром  $d = 10$  нм,  $B(\bar{\xi}_{fuel}) = 195 - 209.7 \exp(-\bar{\xi}_{fuel}/\xi_{\text{SiH}_4}^{steh})$ ,  $C(\bar{\xi}_{fuel}) = -1.92 \cdot 10^6 - 6.42 \cdot 10^7 \bar{\xi}_{fuel} + 4.34 \cdot 10^8 \bar{\xi}_{fuel}^2$ ,  $\bar{\xi}_{fuel} = \xi_{\text{SiH}_4} / \xi_{\text{SiH}_4}^{steh} = 1 - \xi_{\text{H}_2} / \xi_{\text{H}_2}^{steh}$ . Видно, что данные зависимости удовлетворительно описывают концентрационные пределы детонации во всех рассматриваемых газовзвесьях. Таким образом, получена аппроксимация концентрационных пределов детонации в виде аналитической зависимости предельной объемной концентрации частиц от их диаметра и концентрации топлива в композитной двухтопливной смеси силан/водород/воздух.

### ВЫВОДЫ

Проведено физико-математическое моделирование взаимодействия детонационных волн в композитных смесях силан/водород с облаками инертных микро- и наночастиц диаметром от 10 нм до 100 мкм. Рассчитаны зависимости дефицита скорости детонации, а также концентрационные пределы детонации для композитных двухтопливных смесей силан/водород/воздух различного состава. Показано, что эти параметры для композитных смесей силан/водород/воздух лежат между такими же параметрами для смесей водород/воздух и силан/воздух. Определено, что уменьшение диаметра микрочастиц до 1 мкм приводит к увеличению эффективности подавления детонации. Дальнейшее уменьшение диаметра частиц менее 1 мкм во всех рассматриваемых смесях не дает увеличения эффективности подавления детонации.

Выявлено влияние термодинамических па-

раметров частиц на эффективность подавления детонации. Показано, что частицы разного сорта диаметром более 10 мкм практически одинаково ослабляют и подавляют ДВ. Однако при диаметре частиц менее 1 мкм эффективнее ослабляют и подавляют детонацию частицы с большей плотностью и теплоемкостью.

Определены концентрационные пределы детонации в смесях силан/воздух, силан/водород/воздух и водород/воздух. При уменьшении диаметра частиц менее 1 мкм наблюдается выход на некоторое равновесное асимптотическое значение концентрационных пределов детонации. Получена аппроксимация концентрационных пределов детонации в виде аналитической зависимости предельной объемной концентрации частиц от их диаметра и концентрации топлива в композитной двухтопливной смеси силан/водород/воздух.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Chen J. R., Tsai H. Y., Chen S. K., Pan H. R., Hu S. C., Shen C. C., Kuan C. M., Lee Y. C., Wu C. C.** Analysis of a silane explosion in a photovoltaic fabricant plant // *Process Saf. Prog.* — 2006. — V. 25. — P. 237–244.
2. **Chang Y. Y., Peng D. J., Wu H. C., Tsaor C. C., Shen C. C., Tsai H. Y., Chen J. R.** Revising of a silane explosion in a photovoltaic fabrication plant // *Process Saf. Prog.* — 2007. — V. 26. — P. 155–157.
3. **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.
4. **Tsai H. Y., Wang S. W., Wu S. Y., Chen J. R., Ngai E. Y., Huang K. P. P.** Experimental studies on the ignition behavior of pure silane released into air // *J. Loss Prevent. Process Ind.* — 2010. — V. 23. — P. 170–177.
5. **Ngai E. Y., Huang K. P. P., Chen J. R., Shen C. C., Tsai H. Y., Chen S. K., Hu S. C., Yeh P. H., Liu C. D., Chang Y. Y., Peng D. J., Wu H. C.** Field tests of release, ignition and explosion from silane cylinder valves // *Process Saf. Prog.* — 2007. — V. 26. — P. 265–282.
6. **Tsai H. Y., Lin Y. J., Chang Y. C., Lin J. S., Chen J. R.** Unconfined silane vapor cloud explosions // *Динамика многофазных сред: тр. XIV Всерос. семинара, приуроченного к 75-летию акад. РАН Фомина В. М. (Новосибирск, 2–5 ноября 2015 г.).* — Новосибирск, 2015. — С. 287–291.
7. **McLain A. G., Jachimowski C. J., Rogers R. C.** Ignition of  $\text{SiH}_4\text{—H}_2\text{—O}_2\text{—N}_2$  behind reflected shock waves // *NASA Tech. Paper* 2114. — 1983.
8. **Golovitchev V. I., Bruno C.** Numerical study of the ignition of silane/hydrogen mixtures // *J. Propul. Power.* — 1998. — V. 15, N 1. — P. 92–96.
9. **Федоров А. В., Тропин Д. А., Фомин П. А., Чен Дж.-Р.** Математическое моделирование детонации в гомогенных и гетерогенных смесях. — Новосибирск: Параллель, 2017.
10. **Тропин Д. А., Федоров А. В.** Воспламенение двухтопливной смеси водород/силан в воздухе // *Физика горения и взрыва.* — 2017. — Т. 53, № 1. — С. 3–10.
11. **Тропин Д. А., Федоров А. В., Боченков Е. С.** Времена задержки воспламенения смесей водород/силан/воздух при низких температурах // *Физика горения и взрыва.* — 2018. — Т. 54, № 4. — С. 30–37.
12. **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.
13. **Tropin D. A., Fedorov A. V.** Physical and mathematical modeling of ignition, combustion and detonation of silane-hydrogen-air mixtures // *J. Loss Prevent. Process Ind.* — 2017. — V. 49, pt B. — P. 762–768.
14. **Фомин П. А., Федоров А. В., Тропин Д. А., Чен Дж.-Р.** Оценка и контроль детонационной опасности силаносодержащих смесей // *Инж.-физ. журн.* — 2017. — Т. 90, № 2. — С. 495–509.
15. **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.
16. **Fomin P. A., Chen J.-R.** Effect of chemically inert particles on thermodynamic characteristics and detonation of a combustible gas // *Combust. Sci. Technol.* — 2009. — V. 181, N 8. — P. 1038–1064.
17. **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.
18. **Pinaev A. V., Vasil'ev A. A., Pinaev P. A.** Suppression of gas detonation by a dust cloud at reduced mixture pressures // *Shock Waves.* — 2015. — V. 25, N 3. — P. 267–275.
19. **Пинаев А. В., Пинаев П. А.** Результаты исследования параметров пылевой завесы в ударной трубе // *Вестн. науч. центра по безопасности работ в угольной пром.-ти.* — 2016. — № 2. — С. 57–62.
20. **Тропин Д. А., Федоров А. В.** Физико-математическое моделирование подавления детонации инертными частицами в смесях метан — кислород и метан — водород — кисло-

- род // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 5. — С. 48–52.
21. **Сандарам Д., Янг В., Зарко В. Е.** Горение наночастиц алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 2. — С. 37–63.
  22. **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.
  23. **Wolinski M., Wolanski P.** Gaseous detonation processes in presence of inert particles // Arch. Combust. — 1987. — V. 7, N 3/4. — P. 353–370.
  24. **Wolanski P., Liu J. C., Kaufman C. W., Nicholls J. A., Sichel M.** The effect of inert particles on methan-air detonations // Arch. Combust. — 1988. — V. 8, N 1. — P. 15–32.
  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. **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.
  27. **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.
  28. **Papalexandris M. V.** Numerical simulation of detonations in mixtures of gases and solid particles // J. Fluid Mech. — 2004. — V. 507. — P. 95–142.

*Поступила в редакцию 06.03.2018.*

*После доработки 04.04.2018.*

*Принята к публикации 11.04.2018.*

---