

УДК536.46

Опарин А.С., Сидоров А.Е., Буланин Ф.К., Шевчук В. Г.

*Институт горения и нетрадиционных технологий
Одесского национального университета имени И. И. Мечникова
E-mail: makload@mail.ru*

Распространение пламени в гибридных газовзвесьях «уголь-метан-воздух»

Представлены результаты экспериментальных исследований ламинарного пламени в гибридных газовзвесьях «метан – уголь – воздух». Исследования проводились для пылевых облаков мелкодисперсного угля ($r_0 = 8$ мкм) и оксида железа ($r_0 = 5$ мкм) объемом $4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ в изобарических условиях. Объемная концентрация метана составляла 6%. Сравнение видимых и нормальных скоростей ламинарного распространения пламени для смесей «метан – воздух», «метан – воздух – уголь» и «метан – воздух – инертный компонент» показало, что мелкодисперсный уголь играет роль активной добавки, увеличивающей скорость распространения пламени.

Введение. Гибридные горючие пыли представляют собой достаточно широкий класс горючих систем [1]. В широком смысле к ним можно отнести смесь твердого и газообразного горючего с газообразным окислителем или смеси различных твердых порошкообразных горючих, например, В+Al [2], Al+Mg, Al+Fe, Al+Zn [3]; газовзвеси частиц, содержащих в себе различные горючие, например, алюмомагниевого сплавы или соединения (бориды алюминия, магния и т.д.), гидриды металлов (содержащие металл и водород в одной молекуле) и т.п.

Наиболее интересными и важными с практической точки зрения являются гибридные газовзвеси, такие как уголь-метан-воздух, являющиеся причиной разрушительных шахтных взрывов.

Теоретическому исследованию проблемы распространения пламени в таких системах посвящен ряд исследований [4-6], среди которых особо выделим работу [6], в которой на основе численного анализа показано, что в зависимости от соотношения параметров дисперсной и газовой фазы (массовой концентрации и размера частиц угля и концентрации метана) скорость распространения ламинарного пламени может увеличиваться в несколько раз по сравнению со скоростью ламинарного пламени в незапыленной газовой среде, либо уменьшаться, и тогда влияние частиц аналогично влиянию инертной дисперсной фазы. Из общих физических соображений трудно судить о влиянии угля на процесс распространения пламени по гибридной смеси. Действительно, в зависимости от тепловых эффектов и скоростей газовой фазы и гетерогенного реагирования (а последняя сильно зависит от размера частиц) возможно перераспределение окислителя в этих параллельных процессах, которое может приводить как к увеличению, так и к уменьшению скорости ламинарного пламени.

Если обратиться к прецедентам, то наиболее типичный пример такой неоднозначности демонстрируют эксперименты по определению нормальной

скорости пламени в гибридных аэровзвесьях частиц алюминия и бора [2]. Ожидалось, что добавки высокоэнергетичного бора должны были бы приводить к возрастанию скорости распространения пламени по сравнению с моновзвесью алюминия. Оказалось наоборот – они существенно снижают скорость пламени, даже по сравнению со смесью алюминий - инертный компонент. Причина этого заключается в том, что в зоне горения окислитель расходуется на более высокоскоростные, но низкотемпературные реакции образования промежуточных оксидов бора, а основное тепло при образовании конечного продукта B_2O_3 выделяется на больших расстояниях от зоны горения и не оказывает существенного теплового влияния на теплопередачу в волне горения. В таких ситуациях решающая роль в исследованиях и выявлении основных закономерностей горения гибридных систем должна принадлежать эксперименту. Однако в отношении рассматриваемых систем приходится констатировать практически полное отсутствие экспериментальных исследований ламинарного пламени при нормальных условиях. В работе [7] реализован процесс распространения пламени в гибридных аэровзвесьях метан – уголь ($d < 100$ мкм) в полуоткрытой трубе, однако каких либо попыток определить нормальную скорость пламени и сравнить ее с таковой в метано - воздушных смесях предпринято не было.

Экспериментальные исследования. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование процесса распространения ламинарного пламени в гибридных смесях метан - уголь - воздух в условиях свободных облаков. Для сравнения изучались также метано - воздушные смеси и смеси метан - инертный компонент - воздух.

Опыты проводились по методике тонкостенных резиновых зондов. Установка (рис.1) состояла из трех основных блоков: блока создания метано - воздушной смеси, блока создания пылевого облака и блока управления распылом и поджигом (3).

Метано-воздушная среда создавалась заполнением резинового зонда с прозрачными стенками до достижения им объема $V = 4000$ см³. Из соображений безопасности метан и воздух подавались по независимым каналам через специальный смеситель (6), препятствовавший перетеканию газов, и смешивались непосредственно в зонде. Отсечение подачи воздуха и метана производилось электроклапанами (2), схема электропитания которых исключала возможность их одновременного открытия. Расходы воздуха и метана регулировались кранами (4) и контролировались расходомерами (5), состоящими из дифференциального манометра и диафрагмы. Регулируя время подачи метана и воздуха, можно было создавать необходимое количество метано - воздушной смеси с заданной концентрацией метана в ней. Концентрация метана в этой смеси в зонде контролировалась с помощью газового анализатора ШИ - 11. Шаровой кран (7) служил для отключения зонда от системы подачи газов на время проведения опыта. Приготовленная описанным способом метано - воздушная смесь выдерживалась в зонде в течение 5 минут для обеспечения полного диффузионного смешения газовых компонентов. Навеска угля, предварительно загруженная в специальный распылитель, из которого кратковременным пневмоимпульсом

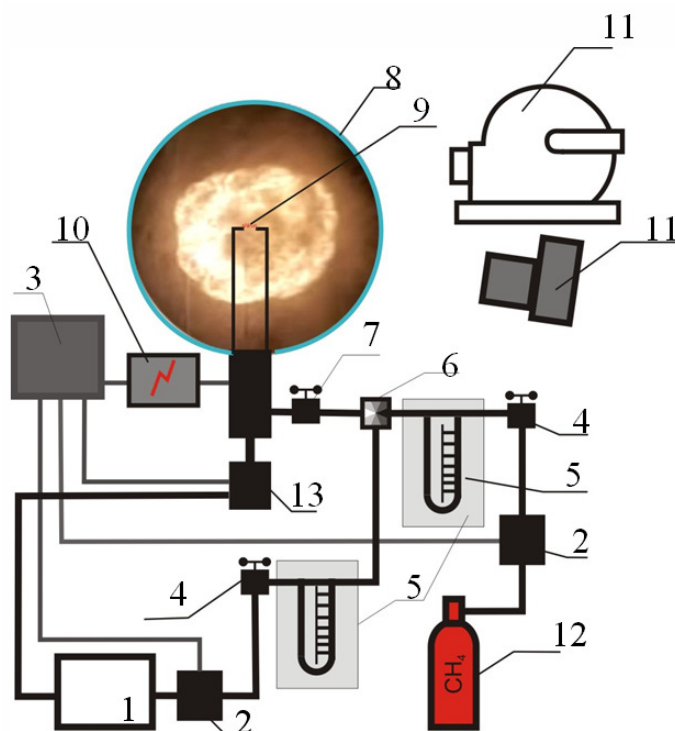


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки по определению скорости распространения пламени по гибридным газовзвесям (метан-воздух-уголь): 1 – компрессор, 2 – клапаны подачи газа, 3 – блок управления поджигом и распылом; 4 – краны регулировки подачи газа, 5 – расходомеры, 6 – газовый смеситель, 7- отсечной кран, 8 – тонкостенный зонд; 9 – проволока, 10 – блок поджига, 11- кино и видеокамера, 12 – газовый баллон, 13 – клапан впрыска (распыла) порошка.

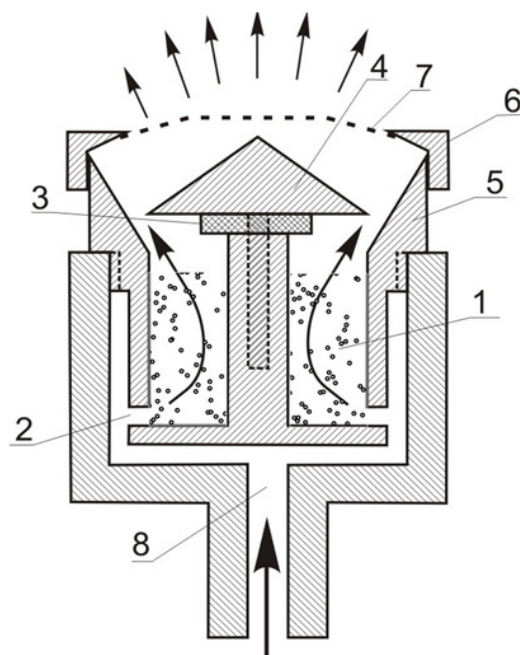


Рис. 2. Конструкция распылителя: 1 - вихревая камера с порошком, 2 - тангенциальные отверстия, 3 - регулировочные шайбы, 4 - конус-нож, 5 - направляющий конус вихревой камеры, 6 – отбойная насадка, 7 - сетка распылителя, 8 - канал подачи воздуха.

она выбрасывалась внутрь зонда в предварительно подготовленную метано - воздушную смесь. (Конструкция распылителя приведена на рис. 2). Объем воздуха, необходимый для впрыска порошка, не превышал 100 см^3 . Воздушный импульс создавался посредством кратковременного открытия клапана (13). После короткой задержки ($\tau_z \sim 0,3 \text{ с}$), необходимой для затухания турбулентных пульсаций, возникающих при впрыске, и для достижения равномерного распределения газовзвеси по объему зонда, производился поджиг.

Длительность впрыска и задержки зажигания регулировалась и задавалась управляющим блоком (3). Управляющие сигналы поступали на электромагнитные реле, замыкание которых открывало клапан (13) и инициировало впрыск, а затем и поджиг. Поджиг в центре зонда осуществлялся металлической проволокой (9), которая разогревалась до перегорания электрическим током, формируемым блоком поджига.

Опыты проводились в метано-воздушных смесях с объемным содержанием метана $C_{\text{CH}_4} = 6\%$. В качестве твердого компонента горючей смеси использовался мелкодисперсный уголь (марки ДГ, $r = 8 \text{ мкм}$) с содержанием летучих \sim

30%. Диапазон изменения концентрации угля в гибридных газовзвесах составлял $C_f = 205 \div 260$ мг/л. Ограничения массовой концентрации угля определялись необходимостью обеспечения равномерного распыления порошка по всему объему зонда с достаточной степенью диспергирования и предотвращения его агломерации.

Эксперимент проводился в две стадии. На первой стадии определялись скорости пламени в смесях CH_4 -6% – воздух и CH_4 -6% – воздух – уголь. Следующей стадией было выяснение роли угля в процессе распространения пламени в гибридных газовзвесах – является она активной или пассивной? Будет ли ограничиваться вклад угольной пыли ролью теплового стока при распространении пламени по гибридной газовзвеси, или будет вносить свой вклад как источник тепла? Для этого была проведена серия опытов по распространению пламени в газовзвесах, в которых уголь заменялся негорючим мелкодисперсным материалом – порошкообразным оксидом железа (Fe_3O_4) со средним диаметром частиц ($d \sim 5$ мкм), практически совпадающим с размером частиц исследуемого угля. Отметим, что порошок Fe_3O_4 проявил минимальную склонность к агломерации по сравнению с другими оксидами, которые проверялись нами на возможность их применения при создании газовзвеси в зонде. Кроме того, теплоемкость оксида железа ($C_p^{Fe} = 0.43$ Дж/г·К) практически в 2 раза меньше теплоемкости угля ($C_p^{y2} = 1.0$ Дж/г·К), поэтому замена угля на Fe_3O_4 не может завязать теплоемкость газовзвеси.

Регистрация процесса распространения фронта пламени проводилась скоростной видеокамерой со скоростью съемки 300 кадров в секунду. Типичный фрагмент видеogramмы приведен на рис. 3.

Видимая скорость пламени определялась по следующей методике. Площадь изображения фронта пламени определялась покадрово с помощью специально разработанного программного обеспечения. Такой метод фактически означает усреднение скорости распространения пламени по углу 2π . Найденные значения площади сечения фронта пламени и коэффициента увеличения κ съемки, позволяли находить эффективный радиус сферы пламени как функцию времени

$$R_{eff} = \kappa \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}}.$$

Построенные зависимости $R_{eff}(t)$ позволяли определить видимую скорость пламени.

На рис. 4 представлены типичные зависимости радиуса фронта горения от времени для всех рассмотренных типов горючих систем.

Усредненные значения видимой ламинарной скорости, определенной на линейном участке зависимости $R_{eff}(t)$, представлены в таблице.

При сравнении данных опытов, прежде всего, обращает на себя внимание то, что введение в метано-воздушную смесь инертного порошка Fe_3O_4 , вплоть до значений массовой концентрации $C_{Fe} = 300$ мг/л, не приводило к существенному изменению видимой скорости пламени в сравнении с метано-воздушной

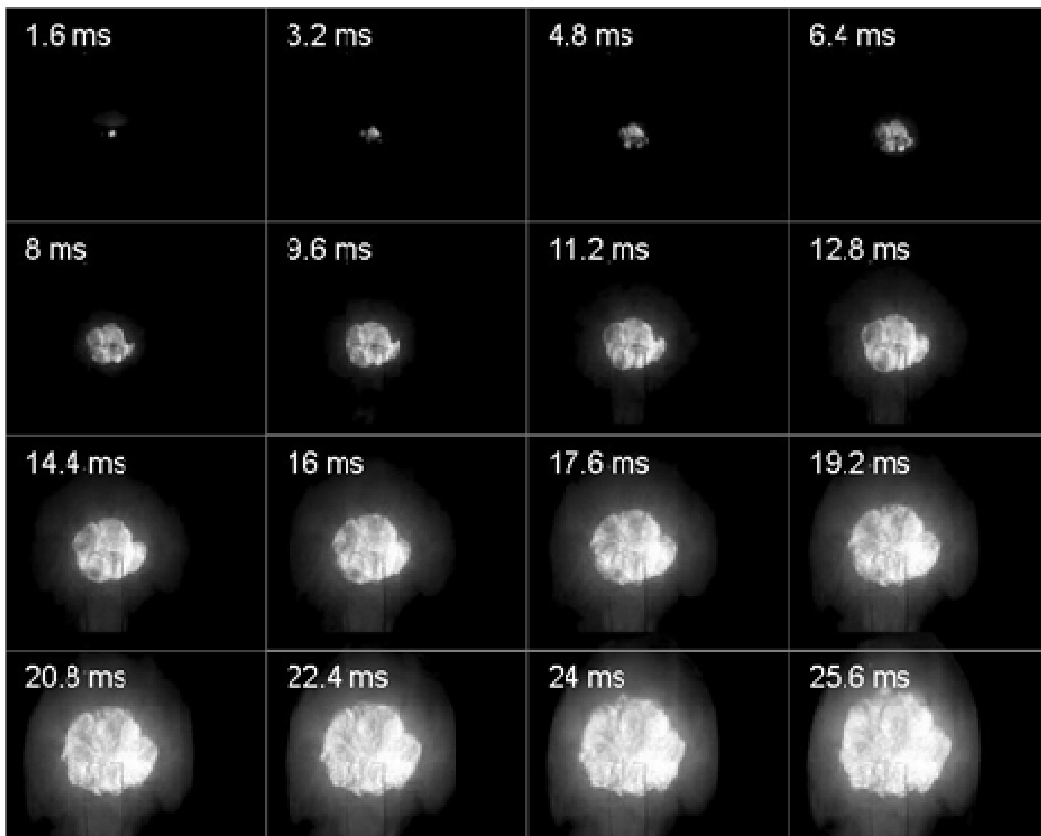


Рис. 3. Типичная видеограмма процесса распространения пламени по гибридной газозвеси.

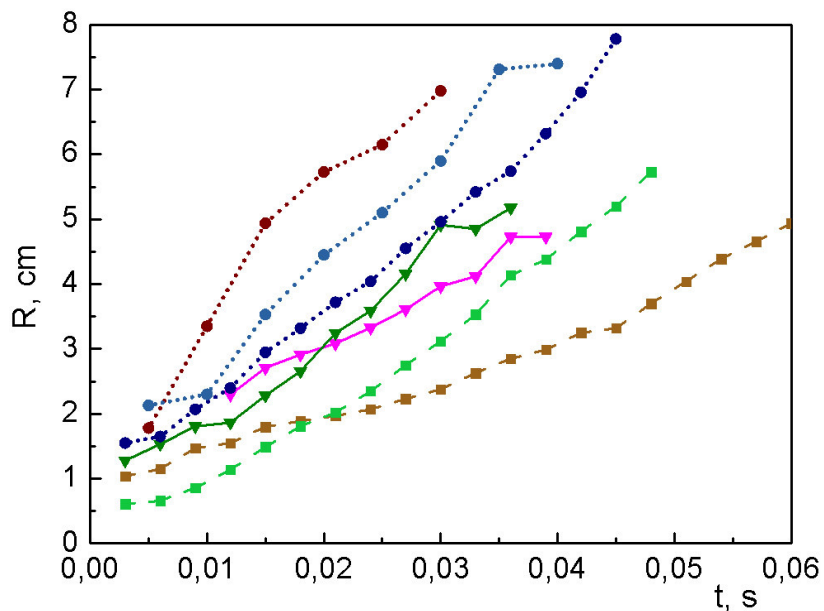


Рис 4. Зависимости эффективного радиуса фронта пламени от времени для различных гибридных систем:

▼ – метан-воздух, ● – метан-воздух-уголь, ■ – метан-воздух- Fe_3O_4 .

Таблица. Скорости пламени в исследованных гибридных горючих смесях.

Состав смеси	Массовая концентрация порошка в газовзвеси, мг/л	Видимая скорость пламени, см/с	Нормальная скорость пламени, см/с
Метан воздух	0	95 ± 20	16 ± 3
Метан - воздух - оксид железа	300	90 ± 15	15 ± 2,5
	400	65 ± 15	11 ± 2,5
Метан - воздух - уголь	200	145 ± 30	24 ± 5
	230	165 ± 30	27,5 ± 5
	260	185 ± 30	31 ± 5

смесью. Дальнейшее увеличение концентрации порошка-балласта приводило только к уменьшению скорости волны горения. Отметим, что при концентрациях оксида железа $C_{Fe} > 450$ мг/л в условиях проведения эксперимента стационарное распространение пламени не успевало сформироваться, и в отдельных случаях наблюдалось потухание волны.

В гибридной газовзвеси присутствие угольной пыли с большим содержанием летучих приводило к весьма значительному (в 1.5 ÷ 2 раза) увеличению скорости пламени по сравнению с гомогенной горючей смесью. Это свидетельствует об активном вкладе угольной компоненты в процесс распространения волны горения по гибридной газовзвеси. Этот вклад может быть вызван как дополнительным тепловыделением от сгорания летучих в зоне горения, так и теплом от сгорания коксового остатка.

Оценим значения нормальных скоростей пламени в соответствующих смесях, исходя из соотношения:

$$v_n = v_g \frac{\rho_{np}}{\rho_0},$$

где ρ_{np} – плотность продуктов сгорания, ρ_0 – исходная плотность газовой смеси. В работе [8] показано, что соотношение плотностей ρ_{np}/ρ_0 меняется незначительно в концентрационных пределах распространения пламени в метано-воздушных смесях (5.6 до 7.29 в области объемных концентрация метана 5.88 ÷ 14.1%), и в нашем случае составляет величину, приблизительно равную 6. Получаем, что нормальная скорость пламени составляет для метано-воздушной смеси 16 ± 3 см/с, что удовлетворительно согласуется со значением $v_n = 13$ см/с, экспериментально полученным в сферическом сосуде постоянного объема на начальной стадии горения [8].

Таким образом, проведенные исследования, в целом, подтверждают теоретические исследования [6] и свидетельствуют об активной роли мелкодисперсного угля в гибридных смесях метан-уголь-воздух.

Литература:

1. Концепция развития горения и взрыва как область научно-технического прогресса / ред. Мержанов А.Г./ – Черногловка: Территория, 2001. – С.171.

2. Шевчук В. Г., Бойчук Л. В., Швець А. И. Распространение пламени в двухфракционных газовзвесах алюминия и бора // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, №6. – С. 51-54.
3. Бойчук Л.В., Шевчук В.Г., Сидоров А.Е., Опарин А.С. Ламинарное пламя в комбинированных газовзвесах. IV. Экспериментальные исследования в газовзвесах $Al + Zr$; $Al + Mg$; $Al + Fe$ // Физика аеродисперсных систем. 2013. – №50. – С.62-68.
4. Bradley D., Chen Z., El-Cherif S., El-Din Habik S., John G., Dixon-Lewis G. Structure of Laminar Premixed Carbon-Methane-Air Flames and Ultrafine Coal Combustion // Combustion and Flame. – 1994. – Vol.96. – P 80-96.
5. Tunik Yu. V. Modelling of low-speed combustion of a methane-air-coal dust suspension // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1997. – Vol. 33, №4. – P. 431-438.
6. Крайнов А. Ю. Моделирование распространения пламени в смеси горючих газов и частиц // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т.36, №2. – С.3-9.
7. Chen D. Y., Sun J. H., Wang Q. S. and Lin Y. Combustion behaviors and flame structure of methane - coal dust hybrid in a vertical rectangle chamber // Combustion Science and Technology. – 2008. Vol.180. – P.1518-1528.
8. Hassan M. J., Aung K. T. and Faeth G. M. Measured and predicted properties of laminar premixed methane-air flames // Combustion and flame. – 1998. – V.115, №.4. – P.539-550.

Опарин А.С., Сидоров О.Е., Буланін П.К., Шевчук В. Г.

**Розповсюдження полум'я в гібридних газозависах
«вугілля - метан - повітря»**

АНОТАЦІЯ

Наведено результати експериментальних досліджень ламінарного полум'я в гібридних газозависах «метан-вугілля-повітря». Дослідження проводилися для пилових хмар дрібнодисперсного вугілля ($r_0 = 8$ мкм) та оксиду заліза ($r_0 = 5$ мкм) об'ємом $4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ в ізобаричних умовах. Об'ємна концентрація метану дорівнювала 6%. Порівняння видимих і нормальних швидкостей розповсюдження полум'я для сумішей «метан - повітря», «метан – вугілля – повітря» і «метан – інертний компонент - повітря» показало, що дрібнодисперсне вугілля грає роль активної добавки, яка збільшує швидкість полум'я.

Oparin A.S., Sydorov O. E., Bulanin P. K., Shevchuk V.G.

Flame propagation in hybrid “coal-methane-air” aerosuspensions

SUMMARY

Results of laminar flame propagation experimental studies on hybrid aerosuspensions «methane-coal-air» are presented. Combustion of fine coal dust clouds ($r_0 = 8$ microns, volume $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$) and iron oxide clouds ($r_0 = 5$ microns, volume $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$) is investigated in isobaric conditions. Volumetric methane concentration was 6%. Comparison of visible and normal flame propagation velocities of mixtures "methane - air", "methane - coal - air" and "methane - inert component - air" testifies that fine coal particles increase flame propagation rate.