

УДК 536.46

## ЛАМИНАРНОЕ ПЛАМЯ В ПОЛИДИСПЕРСНЫХ АЭРОВЗВЕСЯХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

А. С. Опарин, А. Е. Сидоров, В. Г. Шевчук

Институт горения и нетрадиционных технологий Одесского национального университета  
им. И. И. Мечникова, 65082 Одесса, Украина, makload@mail.ru

Экспериментально и теоретически исследована зависимость нормальной скорости пламени в полидисперсных аэровзвесах частиц алюминия от параметров функции распределения частиц по размерам. Показано, что скорость убывает с увеличением дисперсии функции распределения в результате уменьшения удельной реакционной поверхности.

Ключевые слова: ламинарное пламя, нормальная скорость, полидисперсность, алюминий.

DOI 10.15372/FGV20150603

Нормальная скорость распространения пламени является фундаментальной характеристикой предварительно перемешанных смесей горючего с окислителем. Если для однородных газовых смесей эта характеристика зависит только от состава смеси, то для аэровзвесей (пылей) она зависит также от дисперсных характеристик распыленного горючего. Это прежде всего концентрация и размер частиц [1, 2]. Кроме того, определенное влияние оказывают форма частиц [3] (скорость пламени в аэровзвесах частиц с развитой поверхностью выше таковой для сферических частиц) и состав горючего (гибридные смеси, состоящие из различных твердых горючих, например аэровзвеси Al + Mg, Al + B, Al + Fe и др.) [4]. Неисследованным остается влияние параметров функции распределения частиц по размерам. Из общих соображений легко понять, что увеличение ширины (дисперсии) этой функции должно приводить к уменьшению удельной реакционной поверхности горючего в смеси и, следовательно, к уменьшению интенсивности тепловыделения в волне горения, т. е. в конечном счете к уменьшению скорости распространения пламени.

В данной работе предпринята попытка экспериментально исследовать влияние дисперсии функции распределения на нормальную скорость распространения пламени в аэровзвесах частиц алюминия. Выбор именно алюминия в качестве объекта исследования не случаен. Температура воспламенения частиц алюминия не зависит от их размера и равна темпе-

ратуре плавления оксида алюминия [5]. Это существенно упрощает задачу, поскольку в противном случае мы имеем дело с более сложной и не поддающейся аналитическому описанию задачей воспламенения полидисперсной совокупности частиц в предпламенной зоне [2].

В качестве базовой функции распределения частиц по размеру  $r$  выбрано логарифмически-нормальное распределение

$$F(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma r} \exp \frac{\ln r - \ln m}{2\sigma^2}, \quad (1)$$

где  $m$  — медианный размер, определяемый как  $\ln m = \overline{\ln r}$ ,  $\sigma = \sqrt{(\overline{\ln r - \ln m})^2}$  — дисперсия, чертой обозначено осреднение функции распределения.

Естественно, что основная проблема состояла в получении набора порошков с одинаковым медианным размером частиц и различной дисперсией. Эта задача решалась путем смешения двух исходных порошков АСД-1 и АСД-4 (в том числе и предварительно рассеянных с целью уменьшения значения  $\sigma$  для каждого из них) в различных массовых соотношениях. Распределение частиц строилось с помощью автоматического счетчика частиц (счетное количество  $\approx 20\,000$  частиц). Затем отбирали порошки с одномодовой функцией распределения и практически равным медианным размером. Дисперсные характеристики одного из таких образцов следующие:  $r_{10} = 4.7$  мкм,  $r_{20} = 5.94$  мкм,  $r_{30} = 7.92$  мкм,  $m = 3.05$  мкм,  $\sigma = 0.85$ .

Эксперименты по исследованию распространения пламени в малообъемных пылевых облаках проводили по методике, изложенной в [6].

Аэровзвесь создавалась путем пневмоимпульсного впрыска заданной навески порошка в контролируемый объем ( $V = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ) внутри тонкостенного резинового зонда. Специальная конструкция распылителя обеспечивала практически полную дезагрегацию порошка и равномерное заполнение объема. Центральное зажигание облака осуществлялось индукционной электрической искрой. Процесс регистрировался скоростной видеокамерой с частотой 600 кадр/с. Проводилась автоматическая поккадровая обработка видеозаписи распространения пламени (определялись площадь, а затем средний радиус зоны горения, что соответствует осреднению по углу  $2\pi$ ). На полученных зависимостях радиуса фронта пламени от времени выбирался линейный участок, соответствующий ламинарному режиму распространения пламени, и находилась видимая скорость пламени  $v = \frac{dr}{dt}$ . Нормальную скорость определяли как  $v_n = v/\varepsilon$ , где  $\varepsilon = T_b/T_0$  — адиабатическая степень расширения продуктов сгорания,  $T_b$  — температура горения,  $T_0$  — начальная температура. Концентрация горючего в опытах составляла  $B = 300 \text{ г/м}^3$ . Результирующую нормальную скорость находили как среднее значение по результатам семи опытов. Типичная видеодиаграмма распространяющегося фронта пламени приведена на рис. 1.

Обратимся к анализу результатов проведенных экспериментов (рис. 2).

В работе [1] предложена так называемая широкозонная модель ламинарного пламени в монодисперсных пылях, в соответствии с которой предполагается, что поток тепла из зоны горения в предпламенную зону формирует-

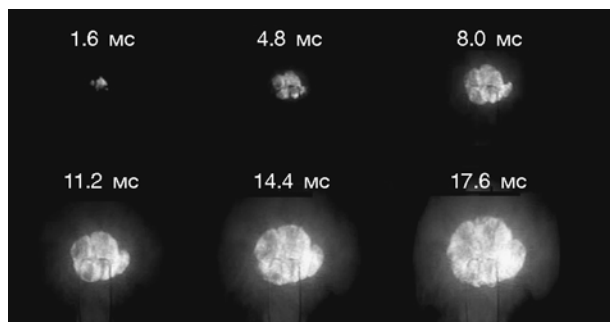


Рис. 1. Кадры видеодиаграммы распространения пламени по аэровзвеси частиц алюминия

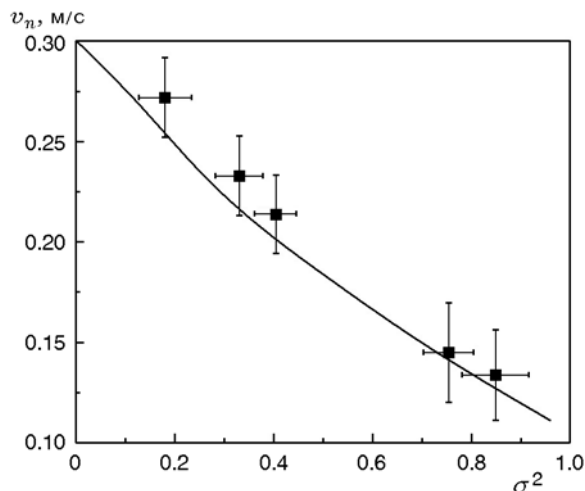


Рис. 2. Зависимость нормальной скорости пламени от ширины функции распределения (линия — расчет по (3),  $B = 300 \text{ г/м}^3$ ,  $m = 3 \text{ мкм}$ )

ся именно на границе этих зон при максимальной мощности тепловыделения на горящих частицах. Получено следующее выражение для нормальной скорости пламени диффузионно горящих частиц:

$$v_n^2 = \frac{3Q\rho_g Da M_{O_2} k \alpha_{st} B}{(c_g \rho_g + c_s B)[1 + c_s B / (c_g \rho_g)] \rho_s r_0^2 (T_s^* - T_0)} \quad (2)$$

Здесь  $Q$  — тепловой эффект на единицу массы горючего,  $D$  — коэффициент диффузии окислителя в воздухе,  $a$  — коэффициент температуропроводности воздуха,  $\alpha_{st}$  — стехиометрический коэффициент,  $M_{O_2}$  — массовая доля кислорода,  $c_g$  и  $c_s$  — теплоемкость воздуха и горючего,  $\rho_s$  и  $\rho_g$  — плотность горючего и воздуха,  $T_s^*$  — температура воспламенения,  $r_0$  — радиус частиц,  $k$  — отношение радиуса зоны горения индивидуальной части к ее радиусу. Для учета полидисперсности выполним замену  $r_0^2 = e^{2m} e^{2\sigma}$ . Тогда имеем выражение

$$v_n^2 = \frac{3Q\rho_g Da M_{O_2} k \alpha_{st} B}{(c_g \rho_g + c_s B)[1 + c_s B / (c_g \rho_g)]} \times \frac{1}{\rho_s (T_s^* - T_0) e^{2m} e^{2\sigma}}, \quad (3)$$

в соответствии с которым нормальная скорость пламени при заданном медианном размере частиц  $m$  убывает с увеличением дисперсии  $\sigma$ .

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений при  $B = 300 \text{ г/м}^3$  и  $m =$

3 мкм приведено на рис. 2. Значения входящих в (3) параметров полагались следующими:  $\rho_s = 2.7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $Q = 3 \cdot 10^4$  кДж/кг,  $\alpha = 1.125$ ,  $M_{O_2} = 0.23$ ,  $T_b = 3100$  К,  $T_0 = 300$  К,  $T_s^* = 2300$  К [5],  $k = 3.5$  [7].

В расчетах теплофизические характеристики воздуха взяты при  $T_0 = 300$  К. Это позволяет избежать неопределенности при их выборе, поскольку более строго параметр  $a$  нужно выбирать при температуре между  $T_0$  и  $T_b$ , в то время как  $D$  — при температуре между  $T_s^*$  и  $T_b$ . В любом случае приведенные выше значения параметров занижают расчетную зависимость. Если перестроить экспериментальные данные в координатах  $\ln v^2 - \sigma^2$ , то угловой коэффициент полученной зависимости оказывается равным 1.97, а его теоретическое значение равно 2.

Проведенное экспериментальное и теоретическое исследование показывает, что существенным управляющим параметром нормальной скорости пламени в газозвесах частиц твердых горючих является дисперсия функции распределения частиц по размерам. Для аэрозвесей, в частности для алюминия, продемонстрировано снижение нормальной скорости пламени с увеличением дисперсии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров А. Е., Шевчук В. Г. Ламинарное пламя в мелкодисперсных пылях // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 5. — С. 24–28.
2. Гостеев Ю. А., Федоров А. В. Дискретно-континуальная модель распространения пламени в газозвеси металлических частиц. Одномерное приближение // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 2. — С. 81–93.
3. Сидоров А. Е., Кондратьев Е. Н., Бойчук Л. В., Шевчук В. Г. Влияние формы частиц на горение пылей // Физика аэродисперсных систем. — 2005. — Вып. 41. — С. 223–228.
4. Бойчук А. В., Горошин С. В. Горение двухфракционной газозвеси // Тепломассообмен в химически реагирующих средах: материалы междунар. школы-семинара. — Минск, 1989. — Ч. 3. — С. 158–165.
5. Friedman R., Maćek A. Ignition and combustion of aluminium particles in hot gases // Combust. Flame. — 1962. — V. 6. — P. 9–19.
6. Шевчук В. Г., Безродных А. К., Бойчук Л. В., Кондратьев Е. Н. О механизме ламинарного пламени в аэрозвесах металлических частиц // Физика горения и взрыва. — 1988. — Т. 24, № 2. — С. 85–89.
7. Бекстед М. В., Лианг У., Паддупаккам К. В. Математическое моделирование горения одиночной алюминиевой частицы (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 6. — С. 15–33.

Поступила в редакцию 9/VIII 2014 г.