

УДК 662.612:32

# ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ДВУХТОПЛИВНОЙ СМЕСИ ВОДОРОД/СИЛАН В ВОЗДУХЕ

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

На основе разработанной ранее модели детальной кинетики рассчитано время задержки воспламенения двухтопливных смесей водород/силан/воздух. Определено влияние концентрации силана и температуры смеси на время задержки воспламенения. Показано, что в диапазоне температуры 1 200 ÷ 2 500 К добавление небольшого количества силана (до 20 %) в водородовоздушную смесь приводит к значительному уменьшению времени задержки воспламенения смеси, а при концентрации силана более 20 % время снижается незначительно.

Ключевые слова: смесь водород/силан/воздух, время задержки воспламенения, детальная химическая кинетика, математическое моделирование.

DOI 10.15372/FGV20170101

## ВВЕДЕНИЕ

Силан является одним из наиболее широко используемых газовых источников кремния в полупроводниковой промышленности, имеет непредсказуемые возможности для зажигания [1, 2] и способен воспламениться при достаточно низкой температуре [3]. С недавнего времени силан рассматривается как инициатор зажигания водорода, используемого в качестве топлива в сверхзвуковых двигателях. Остановимся кратко на кинетических моделях окисления водорода в присутствии силана [4–6].

В [4] на основе разработанной модели детальной химической кинетики окисления силана, учитывающей 78 реакций (39 прямых и 39 обратных), рассчитано время задержки воспламенения смесей силан/водород/кислород/азот, определяемое как время от начала нагрева смеси до резкого повышения давления смеси. Анализ чувствительности кинетических констант в модели кинетики показал, что наибольшее влияние на время задержки воспламенения рассматриваемых смесей оказывает реакция  $\text{SiH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiH}_2\text{O} + \text{OH}$ . Это позволило авторам подобрать значения кинетических констант в этой реакции для описания экспериментальных

зависимостей времени задержки воспламенения смесей силан/водород/кислород/азот от температуры за отраженной ударной волной [5].

Кроме того, в [4] исследовалось влияние добавки силана в смесь водород/кислород/азот на время задержки воспламенения. Были проведены серии расчетов для составов в диапазоне от чистой смеси водород/кислород/азот до чистой смеси силан/кислород/азот. Расчеты показали, что добавление небольшого количества силана — до 20 %  $\text{SiH}_4$  (за 100 %  $\text{SiH}_4$  принимается значение молярно-объемной концентрации силана в стехиометрической силановоздушной смеси) в смесь водород/кислород/азот существенно снижает время задержки ее воспламенения — примерно на порядок при температуре  $T = 1200$  К. Дальнейшее увеличение количества силана в смеси от 20 до 100 % незначительно уменьшает время задержки воспламенения. Таким образом, представленные зависимости времени задержки воспламенения от количества силана в смеси в области его концентраций свыше 20 % выходят на асимптотическое значение, соответствующее времени задержки воспламенения смеси силан/кислород/азот.

В работе [4] получены также распределения концентраций основных компонентов смеси водород/кислород/азот с добавкой 2 % силана при начальной температуре смеси 800 К. Оказалось, что диссоциация силана происходит до того, как начинает распадаться водо-

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00010) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-01947-а).

род. В период диссоциации силана наблюдается рост концентрации радикалов ОН, а также О и Н, которые, в свою очередь, вступают в реакции продолжения цепей с молекулами водорода. За счет появления данных радикалов и уменьшается время задержки воспламенения водорода. Авторы отмечают, что при концентрациях силана более 10 % на воспламенение водорода начинает значительно влиять тепловой эффект — увеличение температуры смеси в реакциях с участием радикалов ОН. При  $T > 1000$  К реакции диссоциации водорода и силана с последующим окислением протекают практически одновременно.

В работе [6] предложена новая модель химической кинетики окисления смесей водород/силан/кислород/азот в диапазонах температуры  $800 \div 1250$  К и давления  $0.5 \div 1.35$  атм, учитывающая 90 элементарных химических реакций (45 прямых и 45 обратных). Используя данную модель, авторы рассчитали время задержки воспламенения и время горения смесей водород/силан/кислород/азот. Задержка воспламенения определялась как время, требуемое для повышения температуры смеси на 5 % от всего увеличения температуры:  $T_0 + 0.05\Delta T$ , где  $\Delta T = T_e - T_0$ ,  $T_e$  — температура в равновесном состоянии,  $T_0$  — начальная температура смеси. Сравнение с экспериментальными данными по времени задержки воспламенения [5] показало их хорошее соответствие.

Кроме того, были построены зависимости времени задержки воспламенения от начальной температуры смеси водород/воздух с различными добавками силана (от 0 до 100 %). Так же, как и в [4], показано, что значительное уменьшение периода задержки воспламенения смеси наблюдается при концентрации силана до 20 %. Рассчитанные в данной работе времена задержки воспламенения при концентрации силана более 2 % на порядок превышают рассчитанные в работе [4], а удовлетворительное соответствие между этими расчетами наблюдается только для смеси с 2 % силана. Таким образом, получено только качественное соответствие результатов расчета по двум моделям детальной кинетики.

Помимо времени задержки воспламенения смесей, в работе [6] было рассчитано также и время горения смеси. Оказалось, что увеличение температуры смеси ведет к уменьшению данного параметра. Кроме того, установлено, что времена горения близки для смесей с коли-

чеством силана до 20 % и на два порядка меньше для чистой силановоздушной смеси (100 % силана). Сравнение времен горения и времен задержек воспламенения показало, что последнее в 10 раз меньше для смесей с содержанием силана более 20 %. А для смесей с 2 % силана задержка воспламенения меньше времени горения в 10 раз при  $T > 1200$  К и превышает время горения в  $2 \div 3$  раза при  $T < 900$  К.

В работе [7] для оценки влияния добавления силана в смесь водород/кислород/азот разработана модель химической кинетики окисления смесей водород/силан/кислород/азот, учитывающая 134 элементарные химические реакции (67 прямых и 67 обратных). На основе этой модели проведены расчеты времени задержки воспламенения рассматриваемых смесей и их сравнение с данными экспериментов [5]. Показано удовлетворительное соответствие результатов для двух смесей: 2 %  $\text{SiH}_4 + 8$  %  $\text{H}_2 + 4$  %  $\text{O}_2 + 86$  %  $\text{N}_2$  и 1.68 %  $\text{SiH}_4 + 6.72$  %  $\text{H}_2 + 6.74$  %  $\text{O}_2 + 84.86$  %  $\text{N}_2$ .

Однако стоит отметить, что для чистой силановоздушной смеси зависимости времени задержки воспламенения, рассчитанные по предложенной модели кинетики, совпадают с аналогичными зависимостями для представленных выше смесей с содержанием силана до 2 %. Вместе с тем в работах [4, 6] показано, что время задержки воспламенения смесей с содержанием силана более 20 % уменьшается, хотя и незначительно (менее чем в два раза), с увеличением доли силана в смеси.

Кроме того, установлено, что добавление перекиси водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$  в смесь водород/кислород/азот приводит к уменьшению времени задержки воспламенения смеси. Так, при добавлении 1.68 %  $\text{H}_2\text{O}_2$  задержка воспламенения сокращается в два раза.

Для полноты описания все рассмотренные модели химической кинетики окисления водорода с силаном и термодинамические параметры смесей приведены в табл. 1.

В данной работе подобные расчеты времени задержки воспламенения смесей водород/силан/воздух проведены по использовавшейся нами ранее модели детальной кинетики [8] в более широком диапазоне термодинамических параметров смеси.

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу о воспламенении сме-

Таблица 1

Модели химической кинетики

Источник	Модель	$p_0$ , атм	$T_0$ , К	Критерий $t_{ign}$	Сопоставление с экспериментом [5]
[4]	78 реакций	1 ÷ 1.35	800 ÷ 1 200	Время увеличения температуры смеси на 5 % от всего повышения температуры	Удовлетворительное соответствие
[6]	90 реакций	0.5 ÷ 1.35	800 ÷ 1 250	—//—	—//—
[7]	134 реакции	1.25 ÷ 1.35	800 ÷ 1 250	Максимум роста температуры со временем	—//—

си водород/силан/воздух за фронтом отраженной ударной волны (УВ). Поскольку поток за фронтом отраженной УВ покоится, физико-математическая модель сводится к следующей: уравнение для температуры смеси (уравнение энергии)

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

замыкаемое уравнением состояния для газовой смеси в целом

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

и кинетическими уравнениями детальной химической кинетики

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

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  $\alpha$ , Дж/(К·кг);  $h_{0\alpha}$  — энтальпия образования компонента  $\alpha$ , Дж/кг;  $k_{fr}$ ,  $k_{br}$  — скорости прямых и обратных реакций;  $l$  — количество реакций;  $m$  — порядок реакции;  $M_{\alpha}$ ,  $M_{\beta}$  — молярные массы компонентов  $\alpha$ ,  $\beta$ , кг/моль;  $N$  — количество компонентов в смеси;  $T_{00}$  — стандартная

температура, К;  $\xi_{\alpha}$ ,  $\xi_{\beta}$  — концентрации компонентов смеси  $\alpha$ ,  $\beta$ ;  $\nu_{\alpha r}$ ,  $\nu_{\beta r}$  — стехиометрические коэффициенты, равные 1, если соответствующий компонент участвует в  $r$ -й реакции, и 0 в противоположном случае;  $\nu'_{\alpha r}$ ,  $\nu'_{\beta r}$  — стехиометрические коэффициенты, относящиеся к продуктам реакции. Начальные данные —  $t = 0$ :  $u = 0$ ,  $p = p_r$ ,  $T = T_r$ ,  $\xi_{\alpha} = \xi_{\alpha 0}$ , где  $p_r$ ,  $T_r$  — давление и температура смеси за отраженной УВ,  $\xi_{\alpha 0}$  — концентрации компонентов смеси за отраженной УВ. Для описания кинетики воспламенения и горения реагирующей смеси силана и воздуха используем несколько модифицированную детальную кинетическую схему [9], которая учитывает 140 прямых и обратных реакций 25 компонентов. Модификация данной модели кинетики, а также термодинамические и кинетические константы подробно описаны в наших предыдущих работах [3, 8]. Отметим, что с помощью данной модели ранее нами были описаны структура детонационной волны, время задержки воспламенения в смесях силан/водород/кислород/азот, пределы воспламенения смесей силан/кислород и силан/воздух [3, 8, 10].

### КРИТЕРИЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Для определения времени задержки воспламенения используется несколько критериев воспламенения [3, 11, 12]. В работах [3, 11, 12] было показано, что различные критерии воспламенения дают очень близкие результаты как для смесей водород/кислород/аргон, так и для смесей силан/водород/кислород/азот/аргон. Поэтому в данной работе мы выбираем один из критериев, а именно время, в течение которого достигается максимум роста температуры смеси, —  $\max \left( \frac{dT}{dt} \right)$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

В работах [4, 6] было показано, что добавление небольшого количества силана (до 20 %  $\text{SiH}_4$ ) в водородовоздушную смесь значительно снижает время задержки воспламенения при низких температурах ( $T \leq 1250$  K). Мы же рассмотрим влияние добавки силана (0.1 $\text{SiH}_4$ ,  $\approx 20$  %  $\text{SiH}_4$ ) в более широком диапазоне температуры ( $T = 1200 \div 2500$  K). На рис. 1 представлены зависимости времени задержки воспламенения смесей водород/воздух ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3.76\text{N}_2$ ) и водород/силан/воздух ( $2\text{H}_2 + 0.1\text{SiH}_4 + \text{O}_2 + 3.76\text{N}_2$ ) от температуры за отраженной УВ. Концентрации компонентов в смесях: водород/воздух —  $\xi_{\text{H}_2} = 0.0283$ ,  $\xi_{\text{O}_2} = 0.2265$ ,  $\xi_{\text{N}_2} = 0.7452$ ; водород/силан/воздух —  $\xi_{\text{H}_2} = 0.02768$ ,  $\xi_{\text{SiH}_4} = 0.02215$ ,  $\xi_{\text{O}_2} = 0.2215$ ,  $\xi_{\text{N}_2} = 0.72867$ . Видно, что добавление 20 % силана в водородовоздушную смесь значительно уменьшает время задержки воспламенения смеси: в два раза при  $T = 1200$  K и в 30 раз при  $T = 2500$  K.

Теперь рассмотрим, как влияет концентрация силана (до 100 %) в водородовоздушной смеси при  $T = 1200 \div 2500$  K на время задержки ее воспламенения. В работе [4] было показано, что при  $T \leq 1200$  K добавление силана в концентрациях более 20 % оказывает слабое влияние. На рис. 2 представлены зависимости времени задержки воспламенения сме-

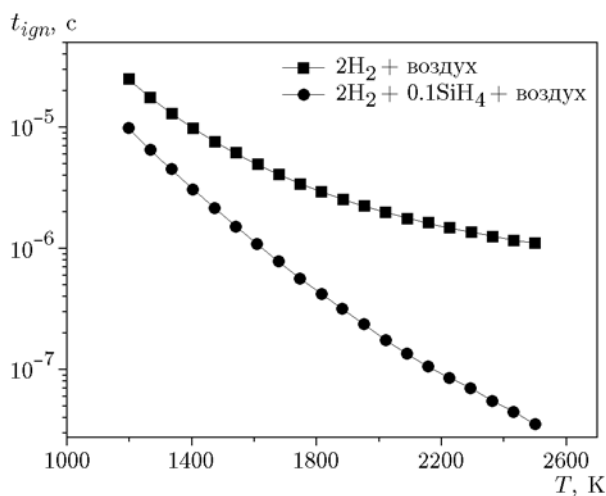


Рис. 1. Зависимость времени задержки воспламенения смесей водород/воздух и водород/силан/воздух от температуры за отраженной УВ

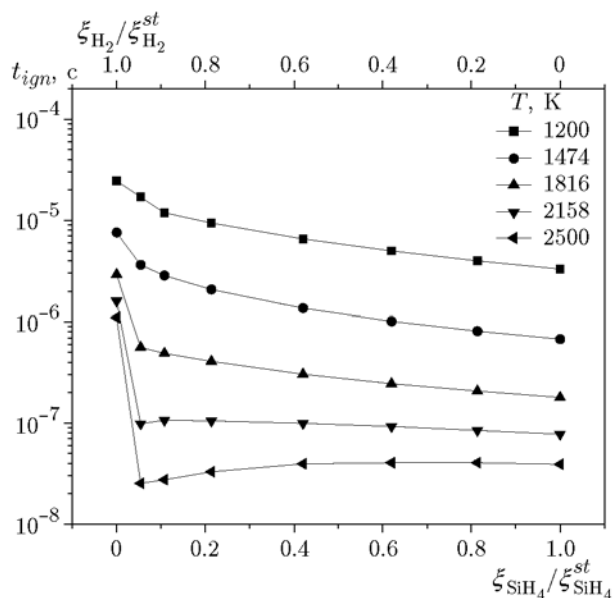


Рис. 2. Зависимость времени задержки воспламенения смесей водород/силан/воздух от концентрации топлива (водорода и силана) в смесях

си водород/силан/воздух от состава горючего (водорода и силана): на верхней оси ординат — отношение массовой концентрации водорода в смеси к массовой концентрации водорода в стехиометрической водородовоздушной смеси, на нижней оси ординат — отношение массовой концентрации силана в смеси к массовой концентрации силана в стехиометрической силановоздушной смеси. Видно, что для всех температур введение небольшого количества силана в водородовоздушную смесь приводит к значительному уменьшению времени задержки воспламенения. При дальнейшем увеличении доли силана в смеси происходит монотонное уменьшение времени задержки воспламенения вплоть до достижения температуры 2200 K, а при  $T > 2200$  K наблюдается выход данных зависимостей на асимптотическое значение, соответствующее времени задержки воспламенения стехиометрической силановоздушной смеси. Таким образом, при высокой температуре ( $T > 2200$  K) наличие водорода в смеси не влияет на задержку воспламенения, все определяется временем задержки воспламенения силана. Кроме того, при концентрации силана более 20 %, такой же как и в работе [4], но при более высокой, чем в [4], температуре (1200 ÷ 2500 K) время задержки воспламенения водородовоздушной смеси сни-

жается незначительно.

На рис. 3 представлены зависимости времени задержки воспламенения от температуры для различных составов смеси водород/силан/воздух (от стехиометрической водородовоздушной до стехиометрической силановоздушной). Видно, что до  $T \approx 2200$  К добавление силана в водородовоздушную смесь приводит к монотонному уменьшению времени задержки воспламенения. Однако при  $T > 2200$  К зависимости пересекаются и наблюдается обратный эффект: малая добавка силана ( $0.1\text{SiH}_4$ ) в водородовоздушную смесь дает большее уменьшение времени задержки воспламенения, чем добавка большего количества силана ( $(0.2 \div 0.5)\text{SiH}_4$ ).

Известно, что зависимость времени задержки воспламенения однопаливной смеси от температуры можно описать стандартной аррениусовской формулой [8, 11, 12]:  $t_{ign} = A \exp(E/RT)$ . Таким образом в переменных  $(\ln(t_{ign}), 1/T)$  данные зависимости представляют собой прямые:

$$\ln t_{ign} = A + \frac{E}{RT}. \quad (4)$$

В случае двухтопливных смесей подобные соотношения с постоянной энергией активации  $E$  могут не выполняться. Так, в работе [13] были построены подобные аппроксимационные формулы для смесей метан/водород/воздух в

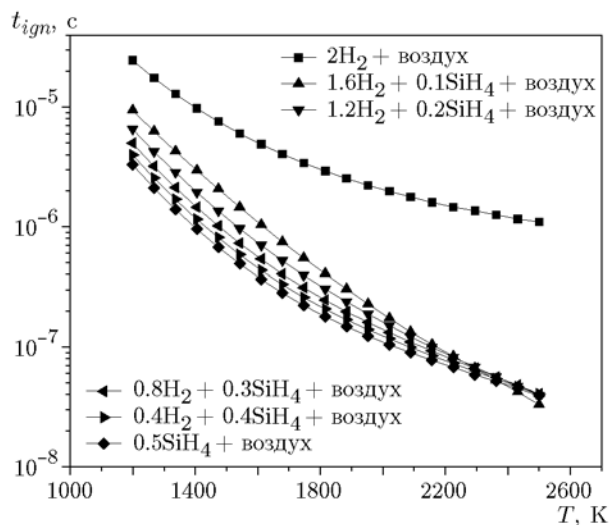


Рис. 3. Зависимость времени задержки воспламенения смеси водород/силан/воздух от температуры

рамках аррениусовской модели, но в предположении зависимости энергии активации  $E$  от концентраций топливных компонентов в смеси. Это позволило описать экспериментальные времена задержки воспламенения рассматриваемых смесей. Поэтому представляется целесообразным построить зависимости логарифма времени задержки воспламенения  $\ln t_{ign}$  смеси водород/силан/воздух от обратной температуры  $1/T$ . Такие зависимости приведены на рис. 4. Видно, что для стехиометрических смесей водород/воздух и силан/воздух зависимости представляют собой прямые и могут быть описаны формулой (4). Кроме того, при содержании силана в смеси от 0.2 до 0.4 эти зависимости также являются прямыми, однако имеют различные углы наклона при различном содержании силана. Это свидетельствует о различии энергий активации этих смесей. То есть энергия активации в данном случае является функцией концентрации силана  $E = E(\xi_{\text{SiH}_4})$ , подобно тому, что наблюдалось в работе [13]. При незначительном содержании силана в смеси ( $(0.05 \div 0.1)\text{SiH}_4$ ) зависимости становятся нелинейными. Можно предположить, что в данном случае энергии активации являются функциями не только концентрации силана, но и температуры —  $E = E(\xi_{\text{SiH}_4}, T)$ . Более четко такую зависимость можно проследить на рис. 5, где представлены результаты расчета времени задержки воспламенения как

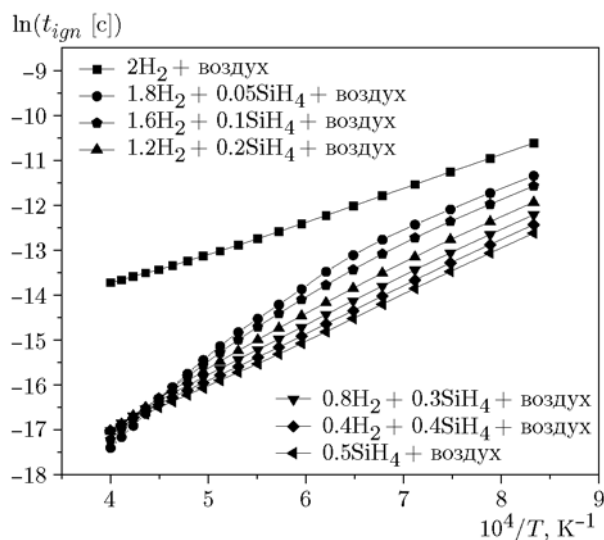


Рис. 4. Зависимость логарифма времени задержки воспламенения смеси водород/силан/воздух от обратной температуры

Таблица 2

Зависимость логарифма времени задержки воспламенения смеси водород/силан/воздух от обратной температуры и концентрации силана

$10^4/T, K^{-1}$	$\ln(t_{ign} [c])$ при $\xi_{SiH_4}/\xi_{SiH_4}^{st}$					
	0	0.2136	0.4202	0.6201	0.8137	1
8.33333	-10.61033	-11.5706	-11.9316	-12.2077	-12.431	-12.6204
7.88644	-10.94989	-11.9762	-12.3627	-12.6486	-12.8755	-13.0655
7.47943	-11.25673	-12.3588	-12.7671	-13.0585	-13.2867	-13.4769
7.11744	-11.53517	-12.7263	-13.1492	-13.4419	-13.6688	-13.8574
6.78426	-11.78736	-13.0851	-13.5102	-13.7996	-14.0232	-14.2071
6.48508	-12.01711	-13.4357	-13.8506	-14.1309	-14.3482	-14.5268
6.20732	-12.22628	-13.7782	-14.1686	-14.4373	-14.6468	-14.8179
5.95593	-12.41433	-14.1045	-14.4646	-14.7194	-14.9181	-15.0796
5.7241	-12.58587	-14.4143	-14.7419	-14.9787	-15.1645	-15.3183
5.50661	-12.74393	-14.7108	-15.0013	-15.2179	-15.3881	-15.5331
5.30786	-12.88335	-15.0013	-15.2468	-15.4375	-15.5934	-15.7261
5.12033	-13.018	-15.2874	-15.4815	-15.645	-15.7852	-15.907
4.94805	-13.13241	-15.5642	-15.7027	-15.8405	-15.9611	-16.0741
4.78698	-13.2389	-15.8254	-15.9192	-16.0228	-16.1282	-16.229
4.63392	-13.34551	-16.0693	-16.1231	-16.1961	-16.2865	-16.373
4.49236	-13.43707	-16.2984	-16.3166	-16.3666	-16.4397	-16.5111
4.3573	-13.50803	-16.5261	-16.5038	-16.5336	-16.5881	-16.6542
4.23191	-13.5844	-16.753	-16.689	-16.6979	-16.7343	-16.7817
4.11184	-13.66709	-16.9856	-16.8731	-16.8521	-16.8838	-16.9166
4	-13.7202	-17.2268	-17.047	-17.022	-17.022	-17.0597

функции концентрации силана и температуры  $t_{ign} = t_{ign}(\xi_{SiH_4}, T)$ , и в табл. 2, в которой представлены значения логарифма времени задержки воспламенения при различных концентрациях силана и температурах. Из рис. 5 видно, что существует несколько областей воспламенения:

- 1) область высоких концентраций силана ( $\xi_{SiH_4}/\xi_{SiH_4}^{st} \in [0.6, 1]$ ), в которой энергия активации зависит только от концентрации силана,
- 2) область средних концентраций силана ( $\xi_{SiH_4}/\xi_{SiH_4}^{st} \in [0.2, 0.6]$ ), в которой энергия активации является функцией концентраций компонентов и температуры смеси,
- 3) область малых концентраций силана ( $\xi_{SiH_4}/\xi_{SiH_4}^{st} \in [0, 0.2]$ ), в которой очень значи-

тельно (в 30 раз) изменяется время задержки воспламенения при высокой температуре и незначительно (в 2 раза) при низкой температуре.

Таким образом, время задержки воспламенения двухтопливной смеси водород/силан/воздух в пространстве  $\left(\ln(t_{ign}), \frac{1}{T}, \frac{\xi_{SiH_4}}{\xi_{SiH_4}^{st}}\right)$  будет описываться, возможно, тремя различными зависимостями  $t_{ign} = t_{ign}(\xi_{SiH_4}, T)$ .

## ВЫВОДЫ

Рассчитано время задержки воспламенения двухтопливных смесей водород/силан/воздух на основе модифицированной ранее модели детальной кинетики [8, 9]. В более широ-

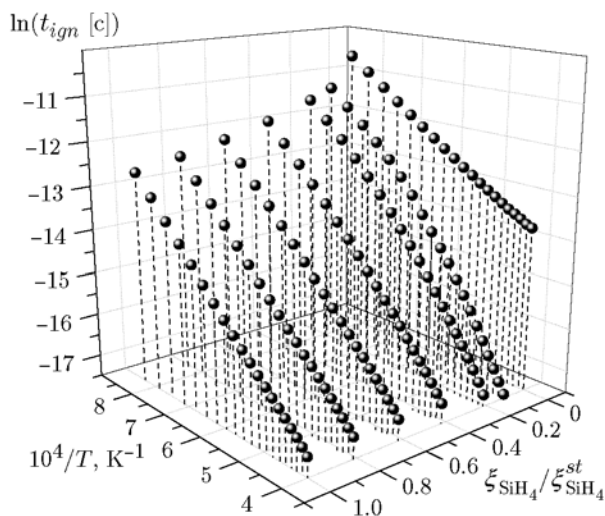


Рис. 5. Зависимость логарифма времени задержки воспламенения смеси водород/силан/воздух от обратной температуры и концентрации силана

ком диапазоне температуры воздействия, чем в предыдущих исследованиях, показано, что добавление до 20 % силана в водородовоздушную смесь значительно уменьшает время задержки воспламенения смеси: в 2 раза при низкой температуре ( $T = 1200$  К) и в 30 раз при высокой температуре ( $T = 2500$  К).

Выявлено влияние концентраций топливных компонентов на процесс воспламенения. По результатам расчета определено:

- во всем рассматриваемом диапазоне температуры (1200 ÷ 2500 К) добавление небольшого количества силана (до 20 %) в водородовоздушную смесь приводит к значительному уменьшению времени задержки воспламенения смеси;
- добавление силана более 20 % незначительно снижает время задержки воспламенения водородовоздушной смеси, т. е. наличие водорода в смеси не влияет на задержку воспламенения, все определяется временем задержки воспламенения силана.

Оказалось, что до температуры порядка 2200 К добавление силана в водородовоздушную смесь приводит к монотонному уменьшению времени задержки воспламенения по мере увеличения количества силана в смеси. При температуре выше 2200 К небольшое добавление силана (до 20 %) в водородовоздушную смесь дает значительное уменьшение времени задержки воспламенения по сравнению со смесями с большим содержанием силана.

Показано, что для двухтопливных смесей водород/силан/воздух существует три области воспламенения:

- 1) область, в которой энергия активации задержки воспламенения зависит только от концентрации силана (в диапазоне его концентраций 60 ÷ 100 %);
- 2) область, в которой энергия активации задержки воспламенения является функцией концентраций компонентов и температуры смеси (при концентрациях силана 20 ÷ 60 %);
- 3) область, в которой очень существенно изменяется время задержки воспламенения при высокой температуре (в 30 раз) и незначительно (в 2 раза) при низкой температуре (при концентрациях силана 0 ÷ 20 %).

## 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., Tsaur 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., Фёдоров А. В.** Расчет пределов воспламенения смесей силан — кислород и силан — воздух // *Физика горения и взрыва.* — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 46–51.
4. **Jachimowski C. J., McLain A. G.** A Chemical kinetic mechanism for the ignition of silane/hydrogen mixtures // *NASA Tech. Paper 2129.* — 1983.
5. **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.
6. **Chinitz W.** Theoretical studies of the ignition and combustion of silane — hydrogen — air mixtures // *NASA Contractor Rep. 3876.* — 1985.
7. **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.
8. **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.
9. **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.
10. **Фёдоров А. В., Фомин П. А., Тропин Д. А., Чен Д. Р.** Моделирование опасности

- взрыва и смягчение его последствий в силано-воздушных смесях // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 9-10. — С. 108–125.
11. **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 Publishing, 2012.
  12. **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.
  13. **Cheng R. K., Oppenheim A. K.** Autoignition in methane — hydrogen mixtures // Combust. Flame. — 1984. — V. 58. — P. 125–139.

*Поступила в редакцию 18/III 2016 г.,  
в окончательном варианте — 8/IV 2016 г.*

---