

КОНВЕКТИВНЫЙ ПОДЪЕМ И СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ БОЛЬШОГО ОЧАГА ПЛАМЕНИ

П. Ф. Иващенко, В. С. Румянцев

(Москва)

Проблемы распространения пламени и развития взрывов в неограниченных облаках горючих газов и паров рассматриваются в [1]. Автор [1] считает, что механизм зажигания, горения и взрыва в большом объеме осложняется влиянием свободной конвекции, и что эти явления могут быть различными в ограниченных и неограниченных горючих смесях. Изучение околопредельных смесей выявило важную роль конвекции [2]. В настоящее время отсутствуют данные об условиях, при которых начинается конвекция, не ясно влияние ее последующего развития на процесс распространения пламени в свободном пространстве. Обнаружения действия конвекции при атмосферном давлении и в быстрогорящих смесях возможно при исследовании распространения пламени в значительных по величине объемах.

В данной статье излагаются результаты измерения скорости распространения пламени и всплывания пламенного очага в метано-воздушных смесях с начальным объемом ~ 70 м³.

Опытные взрывы проводились при атмосферном давлении и температуре окружающего воздуха 273 К в резиновой сферической оболочке с толщиной стенки после наполнения смесью 0,05—0,08 мм. Концентрация метана в одной серии опытов принималась равной 10%, в другой — 7,5%. Однородность смеси обеспечивалась за счет перемешивания двумя вентиляторами, расположенными внутри оболочки. За 2 мин до зажигания смеси вентиляторы выключались. Необходимые режим и время работы вентиляторов, при которых достигалась однородность смеси, определялись в отдельной серии опытов без зажигания смеси путем химического анализа проб из разных точек объема. Смесью зажигалась в центре объема пережиганием вольфрамовой проволоки длиной 10 и диаметром 0,1 мм током аккумулятора напряжением 24 В. Процесс распространения пламени и подъем пламенного очага фиксировались на киноплёнку скоростными кинокамерами одновременно с двух точек, расположенных под углом 120°. Экспозиция осуществлялась за счет свечения пламени в ночное время.

Рассмотрим конвективный подъем пламенной сферы. На кинограммах рис. 1 показаны последовательные стадии развития и конвективного подъема (всплывания) h сферического пламени. Горизонтальная линия на фотографиях — трубка подачи газа, на концах которой смонтированы вентиляторы, а в середине — электроды зажигания. Вертикальные линии — стойки, удерживающие сферическую оболочку от раскачивания и сноса ветром.

На рис. 2 представлен график зависимости перемещения центра сферы относительно точки воспламенения за счет конвективного подъема (всплывания) пламенной сферы. Конвективный подъем определялся как перемещение центра сферического пламени относительно точки зажигания, расположенной в центре объема. Центр пламени на покадровой съемке определялся как геометрический центр всплывающей пламенной сферы.

Как видно из рис. 2, конвективный подъем пламени медленно горящей смеси (7,5% CH_4 +воздух) удается зафиксировать через $\sim 0,05$ с от момента зажигания, что соответствует радиусу сферы $\sim 0,2$ м. Для быстрогорящей смеси (10% CH_4 +воздух) начало конвективного

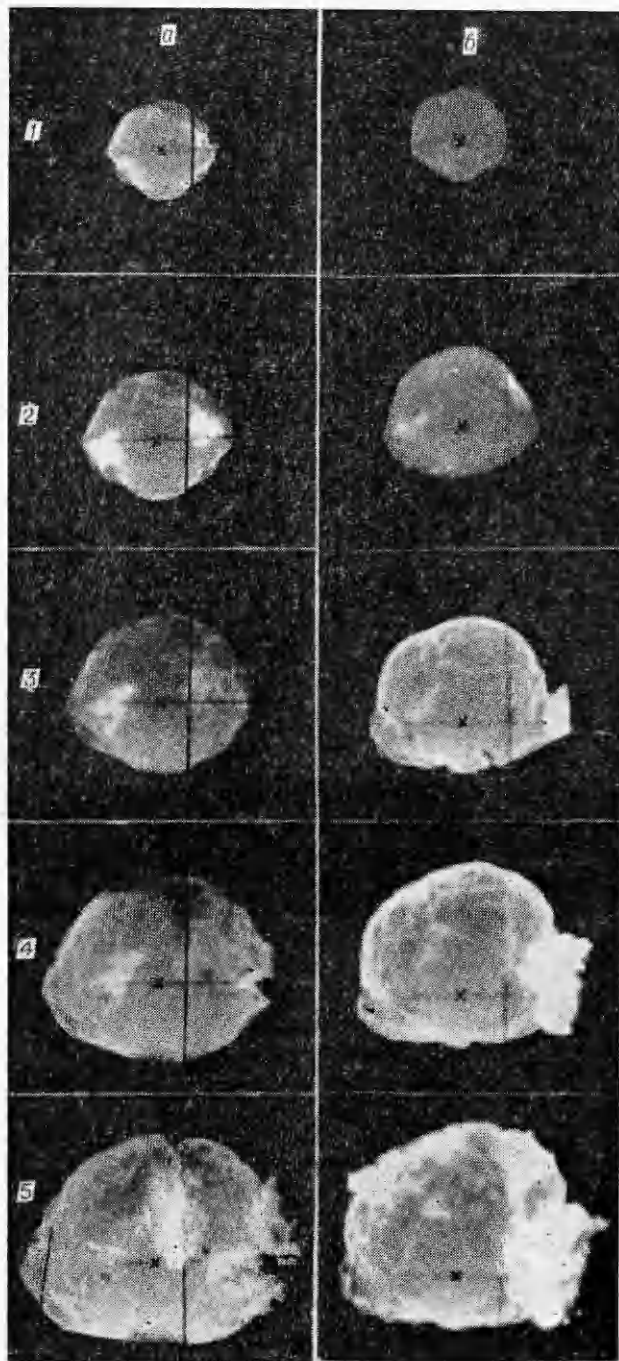


Рис. 1. Кинограмма процесса сгорания и подъема сферического пламени (X — точка поджигания смеси, R — радиус пламени, t — время от момента поджигания).

а) смесь 10% CH_4 +воздух: 1 — $h=0$, $R=1,05$ м, $t=0,30$ с; 2 — $h=0,07$ м, $R=1,35$ м, $t=0,366$ с; 3 — $h=0,17$ м, $R=1,65$ м, $t=0,432$ с; 4 — $h=0,31$ м, $R=1,95$ м, $t=0,498$ с; 5 — $h=0,50$ м, $R=2,25$ м, $t=0,564$ с; б) смесь 7,5% CH_4 +воздух: 1 — $h=0,21$ м, $R=1,03$ м, $t=0,40$ с; 2 — $h=0,34$ м, $R=1,33$ м, $t=0,52$ с; 3 — $h=0,59$ м, $R=1,63$ м, $t=0,64$ с; 4 — $h=0,88$ м, $R=1,94$ м, $t=0,74$ с; 5 — $h=1,13$ м, $R=2,20$ м, $t=0,83$ с.

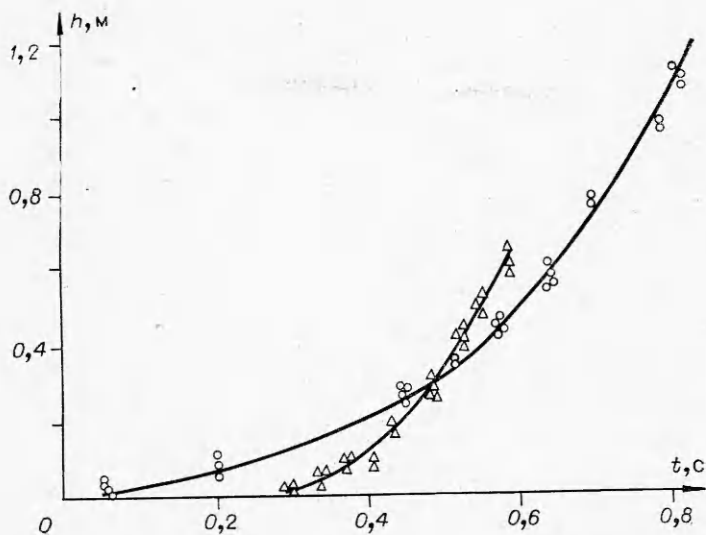


Рис. 2. Зависимость высоты подъема пламени смесей 10% CH_4 +воздух (○) и 7,5% CH_4 +воздух (△) от времени.

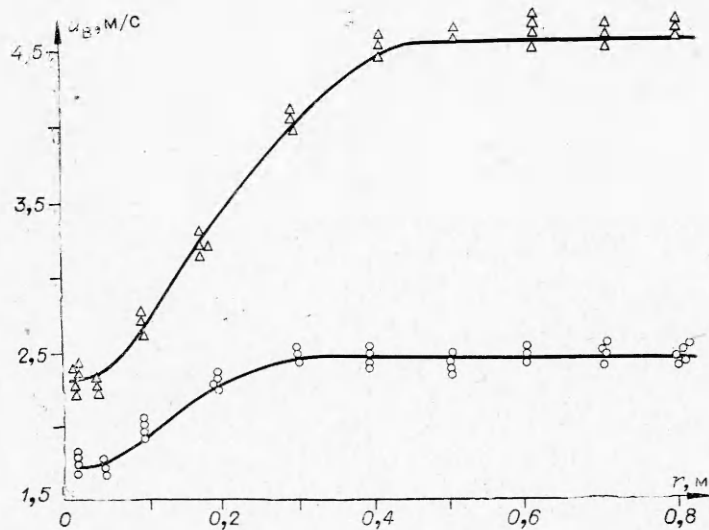


Рис. 3. Изменение скорости распространения пламени с увеличением его радиуса в смесях 10% CH_4 +воздух (△) и 7,5% CH_4 +воздух (○).

подъема по кинограмме отмечается через $\sim 0,3$ с от момента зажигания (радиус сферы в это время равен $\sim 1,0$ м).

Разрушение резиновой оболочки происходит обычно при радиусе пламени ~ 2 м. До этого момента фоторегистрация ведется через прозрачную оболочку (кадры 1, 2 на рис. 1, б). Разрушение оболочки не влияет существенно на дальнейшее развитие пламени — сферичность фронта сохраняется после разрушения оболочки (кадры 3—5 на рис. 1). Некоторая деформация очага пламени — удлинение в горизонтальном направлении, по-видимому, не связана с влиянием оболочки на формирование и развитие фронта пламени. В [2, 3] в опытах с медленногорящими (околопредельными) смесями деформация пламени объясняется влиянием конвективного движения на радиальное распространение фронта пламени.

Распад относительно правильной сферической формы пламени начинается при радиусе сферы около 2,5 м. Конвективный подъем при таком радиусе составляет $\sim 1,3$ м для 7,5%-ной смеси и $\sim 0,7$ м для 10%-ной смеси. Можно предположить, что при радиусе $\sim 2,5$ м за счет конвективного движения фронт пламени попадает в область с разбавленной смесью, где прекращается горение. Анализ кривых на рис. 2 показывает, что скорость подъема пламени плавно возрастает и достигает величины ~ 3 м/с, затем рост скорости подъема несколько замедляется.

Видимая скорость распространения пламени u_v определялась как отношение приращения радиуса сферического пламени на двух соседних кадрах ко времени между их экспозициями

$$u_v = \Delta R / \Delta t.$$

На рис. 3 представлен график изменения видимой скорости пламени u_v в зависимости от его радиуса. На начальном участке при радиусе сферы от 0 до 0,5 см u_v имеет практически постоянное значение, равное 1,7 м/с для 7,5%-ной смеси и $\sim 2,3$ м/с для 10%-ной смеси, что соответствует нормальной скорости пламени u_n с учетом степени расширения продуктов горения ϵ , т. е.

$$u_v = u_n \epsilon.$$

Начиная с радиуса ~ 5 см наблюдается ускоренное распространение пламени. Для 7,5%-ной смеси при $R \approx 0,3$ м $u_v \approx 2,4$ м/с, а для 10%-ной смеси при $R \approx 0,5$ м $u_v \approx 4,5$ м/с. В дальнейшем рост видимой скорости прекращается и распространение сферического пламени происходит с постоянной скоростью: для смеси 7,5% $\text{CH}_4 + \text{воздух}$ $u_v \approx 2,4$ м/с и для смеси 10% $\text{CH}_4 + \text{воздух}$ $u_v \approx 4,5$ м/с.

Одновременно с началом увеличения видимой скорости распространения пламени наблюдается искривление поверхности его фронта — она становится ячеистой. Размер ячеек при возникновении ячеистой структуры (радиус сферы в этот момент составляет $\sim 0,05$ м) равен в среднем 1—2 см. По мере роста пламенной сферы размер ячеек увеличивается и достигает 6—10 см при радиусе сферы $\sim 0,5$ м. Перед распадом сферического пламени его фронт приобретает размытую неопределенную по глубине структуру и ячеистость практически не просматривается. Дробления ячеек на фиксируемом участке распространения пламени не наблюдалось.

Увеличение видимой скорости распространения сферического пламени можно объяснить искривлением поверхности пламени (возникновение ячеистой структуры) и увеличением его площади. Если принять, что массовая скорость горения постоянна и вся сфера покрыта ячейками, то объем продуктов горения от момента воспламенения до момента t

$$W = W_0 + \int_{t_0}^t u_n \epsilon \alpha(R) 4\pi R^2 dt$$

или

$$d/dt \cdot (W) = d/dt \cdot (4/3 \cdot \pi R^3) = 4\pi R^2 \alpha(R) u_n \epsilon, \quad (1)$$

где W — объем очага пламени; W_0 — объем сферического пламени до появления ячеек; t_0 — момент возникновения ячеек; R — радиус сферы, объем которой равновелик объему, заключенному в ячеистой поверхности; $\alpha(R)$ — отношение площади поверхности ячейки к центральной ее проекции на сферу радиуса R .

Из (1) следует, что видимая скорость пламени, равная скорости расширения сферы,

$$u_v = dR/dt = \alpha(R) u_n \epsilon.$$

В общем случае α зависит от R . В условиях проводившихся опытов ячейки имели приблизительно полусферическую форму и, следовательно, $\alpha \approx 2$. Величина α , вычисленная по наблюдавшейся в опытах видимой скорости пламени, как отношение скоростей после и до возникновения ячеек, составляет 1,95 для смеси 10% CH_4 +воздух и 1,5 для смеси 7,5% CH_4 +воздух.

Авторы благодарны Л. А. Ловачеву за участие в обсуждении результатов и замечания.

Поступила в редакцию 20/X 1976,
после доработки — 24/XII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. R. A. Strehlow. Fourteenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1973.
2. В. Н. Кривулин, Л. А. Ловачев и др. ФГВ, 1975, 11, 6.
3. В. С. Babkin, В. I. Babushok а. о. Archiwum termodynamiki i spalania, 1975, 6, 1.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛАМЕНАХ

Б. С. Фиалков, Н. Д. Щербаков, В. Т. Плицын

(Караганда)

Интерес к исследованию собственного электрического поля пламени обусловлен прежде всего противоречием между известными представлениями о нейтральности не только пламени в целом [1], но и отдельных его участков, включая и реакционную зону [2], и данными о развитии электронно-ионных явлений при горении, свидетельствующими о существенном различии их интенсивности в различных участках пламени [3, 4]. Последнее наряду с зависимостью подвижности частиц от массы должно, очевидно, способствовать нарушению нейтральности тех или иных зон и соответственно усложнению конфигурации поля.

Величина и распределение собственного электрического поля пламени имеют непосредственное прикладное значение, связанное с получающимися все большее распространение попытками воздействия на процесс горения, с помощью внешних электрических полей [5—7].

Экспериментальное изучение распределения электрического потенциала проведено в ламинарных пламенах (диффузионных и полученных при сжигании предварительно приготовленных смесей метана и пропан-бутана с воздухом). Коэффициент избытка воздуха в смеси изменялся от 0 до 1,2. Постоянство числа Рейнольдса, поддерживающегося во всех экспериментах в пределах 1300÷1360, позволило исключить влияние на конфигурацию поля аэродинамических факторов. Горючий газ смешивался с воздухом в тангенциальном смесителе и в выходящем сопле (диаметр 10 мм и длина более 20 калибров) двухпроводной коаксиальной горелки, которые обеспечивали полноту перемешивания и выравнивание скоростного поля потока.

Были приняты меры для надежного экранирования пламени от воздействия внешних полей. С этой целью горелочный комплекс и из-