

*А. Е. Сидоров, Е. Н. Кондратьев,
Л. В. Бойчук, В. Г. Шевчук*

*Институт горения и нетрадиционных технологий
Одесского национального университета им. И.И. Мечникова.*

Влияние формы частиц на горение пылей

В работе, на примере аэрозвесей частиц магния сферической и неправильной формы, экспериментально показано, что развитая форма частиц обуславливает возрастание нормальной скорости пламени в пылях. Термопарными измерениями в волне горения подтвержден преимущественно кондуктивный механизм теплопередачи для горящей пыли.

Процессы горения предварительно перемешанных газофазных смесей и пылей характеризуются значительной газодинамической аналогией, проявляющейся в существовании для обоого типа горючих систем ламинарного, вибрационного, турбулентного, детонационного и переходных между ними режимов распространения пламени. [1] Это обусловлено тем, что реализация указанных режимов в обоих случаях зависит от конкретной гидродинамической ситуации при организации процесса горения, связанной с внешним масштабом системы, например, диаметром реакционной трубы или горелки, радиусом облака, загруженностью канала, местом поджига и т.д.

Однако, в отличии от газообразных систем, где горючее и окислитель перемешаны на молекулярном уровне, в пылях существуют внутренние микроскопические масштабы, определяемые размерами частиц пыли и расстояниями между ними. Это обуславливает существование целого ряда характерных для пыли явлений, таких как существенная зависимость от размера частиц (при заданном значении концентрации горючего) скоростей распространения пламени, минимальных энергий зажигания, концентрационных пределов реализации указанных режимов. [1]

Из общих физических соображений следует, что, на ряду с размером частиц, существенное влияние на скорость горения должна оказывать и форма частиц горючей пыли. Действительно, в [2] показано, что удельная реакционная поверхность твердой фазы, зависящая как от размера частиц, так и от их формы (степени развитости поверхности), является управляющим параметром для процессов воспламенения, волнового и диффузионного горения пыли.

Вместе с тем исследования влияния формы частиц пыли на процесс распространения в ней пламени не проводились.

В данной работе подобные экспериментальные исследования проведены

для аэровзвесий частиц магния сферической и неправильной формы. В качестве исходных порошков использовался сферический полидисперсный порошок магния и фрезерованный магниевый порошок марки МПФ-4 (частицы в виде стружек, дендриты различной конфигурации с шероховатой поверхностью и острыми кромками и углами). Предварительно на центробежном сепараторе отсеивались фракции частиц с размером меньше 20 мкм, а затем производился ситовой рассев крупной фракции. Последующие опыты проводились с двумя фракциями сферического порошка со средними диаметрами $d_{10}=70$ и 135 мкм и фрезерованным магнием с размерами 80÷140 мкм. Фактически сферический магний соответствовал нижней и верхней границе фрезерованного магния.

Опыты проводились в вертикальных трубах длиной 3,5 м и диаметром 5,6 см по методике описанной в [3]. Взвесь создавалась у верхнего закрытого конца трубы с помощью дискового дозатора и центробежного распылителя и подавалась в трубу со спутным потоком, имеющим скорость $V_{\text{сп}} = 0,36$ м/с. Зажигание производилось у нижнего открытого конца трубы с помощью пиротехнического состава. Продукты сгорания свободно оттекали от фронта пламени, не возмущая последний.

Видимая скорость пламени, как сумма скорости спутного потока и собственно скорости распространения пламени по отношению к стенкам трубы, оставалась практически постоянной вдоль всей реакционной трубы для всех испытанных фракций и массовых концентраций. Флуктуации скорости пламени вдоль трубы не превышали 5÷8% от ее среднего значения и обусловлены местными флуктуациями плотности взвеси. Среднеквадратичная ошибка измерений видимой скорости составляет по результатам серий 5÷9 опытов (при фиксированной концентрации горючего) приблизительно 2÷8%. Концентрация горючего во взвеси определялась методом отсечки контрольного объема с последующим взвешиванием осевшего порошка, погрешность ее определения не превышала 10%.

Форма и структура пламени исследовалась с помощью скоростной кино съемки небольшого участка трубы при его прохождении пламенем. Форма фронта близка к параболоиду вращения, обращенного вершиной в исходную смесь. Основание параболоида не занимает всего сечения трубы и отстоит от стенок на 5÷8 мм — темная зона (для крупных частиц это расстояние больше, чем для мелких). Отношение площади поверхности пламени к площади его сечения k зависит от размера частиц и практически не зависит от массовой концентрации. Это величина в наших опытах составила: $k=3\pm 0,5$ для сферического магния с $d_{10}=70$ мкм, $k=5,6\pm 0,6$ для сферического магния $d_{10}=135$ мкм и $k=4,0\pm 0,7$ для фрезерованного магния.

Экспериментальные данные по зависимости видимой скорости пламени от массовой концентрации магния приведены в таблице.

Уже из данных таблицы видно, что аэровзвеси частиц неправильной формы в целом превосходят по своей активности в отношении распростра-

нения по ним волны горения соответствующие аэровзвеси сферических частиц. Однако, количественные сопоставления правомочны только для нормальных скоростей пламени, иначе мы приходим к парадоксальному, на первый взгляд, выводу, что скорость пламени возрастает с увеличением размера сферических частиц. Поэтому приведем представленные в таблице значения

видимой скорости пламени к ее нормальным значениям $V_n = \frac{V_a}{k}$ — (рис.1).

Таблица

$d_{10}=70\text{мкм}$		$d_{10}=135\text{мкм}$		МПФ, $d_{10}=80\text{ч}140\text{мкм}$	
$B, \text{г/м}^3$	$V_B, \text{м/с}$	$B, \text{г/м}^3$	$V_B, \text{м/с}$	$B, \text{г/м}^3$	$V_B, \text{м/с}$
77 ± 4	$0,52 \pm 0,02$	92 ± 4	$0,57 \pm 0,01$	39 ± 6	$0,49 \pm 0,05$
115 ± 3	$0,53 \pm 0,01$	132 ± 4	$0,6 \pm 0,02$	79 ± 23	$0,69 \pm 0,05$
182 ± 5	$0,57 \pm 0,02$	220 ± 6	$0,67 \pm 0,02$	90 ± 12	$0,72 \pm 0,06$
210 ± 5	$0,57 \pm 0,02$	260 ± 7	$0,71 \pm 0,02$	142 ± 12	$0,73 \pm 0,06$
234 ± 5	$0,58 \pm 0,02$	345 ± 15	$0,7 \pm 0,03$	189 ± 20	$0,99 \pm 0,07$
278 ± 14	$0,63 \pm 0,02$			240 ± 25	$1,06 \pm 0,08$
324 ± 4	$0,68 \pm 0,03$			300 ± 30	$1,16 \pm 0,08$
395 ± 8	$0,74 \pm 0,02$				

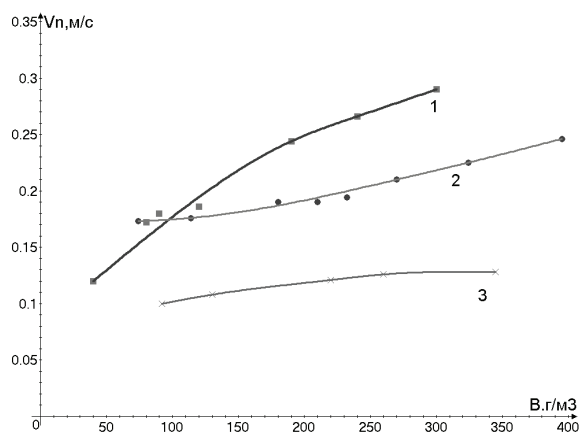


Рис. 1. Значения нормальной скорости пламени в аэровзвесах частиц магния сферической и неправильной формы.

1 — магний фрезерованный полидисперсный, 2 — магний сферический $d = 70$ мкм, 3 — магний сферический $d = 135$ мкм.

Таким образом, приведенные выше экспериментальные данные свидетельствуют о том, что нормальные скорости пламени в аэровзвеси частиц неправильной, развитой формы превосходят таковые в аэровзвесах соответ-

ствующих сферических частиц. Причина этого явления обусловлена, прежде всего, большей реакционной способностью частиц неправильной формы, приводящей к снижению температуры их воспламенения T_b . Это, в свою очередь, приводит к возрастанию скорости распространения пламени. Действительно, в случае кондуктивного механизма теплопередачи в волне горения, нормальная скорость пламени определяется выражением [4]:

$$V_n^2 \cong \frac{a}{\tau} \frac{T_r - T_b}{T_b - T_0} \quad (1)$$

где τ_r — время горения частиц во фронте пламени, a — эффективный коэффициент температуропроводности взвеси, T_r — адиабатическая температура сгорания. Как следует из (1), нормальная скорость пламени возрастает с уменьшением T_b .

В данной попытке объяснить наблюдаемые закономерности мы сталкиваемся с принципиальной проблемой ламинарного пламени в газовзвесах — вопросом о механизме теплопередачи в волне горения. Это связано с тем, что введение понятия нормальной скорости, как фундаментальной характеристики горючей смеси, независимой от способа организации процесса горения, оправдано в том случае, когда ширина предпламенной зоны (составляющая в случае кондуктивного механизма теплопередачи в газовзвеси доли миллиметра, аналогично газозвесьным системам) и зоны горения (в газовзвеси она составляет несколько миллиметров) много меньше характерных размеров установки, в нашем случае — диаметра трубы. При радиационном механизме теплопередачи ширина предпламенной зоны определяемая длиной пробега излучения в предпламенной зоне, составляет десятки сантиметров и даже метры. В этом случае понятие нормальной скорости теряет смысл, по крайней мере для мелкомасштабных установок.

В этой связи нами была предпринята попытка оценить относительный вклад радиационного потока в волне горения аэрозвеси сферических частиц магнезия размера 70 мкм посредством измерения динамики прогрева термопары в предпламенной зоне волны горения. Для этого в центр реакционной стеклянной трубы помещалась металлическая вставка, через узкое отверстие в которой вводилась хромель-алюмелевая термопара с диаметром спая 200 мкм, спай располагался на оси трубы. Сигнал от термопары записывался одним из лучей двухлучевого осциллографа С1-18, второй луч отмечал расстояние от движущегося фронта до спая. Оказалось, что при $V = 300$ г/м³ и $d_{10} = 70$ мкм температура спая на расстоянии 0,1 м от фронта пламени превышает начальную температуру на 30–40 К (толщина зоны кондуктивного прогрева взвеси перед фронтом a/V , где a — коэффициент теплопроводности газа, не превышает доли миллиметра; длина пробега излучения $l \approx 0.27$ м).

Оценим прогрев термопары перед фронтом пламени:

$$cmV \frac{dT}{dx} = q_0^* S \cdot \exp\left(-\left|\frac{x}{l}\right|\right) - 4S\alpha(T - T_0). \quad (2)$$

Здесь первое слагаемое в правой части — прогрев термопары за счет излучения от фронта пламени, а $q_0^* \approx q_0 \frac{R}{l}$ — плотность исходящего от зоны горения излучения; $q_0 = \varepsilon_r \sigma T_r^4$; $\varepsilon_r = 0,1$ — интегральная степень черноты горячей взвеси магния; температура горения $T_r = 2940$ К [5]. Множитель R/l — соответствует уменьшению радиационного потока (по отношению к плоскому неограниченному пламени q_0) за счет геометрических ограничений. Второе слагаемое — теплоотдача от термопары в газ; c — теплоемкость термопары, m — ее масса, S — сечение сепя, α — коэффициент теплообмена.

Решение (2):

$$T - T_0 = \frac{q_0^* S l}{cmV + 4S\alpha l} \exp\left(-\left|\frac{x}{l}\right|\right) \quad (3)$$

Максимальный прогрев термопары ($x = 0$) соответственно равен:

$$T - T_0 = \frac{q_0 R}{c\rho_s V + \frac{24\alpha}{d_T}} \frac{\sigma}{d_T} \quad (4)$$

Для условий эксперимента $V = 0,3$ м/с, $q_0 = 44 \cdot 10^4$ Вт/м² и из (4) $\Delta T = 30^\circ$, что соответствует экспериментально определенному.

Таким образом, проведенные исследования, наряду с прямым измерением радиационных параметров горючих аэрозвесей [5], свидетельствуют о второстепенной роли радиационного переноса в волне горения аэрозвесей частиц магния.

Литература

1. V.G. Shevchuk, A.V. Florko. Combustion of Dusts//Proc. of the Zeldovich Memory International conference on combustion. Moscow, — 1994. Combustion, Detonation, Shock waves. — V.2 Ed. by Frolov S.M. R. S. of the C. I., P. 211-214.
2. A.N. Zolotko. Ignition and Combustion of Dispersed Heterogeneous systems.// Progress in Combustion and Detonation. TORUS Press LTD. — Moscow. — 2004, — P.432. www.ism.ac.ru/zeldovich/
3. Шевчук В.Г., Горошин С.В., Клячко Л.А. и др. Скорость распространения пламени в газозвесях частиц магния. //Физика горения и взрыва. — 1980. — Т.12. — №1. — С.57-63.

4. Руманов Э.Н. Хайкин Б.И. О распространении пламени по взвеси частиц в газе. // Докл. АН СССР, — 1971. — Т.201. — №1. — С.104-116.
5. Шевчук В.Г. Безродных А.К. Бойчук Л.В. О механизме ламинарного пламени в аэровзвесах металлических частиц. // ФГВ. — 1988. — Т.24. — №2. — С.85-89.

О. Е. Сидоров, Е. М. Кондратьев, Л. В. Бойчук, В. Г. Шевчук

Вплив форми частинок на горіння пилу

АНОТАЦІЯ

У роботі, на прикладі аэрозависів часток магнію сферичної та неправильної форми, експериментально показано, що розвинута форма часток обумовлює зростання нормальної швидкості полум'я в пилу. Термопарними вимірами в хвилі горіння підтверджений переважно кондуктивний механізм теплопередачі для палаючого пилу.

Sidorov A. E., Kondratyev E. N., Boychuk L. V., Shevchuk V. G.

Influence of form of particles on dust burning process

SUMMARY

In current work, on the example of magnesium particles aerosuspensions, spherical and irregular-shaped, increase of normal speed of a flame in dusts, caused by the advanced form of particles, is experimentally shown. Conductive mechanism of a heat transfer in a wave of burning for a burning dusts by thermoelectric couple measurements confirmed mainly .