

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

*Институт горения и нетрадиционных технологий
Одесского национального университета им. И. И. Мечникова
E-mail: incomb@ukr.net*

**Ламинарное пламя в комбинированных газозвзвях
Часть IV. Экспериментальные исследования в газозвзвях
*Al + Zr; Al + Mg; Al + Fe.***

Экспериментально исследованы зависимости нормальной скорости распространения пламени в бинарных газозвзвях частиц Al + Zr; Al + Mg; Al + Fe в зависимости от общей концентрации и компонентного состава. Опыты проводились по методике полуоткрытых вертикальных труб, основанной на создании дезагрегированных восходящих потоков газозвзвесей. Сопоставление с развитой ранее теоретической моделью подтверждают неаддитивный (по компонентам) характер скорости пламени.

Экспериментальные исследования проводились по методике вертикальных труб, изложенной в части III настоящей работы, для изучения ламинарного пламени в двухкомпонентных газозвзвях частиц металлов. Исходная двухкомпонентная смесь создавалась путем перемешивания компонентов в заданном процентном соотношении.

На рис. 1-3 представлены результаты экспериментальных исследований в виде зависимости нормальной скорости пламени от суммарной концентрации взвеси для двухкомпонентных газозвзвесей:

$$\begin{aligned} Al + Zr (Al - d_1 = 6 \text{ мкм}, Zr - d_1 = 4.79 \text{ мкм}); \\ Al + Mg (Al - d_1 = 14.5 \text{ мкм}, Mg - d_1 = 7 \text{ мкм}); \\ Al + Fe (Al - d_1 = 6 \text{ мкм}, Fe - d_1 = 4.93 \text{ мкм}). \end{aligned}$$

Процентное содержание компонентов варьировалось для каждого типа взвеси. Нормальная скорость определялась следующим образом: экспериментально измерялась видимая скорость пламени и отношение поверхности пламени к площади его основания $S_{нов}/S_{осн}$ с последующим пересчетом (на основании уравнения неразрывности) $v_n = v_g S_{осн}/S_{нов}$. Для этого из данной серии опытов отбирались те, для которых форма пламени была симметричной и представляла собой параболоид вращения. Определяемая таким образом площадь поверхности пламени отличалась не более, чем на 5% от значений, полученных численным интегрированием поверхности вращения линии, огибающей проекцию фронта пламени. Среднеквадратичная ошибка измерений нормальной скорости пламени не превышала 15% по 5-7 опытам в одинаковых условиях. Погрешность в определении концентрации горючего во взвеси, определяемой методом аспирации твердой фазы из восходящего потока взвеси на фильтр по результатам 5 измерений в пределах одного опыта непосредственно перед зажиганием, не превышала 10%.

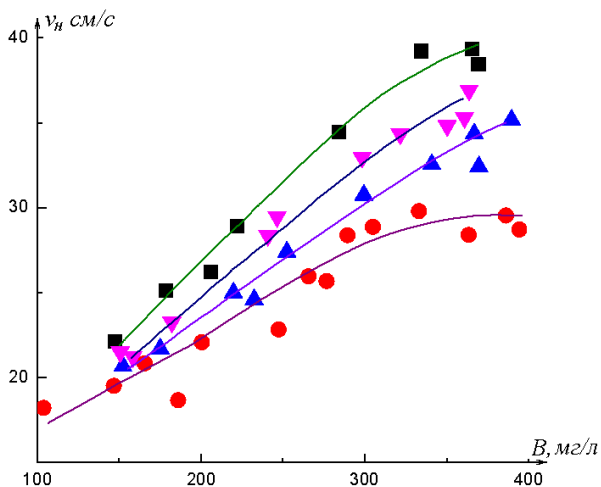


Рис.1. Зависимость нормальной скорости пламени от концентрации горючего в двухкомпонентной газозвеси Al – Zr.
 ■ – 100% Zr; ▼ – 50% Al + 50% Zr;
 ▲ – 25% Zr + 75% Al; ● – 100% Al.

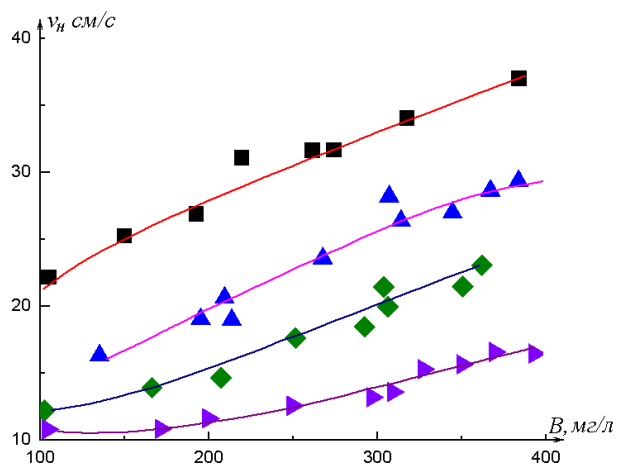


Рис.2. Зависимость нормальной скорости пламени от концентрации горючего в двухкомпонентной газозвеси Al – Mg.
 ■ – 100% Mg; ▼ – 50% Al + 50% Mg;
 ◆ – 25% Mg + 75% Al; ► – 100% Al.

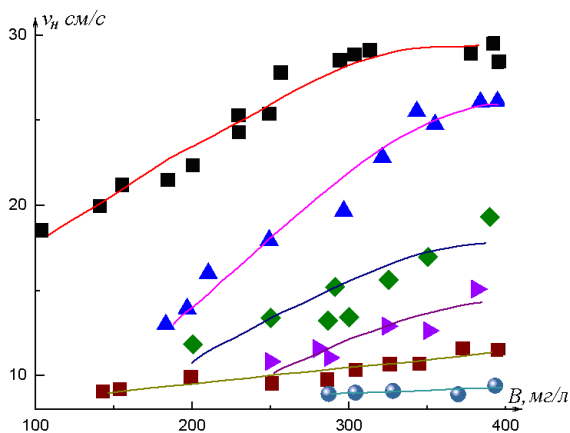


Рис.3. Зависимость нормальной скорости пламени от концентрации горючего в двухкомпонентной газозвеси $Al - Fe$.

- – 100% Al ; ▲ – 75% Al + 25% Fe ; ◆ – 50% Fe + 50% Al ;
- – 100% Fe ; ◆ – 90% Fe + 10% Al .

Как видно из графиков, в исследованном диапазоне параметров независимо от процентного соотношения компонентов для двухкомпонентных газозвесей, так же как и для монофракций, скорость пламени растет с ростом суммарной концентрации взвеси.

Влияние активного компонента на процесс распространения пламени по двухкомпонентной взвеси, в отличие от режимов, имеющих место при самовоспламенении [1], неоднозначно и зависит не только от суммарной концентрации горючего (общей калорийности взвеси), теплофизических характеристик компонентов, составляющих взвесь (тепловые эффекты сгорания, температуры воспламенения, времени горения и т.д.), но и от его относительной доли (процентного содержания) во взвеси.

При высоких суммарных концентрациях взвеси для двухкомпонентных взвесей $Al + Zr$; $Al + Mg$; $Al + Fe$ распространение пламени наблюдается во всем диапазоне изменения состава смеси. Однако в зависимости от тепловых эффектов сгорания компонентов, составляющих двухкомпонентную взвесь, влияние доли активного компонента на процесс распространения пламени проявляется по-разному. Так для взвесей $Al + Zr$; $Al + Mg$ при небольших добавках (~5÷10%) высокоскоростного компонента к низкоскоростному скорость пламени по двухкомпонентной газозвеси несколько возрастает. Иная картина имеет место для взвеси $Al + Fe$, низкоскоростной компонент которой железо, отличается крайне низким тепловым эффектом сгорания ($Q = 1780$ кал/г при образовании высшего оксида железа Fe_2O_3). Здесь небольшие добавки (5-10%) высокоскоростного алюминия не только не увеличивают скорость пламени двухкомпонентной взвеси $Al + Fe$, но, наоборот, приводят к ее снижению (причина данного явления будет обсуждена ниже). При увеличении доли высокоскорост-

ного алюминия в смеси, начиная с 20-25%, зависимость скорости пламени от процентного соотношения компонентов для алюминий-железной взвеси становится такой же, как для взвесей $Al + Zr$; $Al + Mg$ – с увеличением доли активного компонента в смеси скорость пламени возрастает.

В области низких суммарных концентраций добавка низкоскоростного компонента к активному приводит к возрастанию нижнего концентрационного предела распространения пламени по двухкомпонентной взвеси по сравнению с монофракциями компонентов. При этом, чем меньше доля активного компонента, тем выше НКП распространения пламени по смеси.

С уменьшением суммарной концентрации взвеси сужается диапазон изменения состава смеси, в котором наблюдается распространение пламени. Так для двухкомпонентной взвеси $Al + Fe$, при суммарной концентрации $B = 250$ мг/л распространение пламени происходит в диапазоне 25% Al / 75% Fe – 100% Al при уменьшении концентрации до 200 мг/л этот диапазон сужается до 50% Al / 50% Fe – 100% Al . При суммарной концентрации взвеси ниже 170 мг/л в трубах распространение пламени по двухкомпонентной взвеси $Al + Fe$ любого состава инициировать не удается.

Проведем анализ горения алюмо-железной газозвеси с помощью предложенной в предыдущей части модели распространения пламени по двухкомпонентной газозвеси [2] и сопоставим результаты расчета с экспериментальными данными. Если представлять расчетные данные по скорости пламени в относительных единицах, то в качестве входных параметров горения необходимо задать только отношение температур самовоспламенения одиночных частиц $(T_{sil} - T_0)/(T_{si2} - T_0)$ и отношение времен горения частиц – параметр $p = \tau_{c1} / \tau_{c2}$. Температуру самовоспламенения частиц алюминия будем полагать равной температуре плавления защитной окисной пленки Al_2O_3 – 2300 К. Для определения температуры самовоспламенения одиночных частиц железа были проведены специальные эксперименты по воспламенению газозвеси частиц железа. Эксперименты проводились по методике и на установке, которые детально описаны в [1]. Полученная экспериментально зависимость температуры воспламенения газозвеси от концентрации экстраполировалась на нулевую концентрацию твердой фазы. Определенная таким образом температура самовоспламенения одиночных частиц железа составила 1050 К. Данные по временам горения частиц железа в литературе отсутствуют. Поэтому будем приближенно полагать, что отношение времен горения частиц алюминия и железа такое, как если бы их горение лимитировалось диффузией кислорода к поверхности частиц с образованием вблизи поверхности сразу конечных окислов – Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Тогда параметр $p = d_{Al}^2 \rho_{Al} \gamma_{Fe} / d_{Fe}^2 \rho_{Fe} \gamma_{Al}$, где γ_{Fe} и γ_{Al} – стехиометрические коэффициенты соответствующих реакций окисления, приближенно равен единице.

На рис.4 представлены результаты расчета зависимостей скорости пламени от соотношения компонентов в алюмо-железной газозвеси при двух фиксированных значениях полной массовой концентрации горючего: 300 мг/л (кривая 1)

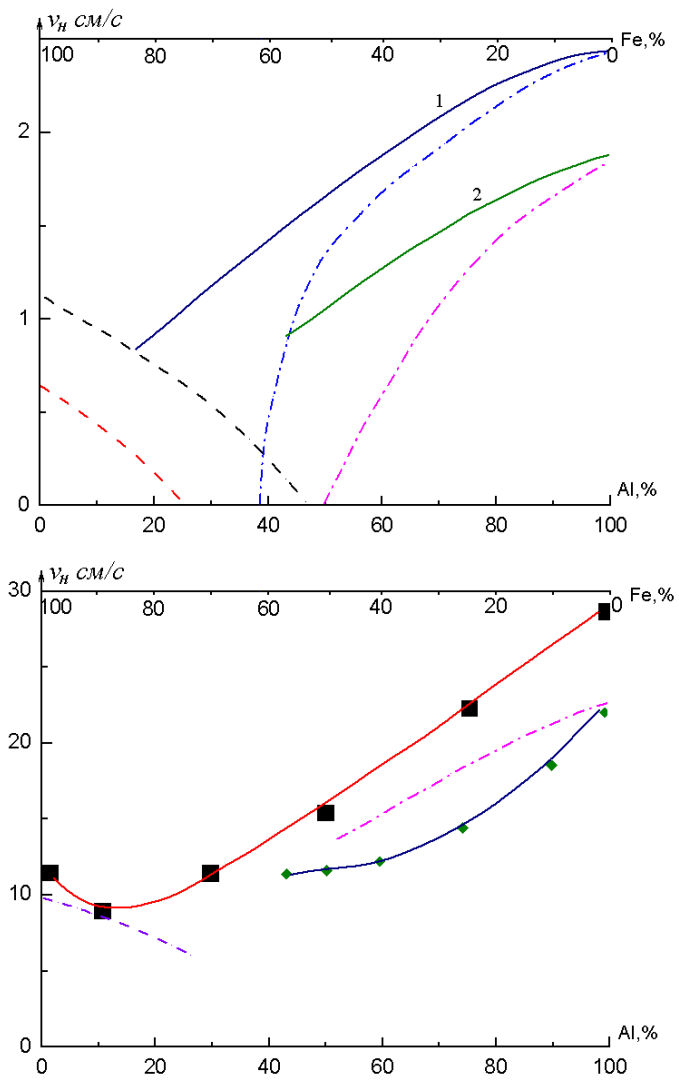


Рис. 4. Зависимость нормальной скорости пламени от состава двухкомпонентной газовой смеси Al/Fe
 а – расчет; б – эксперимент; 1 – $B = 300$ мг/л; 2 – $B = 200$ мг/л;
 - - - - Al / инертное в-во; - - - - Fe / инертное в-во.

и 200 мг/л (кривая 2). Там же представлены расчетные значения скорости пламени по газовзвеси железа, если алюминий заменить инертным компонентом железом (штрих-пунктирная кривая). Как видно из рисунка, существование объединенного фронта горения алюминия и железа (режимы управления, слияния и переходной) возможно в ограниченном диапазоне изменения состава взвеси. При полной концентрации горючего 200 мг/л объединенный фронт существует в диапазоне изменения состава $100\% Al - 55\% Al / 45\% Fe$, а при увеличении полной концентрации горючего до 300 мг/л этот диапазон расширяется до $100\% Al - 30\% Al / 70\% Fe$. При этом для взвеси с концентрацией горючего 200 мг/л между областью, где существует объединенный фронт горения, и областью, где возможно горение только монофракции железа (алюминий играет роль балласта), наблюдается разрыв, т.е. существует диапазон изменения состава взвеси, в котором распространение пламени невозможно ни в одном из режимов. В то же время при полной концентрации горючего 300 мг/л эти области перекрываются, т.е. при изменении состава возможен непрерывный переход от переходного режима через режим управления к режиму отрыва, режиму с возможным индукционным горением газовзвеси алюминия. Причем, если в режиме управления скорость пламени падает с уменьшением содержания алюминия, то в режиме отрыва скорость пламени определяется только горением железа и с уменьшением содержания алюминия растет, т.к. во фронте пламени он выполняет роль инертного стока тепла. Таким образом, минимум скорости пламени на экспериментальной кривой 1 объясняется тем, что по обе стороны минимума горение осуществляется в различных режимах. Этот предсказанный теоретической моделью факт подтверждается проведенными спектральными исследованиями. В области составов, расположенных справа от минимума на спектрограммах излучения стабилизированного на сопле стационарного факела в диапазоне длин волн $\lambda = 4600 \sim 5500 \text{ \AA}$ отчетливо наблюдается система полос $AlO - V^2\Sigma - X^2\Sigma$, что свидетельствует об интенсивном реагировании частиц алюминия. При содержании алюминия менее 30% в спектре излучения пламени молекулярные полосы AlO отсутствуют. Отсутствие молекулярных полос и низкие ($\sim 1700 \div 1800 \text{ K}$) температуры зоны горения свидетельствуют об отсутствии в этой области воспламенения и горения алюминия.

Выводы.

Таким образом, результаты экспериментов подтверждают сделанный ранее на основе результатов расчета по модели вывод о том, что скорость пламени в двухкомпонентной взвеси не является аддитивной величиной скоростей распространения пламени в моновзвесах компонентов. Поэтому прогнозирование величины и характера поведения скорости пламени в двухкомпонентной газовзвеси не может основываться только на информации о скоростях горения моновзвесей. В то время как наблюдаемое хорошее согласование результатов расчета с экспериментом свидетельствует о том, что предложенная простая модель горения двухкомпонентной взвеси позволяет качественно верно предсказать структуру волны горения и поведение скорости пламени при изменении состава.

ва, пользуясь при этом минимальной информацией – отношением тепловых эффектов, температур воспламенения и времен горения одиночных частиц используемых компонентов.

Литература:

1. Золотко А. Н., Мацко А. М., Полищук Д. И., Буйновский С. Н. Воспламенение двухкомпонентных газозвесей частиц металлов // Физика горения и взрыва. – 1980. – Т. 16, №1. – С. 23-26.
2. Бойчук Л. В., Шевчук В. Г., Сидоров А. Е., Опарин А. С. Ламинарное пламя в комбинированных газозвесах. Часть III. Методика экспериментальных исследований // Физика аэродисперсных систем. – 2013. – № 50. – С. 54-61.

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

Ламінарне полум'я в комбінованому газозавису. Часть IV. Экспериментальні дослідження в газозавису $Al + Zr$; $Al + Mg$; $Al + Fe$

АНОТАЦІЯ

Експериментально досліджені залежності нормальної швидкості розповсюдження полум'я в бінарному газозавису частинок $Al + Zr$; $Al + Mg$; $Al + Fe$ в залежності від загальної концентрації та компонентного складу. Досліди проводились за методикою напіввідкритих вертикальних труб, заснованій на створенні дезагрегованого потоку газозавису. Зіставлення з раніше розвинутою теоретичною моделлю підтверджує неадитивний (по компонентах) характер швидкості полум'я.

Boychuk L.V., Shevchuk V.G., Sidorov O.E. Oparin A.S.

The laminar flame in combined dusts. Part IV. Experimental investigations of $Al + Zr$; $Al + Mg$; $Al + Fe$ dusts.

SUMMARY

Normal flame propagation velocity is studied experimentally in binary suspensions of particles ($Al + Zr$; $Al + Mg$; $Al + Fe$) depending on the total concentration and composition. The experiments are fulfilled by use method of half-open vertical tubes, based on disaggregated particles- gas upward flow. The earlier developed model predictions compared with experimental data proves non-additivity of mixture flame velocity.