

УДК 662.612:32

ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СМЕСЕЙ ВОДОРОД/СИЛАН/ВОЗДУХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Д. А. Тропин, А. В. Фёдоров, Е. С. БоченковИнститут теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
d.a.tropin@itam.nsc.ru, russkey17@gmail.com

На основе модифицированной физико-математической модели воспламенения смесей силан/водород/воздух рассчитано время задержки их воспламенения при низких начальных температурах ($300 \div 900$ К) и давлениях ($0.4 \div 1$ атм) смеси. Показано, что на графиках зависимости времени задержки воспламенения от температуры присутствует область так называемого отрицательного температурного коэффициента. Выявлено влияние давления смеси и содержания силана в смеси на протяженность данной области. Показано, что повышение концентрации силана в смеси, так же как и рост давления смеси, приводит к увеличению протяженности области отрицательного температурного коэффициента.

Ключевые слова: воспламенение, силановодородовоздушная смесь, детальная химическая кинетика, математическое моделирование.

DOI 10.15372/FGV20180404

ВВЕДЕНИЕ

Силан (SiH_4) является одним из основных источников кремния для электроники, так как он дает «чистый» кремний, в то время как из кварцевого песка получают достаточно «грязный» кремний, содержащий много посторонних примесей. Силан представляет собой пирофорный газ, при контакте с воздухом он может самовоспламеняться даже при комнатной температуре. Чтобы эффективно предотвращать взрывы силана, которые могут произойти при катастрофической утечке газа из трубопроводов и емкостей хранения, следует разрабатывать теорию воспламенения, горения и детонации облаков силана в открытых и замкнутых пространствах. Это позволит найти критерии взрыво- и пожаробезопасности для предотвращения катастрофических взрывов на промышленных производствах.

В [1] были проанализированы три модели химической кинетики горения водорода в кислороде, содержащие 38, 42 и 60 прямых и обратных реакций 8 химических компонентов: H_2 , O_2 , H_2O , OH , H , O , HO_2 , H_2O_2 . Продемонстрирована значимость выбора критерия определения времени задержки воспламенения:

максимум роста температуры смеси во времени, максимум роста концентрации радикала OH во времени, максимум роста концентрации водяного пара во времени, максимум концентрации радикала OH во времени. Показано, что три первых критерия дают сходные результаты, а последний завывает время задержки воспламенения. В диапазоне температур $1000 \div 2800$ К оптимальной по числу реакций, количественному и качественному описанию экспериментальных времен задержки воспламенения оказалась схема с 38 реакциями 8 компонентов.

В [2] была сформулирована кинетическая модель механизма горения силана, состоящая из 140 элементарных реакций 25 химических компонентов. Было рассчитано время задержки воспламенения силана в диапазоне температур $T = 800 \div 1200$ К при давлениях $p = 126 \div 136$ кПа. Показано, что данная схема удовлетворительно описывает экспериментальные времена задержки воспламенения силановодородных смесей [3]. В работе [4] данный кинетический механизм был слегка модифицирован для описания воспламенения смеси силан/водород/воздух в более широком диапазоне температур. Было рассмотрено два критерия воспламенения: максимум роста температуры смеси и достижение максимума концентрации радикала OH в смеси. Показано, что по данным критериям модель удовлетво-

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-69-00006).

© Тропин Д. А., Фёдоров А. В., Боченков Е. С., 2018.

рительно описывает экспериментально наблюдаемые времена задержки воспламенения смеси [3] в диапазонах $T = 800 \div 1900$ К и $p = 1 \div 1.36$ атм. В [5] на основе модифицированного кинетического механизма [2, 4] определены верхние и нижние пределы воспламенения силанокислородной смеси в диапазонах $p = 0.05 \div 1.1$ атм и $T = 350 \div 500$ К и силановоздушных смесей в диапазонах $p = 0.4 \div 1.1$ атм и $T = 430 \div 640$ К. Установлено, что в силановоздушных смесях зависимость предельной температуры воспламенения смеси от содержания силана является немонотонной. В работе [6] на основе этого же кинетического механизма [2, 4] показано, что добавление силана в водородовоздушную смесь приводит к уменьшению времени задержки воспламенения при $T = 1200 \div 2500$ К. Добавление небольшого количества силана (до 20 % по массовой концентрации) значительно уменьшает время задержки воспламенения смеси. При дальнейшем увеличении количества силана в смеси влияние становится незначительным.

В работе [7] экспериментально было исследовано взаимодействие струи силана с окружающим воздухом температурой ≈ 40 °С. Получены три различных сценария воспламенения в зависимости от скорости истечения струи силана: неопределенно отложенное воспламенение при скоростях истечения выше некоторой критической; мгновенное воспламенение со сферическим ядром воспламенения и сильным пламенем, быстро распространяющимся как вверх, так и вниз по потоку при скоростях истечения ниже некоторой критической; мгновенное воспламенение со слабым ядром пламени, медленно развивающимся в коническую форму ламинарного диффузионного пламени при скоростях истечения ниже некоторой критической.

В [8] экспериментально были показаны режимы окисления пропана: низкотемпературный ($T < 600$ К), некоторая переходная область ($600 < T < 650$ К) и высокотемпературный ($T > 650$ К). Помимо стандартного уменьшения времени задержки воспламенения с ростом температуры, в некотором диапазоне температуры наблюдался обратный эффект: время задержки воспламенения увеличивалось с ростом температуры. Данная область воспламенения была названа областью отрицательного температурного коэффициента. В дальнейшем в [9] был сформулирован кинетический

механизм, который показывает существование данной немонотонной зависимости времени задержки воспламенения топлива от температуры.

В работе [10] экспериментально обнаружено существование области отрицательного температурного коэффициента в смесях бутана с окислителем, которая демонстрирует переход между двухступенчатым и одноступенчатым воспламенением. В случае двухступенчатого воспламенения температура смеси меняется двумя скачками, а при одноступенчатом меняется от начального до конечного значения одним скачком. Из сравнения экспериментальных результатов с расчетными [11] следует, что времена задержки воспламенения одного порядка. В работе [12] экспериментально показано влияние диоксида углерода на двухступенчатое воспламенение *n*-гептана при низких температурах. Добавка диоксида углерода ускоряет первую стадию воспламенения, но увеличивает время второй стадии воспламенения и тем самым общее время задержки воспламенения смеси.

Существование области отрицательного температурного коэффициента экспериментально и численно было показано также в [13] для смесей бутанола и окислителя в диапазонах $T = 795 \div 1200$ К и $p = 61 \div 92$ атм.

В [14] на основе семи различных кинетических схем было рассчитано время задержки воспламенения метана в кислороде при $T = 700 \div 1500$ К. Среди всех рассмотренных схем только по двум схемам, [15] и [16], получено существование области отрицательного температурного коэффициента.

В экспериментах [17] по воспламенению бутанола-1 за отраженными ударными волнами в диапазоне $T = 716 \div 1121$ К при $p = 20$ и 40 атм не обнаружено области отрицательного температурного коэффициента.

Таким образом, ранее экспериментально и численно было показано существование области отрицательного температурного коэффициента для смесей углеводородов (пропана, бутана, бутанола, метана) с окислителем при $T < 1000$ К и $p = 0.8 \div 1$ атм, а также при $T \leq 1500$ К и $p = 9 \div 11$ и $61 \div 92$ атм.

В данной работе рассчитано время задержки воспламенения смесей водород/силан/воздух при низких давлениях и температурах смеси с использованием детальных кинетических механизмов. Найдено существование

области отрицательного температурного коэффициента в исследуемых смесях.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу о воспламенении смесей водород/силан/воздух при низких давлениях ($0.4 \div 1$ атм) и температурах ($300 \div 900$ К) смеси. Физико-математическая модель, описывающая данный процесс, имеет следующий вид:

уравнение для температуры смеси (уравнение энергии)

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{c_v(T)} \sum_{\alpha=1}^N (c_{v\alpha}(T)T + h_{0\alpha} - c_p(T)T_{00}) \frac{d\xi_{\alpha}}{dt}, \quad (1)$$

замыкаемое уравнением состояния для газовой смеси в целом

$$p = \rho T R \sum_{\alpha=1}^N \frac{\xi_{\alpha}}{M_{\alpha}} \quad (2)$$

и кинетическими уравнениями детальной химической кинетики

$$\frac{d\xi_{\alpha}}{dt} = \frac{1}{\rho} M_{\alpha} \sum_{r=1}^l \rho^{m_r} (\nu'_{\alpha r} - \nu_{\alpha r}) \times \left[k_{fr} \prod_{\beta=1}^N \left(\frac{\xi_{\beta}}{M_{\beta}} \right)^{\nu_{\beta r}} - k_{br} \prod_{\beta=1}^N \left(\frac{\xi_{\beta}}{M_{\beta}} \right)^{\nu'_{\beta r}} \right]. \quad (3)$$

Здесь c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(К·кг); c_v — удельная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(К·кг); $c_{v\alpha}$ — удельная теплоемкость при постоянном объеме компонента α смеси, Дж/(К·кг); $h_{0\alpha}$ — энтальпия образования компонента α , Дж/кг; k_{fr} , k_{br} — скорости прямых и обратных реакций; l — количество реакций; m — порядок реакции; M_{α} — молярная масса компонента α , кг/моль; N — количество компонентов в смеси; T_{00} — стандартная температура, К; ξ_{α} — концентрация компонента α в смеси; $\nu_{\alpha r}$, $\nu'_{\beta r}$ — стехиометрические коэффициенты, равные 1, если соответствующий компонент участвует в r -й реакции, и равные

нулю в противоположном случае; $\nu'_{\alpha r}$, $\nu'_{\beta r}$ — стехиометрические коэффициенты, относящиеся к продуктам реакции. Начальные данные при $t = 0$: $u = 0$, $p = p_r$, $T = T_r$, $\xi_{\alpha} = \xi_{\alpha 0}$, где p_r , T_r — задаваемые начальные давление и температура смеси, $\xi_{\alpha 0}$ — начальная концентрация компонента смеси.

Для описания кинетики воспламенения и горения реагирующей смеси водород/силан/воздух будем использовать модифицированную детальную кинетическую схему [2, 4], которая учитывает 140 прямых и обратных реакций 25 компонентов. Модификация данной модели кинетики, а также термодинамические и кинетические константы подробно описаны в работах [4, 5]. Отметим, что с помощью данной модели ранее были описаны структура детонационной волны, время задержки воспламенения в смесях силан/водород/кислород/азот, пределы воспламенения смесей силан — кислород и силан — воздух [4, 5, 18].

КРИТЕРИЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СМЕСИ

Для определения времени задержки воспламенения существует несколько критериев воспламенения [1, 19]. В работах [1, 4, 19, 20] было показано, что различные критерии воспламенения смесей водород — кислород, силан — кислород и силан — воздух дают очень близкие результаты. Поэтому в данной работе для определения времени задержки воспламенения выберем один из существующих критериев, а именно: временем задержки воспламенения будем считать время, в течение которого достигается максимум роста температуры смеси во времени — $\max \left(\frac{dT}{dt} \right)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Верификация кинетики воспламенения и горения силана

В работах [4, 21] мы верифицировали рассматриваемую кинетическую схему воспламенения и горения силана по времени задержки воспламенения силана и силана — водорода в воздухе и кислороде. Здесь же проведем дополнительную верификацию данной модели по времени задержки воспламенения смеси водород — воздух. На рис. 1 приведены зависимо-

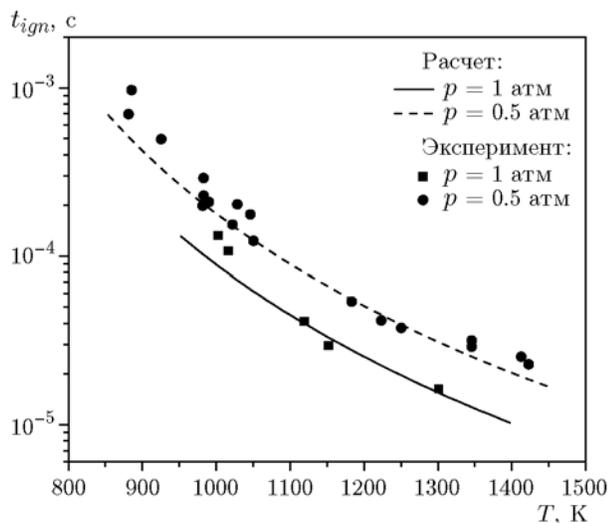


Рис. 1. Зависимость времени задержки воспламенения стехиометрической водородовоздушной смеси от температуры. Сравнение с экспериментом [22]

сти времени задержки воспламенения стехиометрической смеси водород — воздух от температуры, рассчитанные по данной модели и полученные в эксперименте [22] в диапазоне $T = 850 \div 1450$ К при $p = 0.5$ и 1 атм. Как видно из рис. 1, данная модель удовлетворительно описывает экспериментально полученные времена задержки воспламенения водородовоздушной смеси при указанных выше параметрах смеси. Таким образом, наша модель химической кинетики верифицирована для всех рассматриваемых типов смесей: водород, силан и силан — водород в воздухе.

Область отрицательного температурного коэффициента

С использованием модели (1)–(3) были рассчитаны зависимости времени задержки воспламенения смесей водород/силан/воздух при $T = 300 \div 900$ К и $p = 0.4 \div 1$ атм.

На рис. 2 представлены зависимости времени задержки воспламенения смесей водород — воздух ($2\text{H}_2 + \text{воздух}$), водород/силан/воздух ($0.8\text{H}_2 + 0.3\text{SiH}_4 + \text{воздух}$) и силан — воздух ($0.5\text{SiH}_4 + \text{воздух}$) от температуры. Полученные зависимости для двухтопливных смесей водород — силан при различных концентрациях топлива подобны и здесь не приводятся. Видно, что воспламенение стехиометрической водородовоздушной смеси

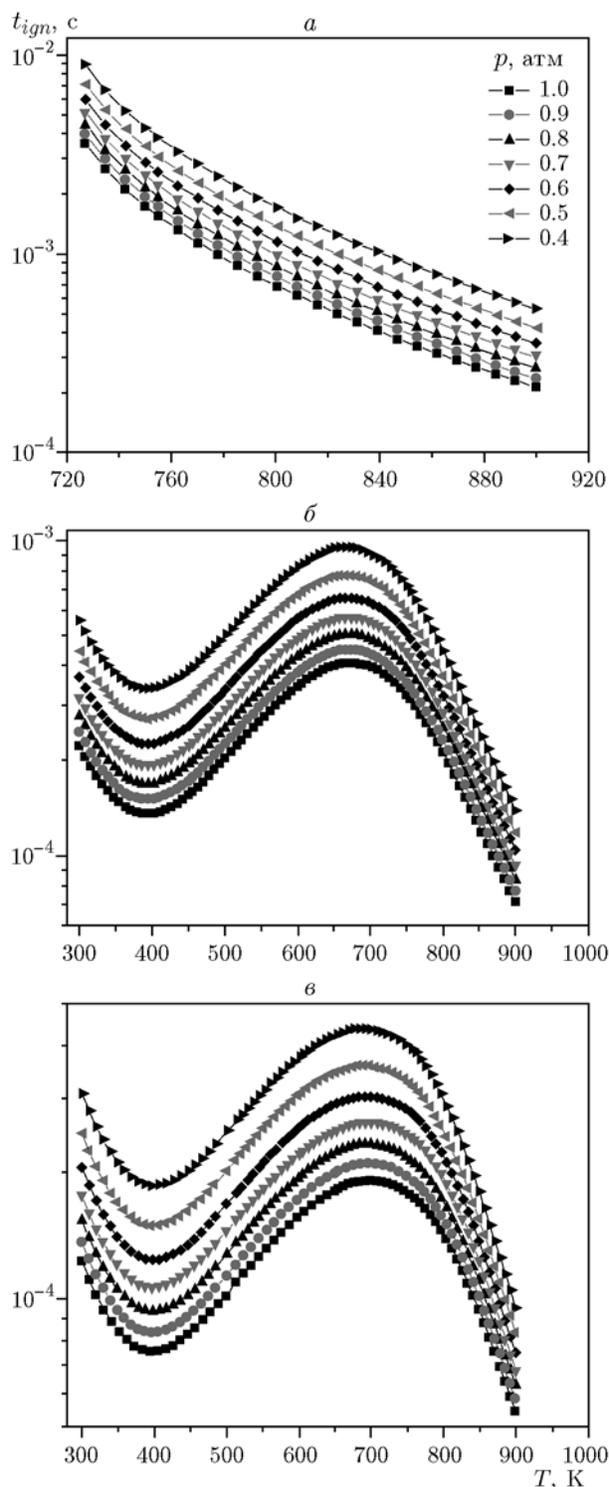


Рис. 2. Зависимость времени задержки воспламенения смесей $2\text{H}_2 + \text{воздух}$ (а), $0.8\text{H}_2 + 0.3\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ (б), $0.5\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ (в) от температуры за фронтом отраженной ударной волны

(рис. 2, *a*) начинается при $T = 727$ К. При добавлении силана воспламенение смеси начинается уже при $T = 300$ К, а увеличение концентрации силана в смеси приводит к уменьшению времени задержки воспламенения смеси (рис. 2, *б, в*), как и было сказано в [6]. Кроме того, на зависимостях, представленных на рис. 2, *б, в*, имеется участок роста времени задержки воспламенения с повышением температуры (область отрицательного температурного коэффициента), полученный ранее для углеводородов в [8–10, 13, 14] в диапазонах $T = 563 \div 1500$ К и $p = 0.8 \div 1$ атм. При низких температурах окисление смеси происходит по двум конкурирующим цепям реакций. Первая из них протекает через радикалы ОН (быстрые цепочки реакций), вторая — через перекисные радикалы HO_2 , которые образуются в реакциях первичных топливных радикалов QH_3 с молекулами кислорода O_2 (медленные цепочки реакций). В свою очередь, радикалы HO_2 могут либо захватывать (устранять) образовавшиеся в смеси радикалы ОН, либо в реакциях с топливными радикалами образовывать гидропероксиалкильные радикалы (QOON). Причем при низких температурах определяющей будет именно вторая, медленная цепочка реакций [13], которая и приводит к увеличению времени задержки воспламенения. При высоких же температурах окисление определяется первой, быстрой цепочкой реакций. Здесь Q — углерод С в случае углеводородов и кремний Si в случае силанов (кремнийводородных соединений).

В таблице представлены границы области отрицательного температурного коэффициента: T_1 — начало области, T_2 — конец, ΔT — протяженность. Исходя из данных таблицы можно сделать следующие выводы:

— увеличение концентрации силана в смеси приводит к смещению области отрицатель-

ного температурного коэффициента в сторону больших температур, а также к увеличению протяженности области отрицательного температурного коэффициента;

— увеличение давления смеси не приводит к изменению границы начала области отрицательного температурного коэффициента, но сдвигает границу конца данной области в сторону более высоких температур.

Двухступенчатое воспламенение смеси

Были проведены расчеты изменения локальных характеристик воспламенения смеси водород/силан/воздух во времени — температуры и концентраций компонентов (ОН, H_2O , H_2 , SiH_4). Поскольку для двухтопливных смесей водород — силан при различных концентрациях топлива данные распределения подобны, здесь они представлены только для трех смесей ($0.5\text{SiH}_4 + \text{воздух}$, $1.6\text{H}_2 + 0.1\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ и $2\text{H}_2 + \text{воздух}$) при четырех различных начальных температурах. В водородовоздушной смеси эти значения температуры выбраны примерно с равным шагом в рассматриваемом диапазоне температуры. В силановоздушной и силановодородовоздушной смесях температуры выбраны следующим образом: первая — наименьшая температура воспламенения, вторая соответствует началу области отрицательного температурного коэффициента, третья — середине области, четвертая — концу области отрицательного температурного коэффициента.

На рис. 3 показаны распределения параметров смеси $2\text{H}_2 + \text{воздух}$ во времени: температуры смеси (рис. 3, *a*), концентрации ОН (рис. 3, *б*), концентрации водяного пара H_2O (рис. 3, *в*). Видно, что при увеличении начальной температуры смеси рост рассматриваемых параметров начинается при всё меньших временах. То есть время задержки воспламенения смеси, определяемое по четырем критериям (максимум роста температуры смеси во времени, максимум роста концентрации радикала ОН, максимум роста концентрации водяного пара H_2O , максимум концентрации радикала ОН), монотонно уменьшается.

На рис. 4 представлены распределения параметров смеси $1.6\text{H}_2 + 0.1\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ во времени: температуры смеси (рис. 4, *a*), концентрации ОН (рис. 4, *б*), концентрации водяного пара H_2O (рис. 4, *в*). Во-первых, видно, что монотонное увеличение начальной температуры

Зависимость протяженности области отрицательного температурного коэффициента от концентрации силана в смеси

Смесь	T_1 , К	T_2 , К	ΔT , К
$1.6\text{H}_2 + 0.1\text{SiH}_4 + \text{воздух}$	379	$620 \div 628$	$241 \div 249$
$1.2\text{H}_2 + 0.2\text{SiH}_4 + \text{воздух}$	387	$651 \div 658$	$264 \div 271$
$0.8\text{H}_2 + 0.3\text{SiH}_4 + \text{воздух}$	394	$666 \div 673$	$272 \div 279$
$0.4\text{H}_2 + 0.4\text{SiH}_4 + \text{воздух}$	395	$681 \div 689$	$286 \div 294$
$0.5\text{SiH}_4 + \text{воздух}$	397	$692 \div 700$	$295 \div 303$

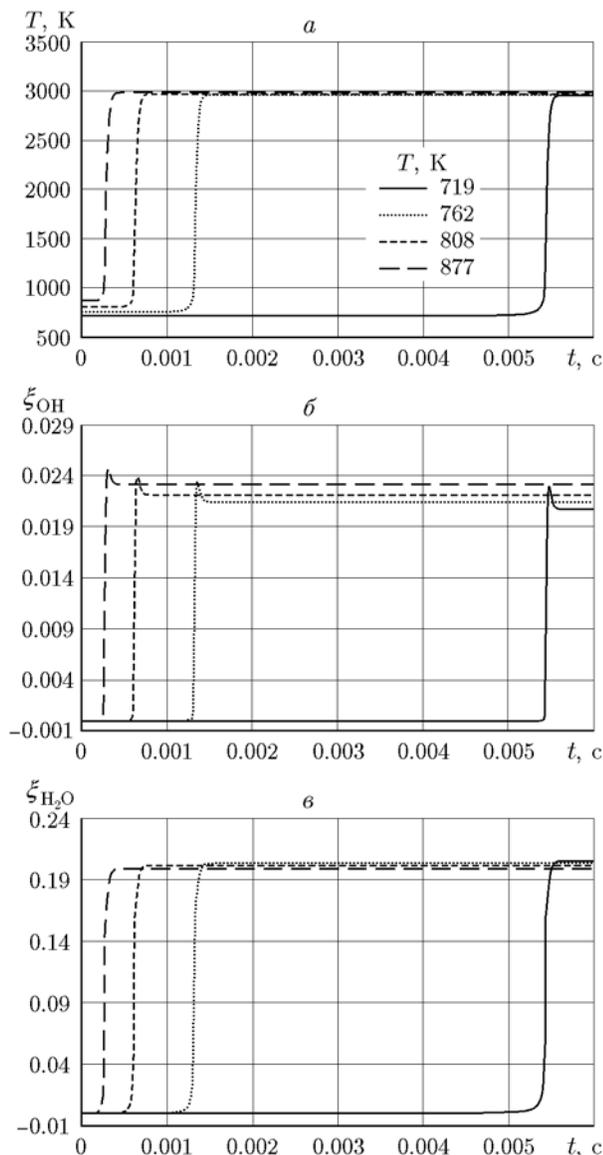


Рис. 3. Зависимость температуры (а), концентраций ОН (б) и H₂O (в) в смеси 2H₂ + воздух от времени

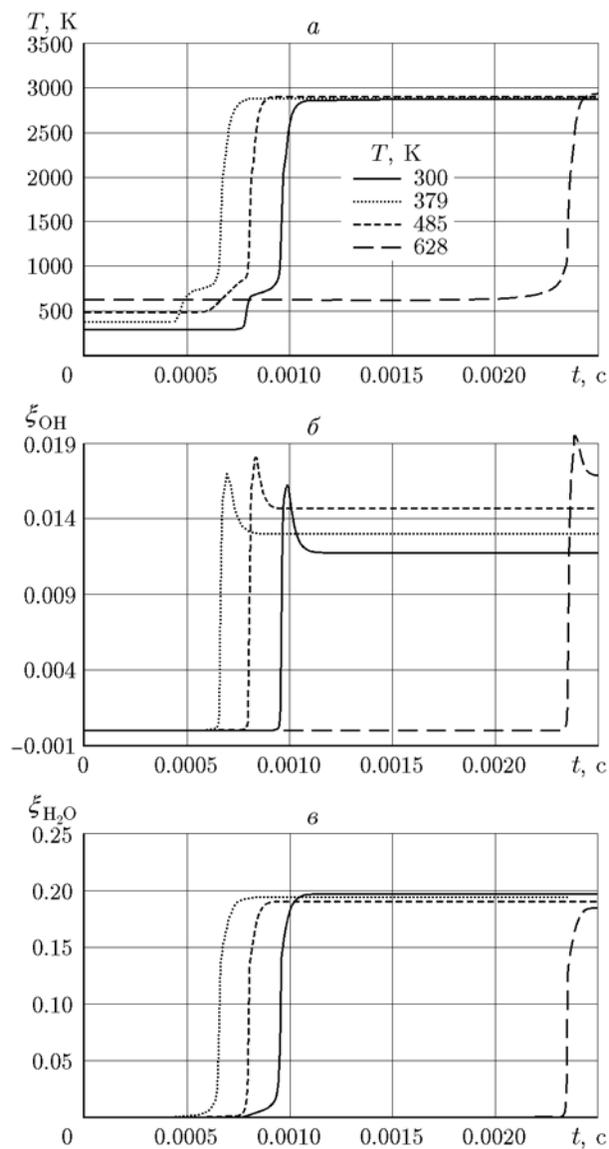


Рис. 4. Зависимость температуры (а), концентраций ОН (б) и H₂O (в) в смеси 1.6H₂ + 0.1SiH₄ + воздух от времени

смеси ведет к немонотонному изменению времени задержки воспламенения (см. рис. 4,а): сначала время задержки воспламенения уменьшается (до $T_r = 379$ K), а затем монотонно увеличивается. Во-вторых, в отличие от предыдущей смеси, в данной смеси наблюдается двухступенчатое воспламенение (см. рис. 4,а): в распределении температуры имеются две пюльчки (две стадии воспламенения). В течение первой стадии происходит диссоциация силана с образованием молекулярного водорода, который, в свою очередь, начинает диссоциировать

уже на первой стадии. На первой стадии видно плавное нарастание одного из конечных продуктов реакции — водяного пара (см. рис. 4,в) и отсутствие нарастания концентрации радикала ОН (см. рис. 4,б). Последнее вызвано тем, что все образующиеся радикалы ОН практически мгновенно расходуются в реакциях с молекулярным водородом с образованием молекул водяного пара. В течение же второй стадии наблюдается резкий рост радикалов ОН, что вызвано увеличением скоростей реакций, в которых образуется данный радикал. Кроме

того, во второй стадии увеличиваются также скорости реакций рекомбинации, что дает резкий рост как концентрации продуктов реакций (см. рис. 4,б), так и температуры смеси (см. рис. 4,а).

На рис. 5 представлены распределения параметров смеси $0.5\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ во времени: температуры смеси (рис. 5,а), концентрации OH (рис. 5,б), концентрации водяного пара H_2O (рис. 5,в). В силановоздушной смеси, так же как и в силановодородовоздушной, время задержки воспламенения смеси изменяется немонотонно, т. е. область отрицательно-

го температурного коэффициента существует и в такой однопаливной смеси. Кроме того, из рис. 5 следует, что воспламенение силановоздушной смеси является также двухступенчатым с сильно выраженной первой стадией (амплитуда первой ступеньки больше, чем в силановодородовоздушной смеси). Ранее в [4] нами было показано, что в структуре детонационных волн в силановоздушных смесях наблюдается немонотонное распределение локальных параметров, вызванное немонотонностью тепловыделения при воспламенении и горении силана. В данном случае на рис. 5 видно такое же немонотонное распределение параметров смеси, вызванное, по всей видимости, тем же самым немонотонным тепловыделением в процессе воспламенения и горения силана. Кроме того, в [6] нами установлено, что добавление водорода в силановоздушную смесь приводит к увеличению времени задержки воспламенения смеси. В данном случае мы получили, что добавление водорода в силановоздушную смесь ослабляет первую стадию воспламенения смеси, т. е. уменьшает суммарное тепловыделение на первой стадии. Вызвано это тем, что часть энергии на первой стадии расходуется на диссоциацию молекулярного водорода.

ВЫВОДЫ

На основе модифицированной физико-математической модели воспламенения смесей силан/водород/воздух рассчитано время задержки воспламенения этих смесей в диапазонах температуры $300 \div 900 \text{ K}$ и давления $0.4 \div 1 \text{ атм}$. Показано, что зависимости времени задержки воспламенения от температуры рассматриваемых смесей имеют немонотонный характер (присутствует область так называемого отрицательного температурного коэффициента), обусловленный конкуренцией быстрых (через радикалы OH) и медленных (через радикалы HO_2) цепей реакций.

Выявлено влияние давления и содержания силана в смеси на протяженность области отрицательного температурного коэффициента в диапазоне изменения температуры. Показано, что увеличение концентрации силана в смеси приводит к смещению области отрицательного температурного коэффициента в сторону больших температур и к увеличению протяженности области отрицательного температурного коэффициента. Увеличение давления смеси не влечет изменения границы начала области

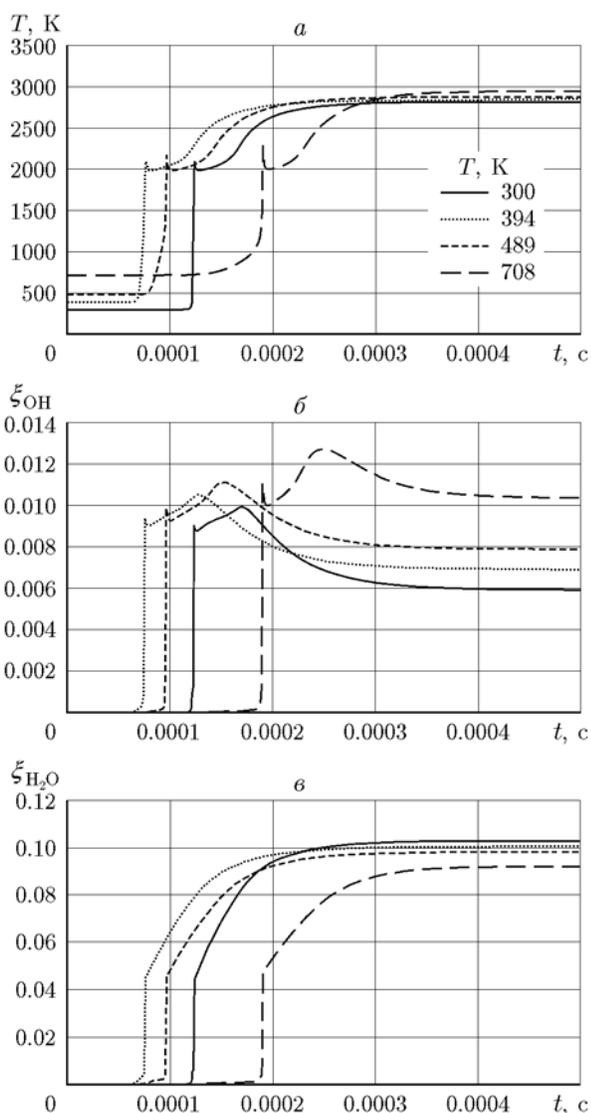


Рис. 5. Зависимость температуры (а), концентраций OH (б) и H_2O (в) в смеси $0.5\text{SiH}_4 + \text{воздух}$ от времени

отрицательного температурного коэффициента, но приводит к сдвигу границы конца данной области в сторону более высоких температур.

Получено, что воспламенение силановоздушной и силановодородовоздушных смесей является двухступенчатым. При этом добавление водорода в силановоздушную смесь приводит к ослаблению первой стадии воспламенения смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бедарев И. А., Фёдоров А. В. Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 1. — С. 26–33.
2. Britten J. A., Tong J., Westbrook C. K. Numerical study of silane combustion // Twenty-Third Symp. (Intern.) on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1990. — P. 195–202.
3. 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 N 2114. — 1983.
4. Тропин Д. А., Фёдоров 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.
5. Тропин Д. А., Фёдоров А. В. Расчет пределов воспламенения смесей силан — кислород и силан — воздух // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 46–51.
6. Тропин Д. А., Фёдоров А. В. Воспламенение двухтопливной смеси водород/силан в воздухе // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 1. — С. 3–10.
7. Tsai H.-Y., Wang Sh.-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.
8. Wilk R. D., Cernansky N. P., Cohen R. S. The oxidation of propane at low and transition temperatures // Combust. Sci. Technol. — 1986. — V. 49. — P. 41–78.
9. Barckholtz T. A. Modeling the negative temperature coefficient in the low temperature oxidation of light alkanes // Amer. Chem. Soc., Div. Fuel Chem. — 2003. — V. 48, N 2. — P. 518–519.
10. Minetti R., Ribaucour M., Carlier M., Fittschen C., Sochet L. R. Experimental and modeling study of oxidation and autoignition of butane at high pressure // Combust. Flame. — 1994. — V. 96. — P. 201–211.
11. Carlier M., Corre C., Minetti R., Pauwels J. F., Ribaucour M., Sochet L. R. Autoignition of butane: a burner and a rapid compression machine study // Twenty-Third Symp. (Intern.) on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1990. — P. 1753.
12. Guang H. Y., Yang Z., Huang Z., Lu X.-C. Experimental study of *n*-heptane ignition delay with carbon dioxide addition in a rapid compression machine under low-temperature conditions // Chin. Sci. Bull. — 2012. — V. 57. — P. 3953–3960.
13. Vranckx S., Heufer K. A., Lee C., Olivier H., Schill L., Kopp W. A., Leonhard K., Taatjes C. A., Fernandes R. X. Role of peroxy chemistry in the high-pressure ignition of *n*-butanol — Experiments and detailed kinetic modelling // Combust. Flame. — 2011. — V. 158. — P. 1444–1455.
14. Sabia P., de Joannon M., Picarelli A., Chinnici A., Ragucci R. Modeling negative temperature coefficient region in methane oxidation // Fuel. — 2012. — V. 91. — P. 238–245.
15. Huang J., Hill P. G., Bushe W. K., Munshi S. R. Shock-tube study of methane ignition under engine-relevant conditions: experiments and modeling // Combust. Flame. — 2004. — V. 136. — P. 25–42.
16. Ranzi E., Faravelli T., Frassoldati A., Cuoci A. CRECK modeling. — 2010. — <http://creckmodeling.chem.polimi.it/C1C31006.CKI>.
17. Zhu Y., Davidson D. F., Hanson R. K. Butanol ignition delay times at low temperatures: An application of the constrained-reaction-volume strategy // Combust. Flame. — 2014. — V. 161. — P. 634–643.
18. Фёдоров 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.
19. 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.
20. Фёдоров 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.
21. 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. — P. 762–768. — DOI: 10.1016/j.jlp.2017.02.029.
22. Slack M., Grillo A. Investigation of hydrogen-air ignition sensitized by nitric oxide and by nitrogen dioxide // NASA Contractor Rep. 2896. — 1977.