

# ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ГАЗОВЗВЕСИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ.

## II. УЧЕТ РЕАКЦИИ ПРЕДПЛАМЕННОГО ОКИСЛЕНИЯ

Ю. А. Гостеев, А. В. Федоров, А. В. Шульгин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск, gosteev@itam.nsc.ru

Дискретно-континуальная математическая модель распространения волн горения в аэровзвесах реагирующих частиц, развитая ранее, дополнена учетом процесса предпламенного окисления. Это позволило удовлетворительно описать некоторые количественные характеристики пламени в смесях воздуха и частиц магния.

Ключевые слова: металлические частицы, газовзвесь, пламя, дискретно-континуальная модель, математическое моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] развита одномерная математическая модель распространения пламени в газовзвеси металлических частиц, основанная на дискретно-континуальном подходе. На ее основе изучены характеристики волны горения в пространственно-неоднородных и полидисперсных смесях частиц магния в воздухе. В определенном диапазоне размеров частиц модель удовлетворительно описывает экспериментальные данные по скорости пламени в зависимости от размера частиц. В настоящей работе математическая модель [1] дополняется учетом реакции предпламенного окисления с целью улучшения предсказания локальных и интегральных характеристик пламени.

### 1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Дополнительно к предположениям математической модели горения цепочки частиц в сосуде [1] будем считать, что все тепло гетерогенной химической реакции воспламенения выделяется в дисперсной фазе. Уравнения (4)–(6) из [1] видоизменяются в соответствии с уравнениями:

$$\frac{dh_{p,i}}{dt} = K_0 \xi_{11} \exp\left(-\frac{E_a}{R_\mu T_{p,i}}\right) \text{ при } \chi_i = 0, \quad (1)$$

изменения радиуса металлического ядра

$$\frac{dr_{p,i}}{dt} = \begin{cases} -\frac{r_{p,i}}{t_{r,i}}, & \chi_i > 0, \\ -\frac{1}{1 - a(r_{p,i}/R_{p,i})^2} \frac{dh_{p,i}}{dt}, & \chi_i = 0, \end{cases} \quad (2)$$

притока тепла к  $i$ -й частице

$$c_2 M_{p,i} \frac{dT_{p,i}}{dt} = \begin{cases} -S_{p,i} Q_i, & \chi_i > 0, \\ -S_{p,i} Q_i - S_{p,i} q_a \rho_{22}^0 \frac{dr_{p,i}}{dt}, & \chi_i = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $q_a$  — теплота реакции воспламенения на единицу массы топлива, остальные уравнения, обозначения, постановка задачи и метод решения приведены в [1].

### 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполнены расчеты распространения пламени в монодисперсных смесях частиц магния в воздухе. Начальный диаметр частиц  $d_{p,0} = 1 \div 100$  мкм. Средняя плотность дисперсной фазы  $\rho_{2,0} = 0,16 \div 0,42$  кг/м<sup>3</sup>. Температура очага инициирования  $T_{ini} = 3000$  К. Кинетические параметры реакции предпламенного окисления выбраны в соответствии с [2]:  $K_0 = 26,7$  м/с,  $E_a = 3,54 \cdot 10^6$  Дж/моль. Теплота реакции  $q_a = 2,49 \cdot 10^7$  Дж/кг.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 03-01-00453).

Влияние реакции предпламенного окисления на характеристики пламени в монодисперсной цепочке частиц магния ( $\rho_{2,0} = 0,16 \text{ кг/м}^3$ )

$d_{p,0}$ , мкм	$t_{ign,1}$ , мс		$T_{max}$ , $10^3 \text{ К}$		$l_f$ , мкм		$u_f$ , м/с	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$3,15 \cdot 10^{-3}$	2,32	2,39	42,6	40,2	2,244	2,762
5	0,093	0,081	2,37	2,48	231,6	208,4	0,475	0,581
10	0,353	0,317	2,41	2,48	392,4	338,2	0,254	0,324
15	0,784	0,703	2,37	2,49	638,5	543,6	0,172	0,252
20	1,358	1,242	2,39	2,51	740,0	604,0	0,141	0,217
30	3,014	2,773	2,43	2,54	1235	960,8	0,091	0,144
50	8,174	7,639	2,50	2,55	1944	1463	0,076	0,123

Примечание. 1 и 2 — данные расчетов соответственно без учета и с учетом реакции воспламенения.

### Интегральные характеристики. Верификация

В расчетах контролировались следующие параметры: время воспламенения  $t_{ign,1}$  первой в цепочке частицы, максимальная температура газа  $T_{max}$  в волне горения, скорость распространения  $u_f$  и ширина  $l_f$  волны горения. Последняя определялась по формуле

$$l_f = \frac{T_{max} - T_0}{\max_{0 \leq x \leq L} |\partial T / \partial x|}$$

Как видно из таблицы, учет дополнительного тепла, выделяемого в процессе воспламенения, уменьшает, естественно, задержку воспламенения частиц и увеличивает скорость пламени на  $22 \div 62 \%$ , и этот эффект проявляется сильнее в случае цепочки более крупных частиц.

Для первой частицы, которая находится в зоне инициирования, период индукции сокращается на  $16 \%$  при  $d_{p,0} = 1 \text{ мкм}$ . С увеличением размера частиц период индукции уменьшается в меньшей степени — на  $6 \%$  при  $d_{p,0} = 50 \text{ мкм}$ .

Ширина волны горения  $l_f$  составляет примерно  $30 \div 46$  размеров частиц, и поэтому в смеси с более крупными частицами пламя утолщено. Так как волна горения состоит из зоны индукции (с шириной, пропорциональной  $t_{ign}$ ) и зоны химического превращения [1], то при учете реакции предпламенного окисления происходит соответствующее уменьшение ширины пламени, на  $6 \div 25 \%$  (см. таблицу), и оно тем больше, чем крупнее частицы. Отметим, что в

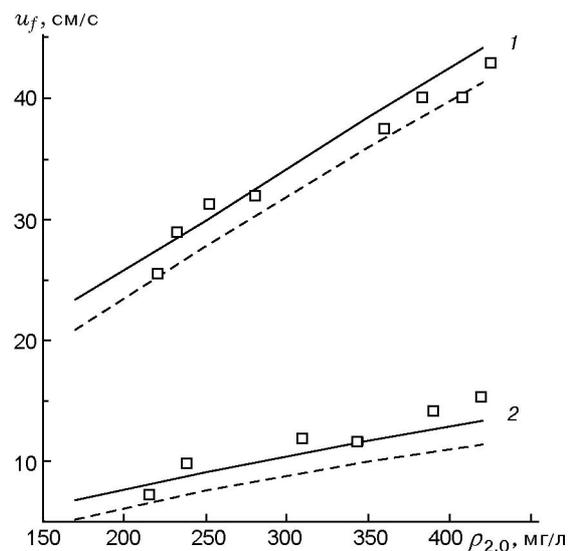


Рис. 1. Влияние средней плотности дисперсной фазы на скорость волны горения в смеси воздуха и частиц магния:

значки — данные [3], линии — расчет без учета (штриховые) и с учетом (сплошные) реакции воспламенения;  $d_{p,0} = 15$  (1) и  $70 \text{ мкм}$  (2)

случае  $d_{p,0} = 50 \text{ мкм}$ ,  $\rho_{2,0} = 0,42 \text{ кг/м}^3$  расчет дает значение  $l_f/d_{p,0} = 30,6$ , которое соотносится с теоретической оценкой  $l_f/d_{p,0} \approx 35$ , приведенной в [3].

На максимальную температуру газовой фазы действие реакции предпламенного окисления оказывает небольшое влияние:  $T_{max}$  возрастает в среднем на  $3 \div 5 \%$ .

Оценим влияние начальной массовой концентрации (рис. 1) и размера частиц (рис. 2) на

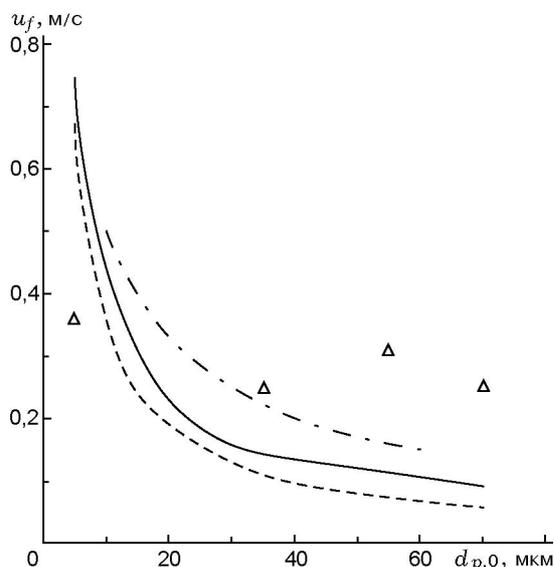


Рис. 2. Влияние начального размера частицы на скорость пламени в смеси воздуха и частиц магния ( $\rho_{2,0} = 0,2 \text{ кг/м}^3$ ):

значки — эксперимент [4], штриховая и сплошная линии — расчет соответственно без учета и с учетом реакции воспламенения, штрихпунктирная — расчет [4]

скорость пламени. Как видно из этих рисунков, учет реакции предпламенного окисления в целом позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные [3, 4]. Заметим, что значения  $u_f$  в указанных работах имеют некоторые расхождения.

### Локальные характеристики

Рассмотрим изменения пространственных распределений параметров смеси, вызванные протеканием реакции воспламенения. Структура пламени в цепочке частиц с  $d_{p,0} = 5 \text{ мкм}$  приведена на рис. 3 в виде распределений температур фаз по пространству. На рисунке видны количественные изменения волны горения, описанные выше. Отличие имеется в зоне воспламенения, протяженность которой сокращается по сравнению с ранее рассмотренным случаем, что вызвано выделением тепла в ходе реакции низкотемпературного окисления магния. Качественных изменений в пространственных распределениях параметров не наблюдается. Об этом свидетельствуют также термограммы первой частицы ( $d_{p,0} = 5 \text{ мкм}$ ), приведенные на рис. 4. Влияние реакции воспламенения начинает заметно сказываться лишь при достаточно высокой температуре частицы

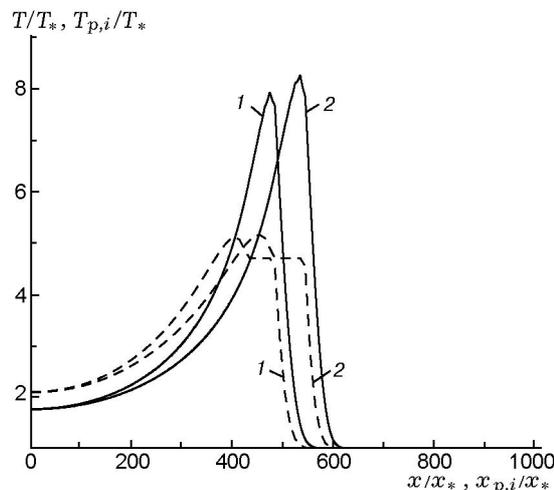


Рис. 3. Влияние процесса предпламенного окисления на структуру пламени в цепочке частиц магния ( $d_{p,0} = 5 \text{ мкм}$ ,  $\rho_{2,0} = 0,16 \text{ кг/м}^3$ ):

сплошные линии —  $T/T_*$ , штриховые —  $T_{p,i}/T_*$ , 1 и 2 — соответственно без учета и с учетом реакции воспламенения

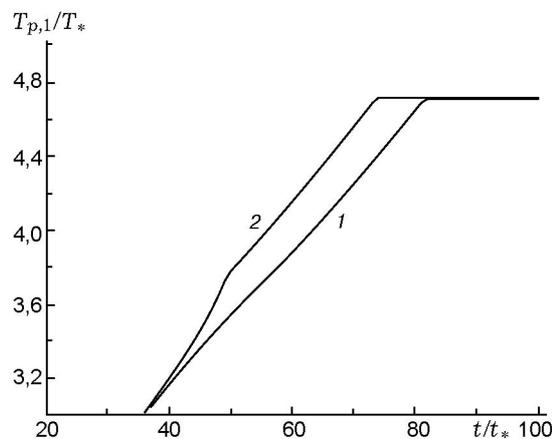


Рис. 4. Фрагмент тепловой истории первой частицы ( $d_{p,0} = 5 \text{ мкм}$ ,  $\rho_{2,0} = 0,16 \text{ кг/м}^3$ ):

1 и 2 — см. рис. 3

( $T_{p,1} \approx 3T_*$ ) — укорачивается задержка воспламенения (на  $\approx 10\%$ ); затем следует стадия горения, длительность которой в обоих случаях одинакова.

### Критические параметры

Действие нелинейного источника тепла на стадии прогрева частицы (см. (2)) может привести к воспламенению частицы двумя путями. Ввиду того, что прогрев частиц происходит в переменном поле температуры газовой фазы, а теория воспламенения образцов металлов для

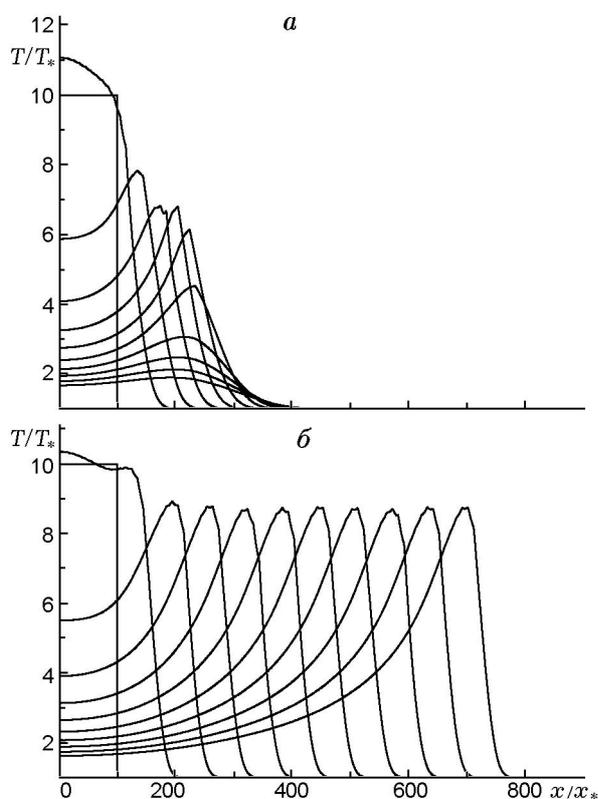


Рис. 5. Влияние реакции воспламенения на иницирование пламени (распределение температуры газа) ( $d_{p,0} = 100$  мкм,  $T_{ini} = 1323$  К):

*a* — расчет без учета реакции воспламенения, *b* — с учетом реакции воспламенения

такого случая не разработана, последующие рассуждения носят качественный характер. Возможен либо (*a*) «регулярный», безвзрывной нагрев частицы до температуры, превышающей температуру воспламенения  $T_{ign,i}$ , либо (*b*) тепловой взрыв [2]. Если локальная температура газа недостаточно высока, то воспламенения по варианту (*a*) не происходит. При невыполнении критических условий теплового взрыва не происходит воспламенения частицы по механизму (*b*). Так, в наших расчетах при  $d_{p,0} = 100$  мкм,  $T_{ini} = 1323$  К иници-

рование волны горения происходило только при воздействии процесса предпламенного окисления (рис. 5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена дискретно-континуальная математическая модель распространения волн горения в аэрозвесах реагирующих частиц с учетом процесса предпламенного окисления. В данной математической модели источники тепла (частицы) дискретны и имеют малые, но конечные размеры. При этом глобальная кинетическая схема окисления одиночной частицы позволяет удовлетворительно описать некоторые характеристики пламени в ансамбле частиц.

Показано, что учет реакции предпламенного окисления расширяет область применимости дискретно-континуальной модели пламени для аэрозвесей частиц магния. В частности, получено удовлетворительное совпадение расчетных и опытных данных по зависимости скорости пламени от размера и начальной массовой концентрации частиц.

Оказалось, что ширина волны горения в смеси частиц магния в воздухе пропорциональна десяткам размеров частиц, что соответствует экспериментальным данным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гостеев Ю. А., Федоров А. В. Дискретно-континуальная модель распространения пламени в газозвеси металлических частиц. I. Одномерное приближение // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 2. С. 81–93.
2. Федоров А. В. Численно-аналитическое исследование воспламенения частиц магния // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 1. С. 75–84.
3. Ballal D. R. Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity // Proc. Roy. Soc. Lond. 1983. V. A385. P. 21–51.
4. Деревяга М. Е., Стесик Л. Н., Федорин Э. А. Режимы горения магния // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 5. С. 3–10.