

В пользу развитого выше представления о зависимости от параметров свидетельствуют, например, работы В. К. Баева и сотрудников (см. [12] и цитированную там литературу), в которых показано, что в случае развитого турбулентного потока ряд закономерностей горения (геометрия пламен, их срыв, частоты колебаний фронта) удовлетворительно описываются критерием  $Но = \tau_0 W/d$ , который аналогичен  $\tau_+/\tau_1, \tau_0/\tau_1$ .

Наконец, в пользу интерполяционных формул свидетельствует и теоретическое исследование поведения фронта ламинарного пламени в турбулентном потоке [13].

Поступила в редакцию  
10/11 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖХФ, 1948, 22, 1.
2. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1954.
3. А. С. Соколик, В. П. Карпов, Е. С. Семенов. ФГВ, 1967, 3, 1.
4. Б. В. Раушенбах и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М., «Машиностроение», 1964, с. 278.
5. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд. АН СССР, 1963.
6. L. S. Kovasznaу. Jet. Prop., 1956, 26, 6.
7. M. Summerfield et al. Jet. Prop., 1955, 25, 8.
8. Е. С. Щетинков. Физика горения газов. М., «Наука», 1965.
9. Г. И. Баренблатт, Н. И. Сивашинский. ПММ, 1969, 33, 5.
10. Я. Б. Зельдович, Д. А. Франк-Каменецкий. Турбулентное и гетерогенное горение. М., Изд. ММН, 1947.
11. В. С. Баушев, В. Н. Вилюнов. ПМТФ, 1972, 3.
12. В. К. Баев, П. К. Третьяков, В. А. Ясаков. Сб. «Горение и взрыв». М., «Наука», 1972.
13. А. М. Климов. ПМТФ, 1963, 3.

УДК 662.612.3

### О ПОЛОЖЕНИИ НИЖНЕЙ ПОДЖИГАЮЩЕЙ КРОМКИ ПЛАМЕНИ И ВОПРОСЫ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ

*А. М. Левин, В. Д. Лозовой*  
(Саратов)

Многочисленные исследования пламени бунзеновских горелок, начиная с работ В. А. Михельсона [1] по теории горения, составили основу представлений о распределении скоростей газовой смеси, скорости распространения пламени и о вопросах устойчивости горения. Было установлено наличие повышенной скорости распространения пламени у закругленной вершины конуса пламени бунзеновской горелки вследствие интенсивного подогрева газовой смеси и резкое ее снижение у торца огневого отверстия вследствие отвода тепла от пламени к холодным стенкам. Благодаря последнему обстоятельству между торцом огневого отверстия и основанием конуса горения образуется так называемое мертвое пространство. Детальное исследование линий тока скоростей стехиометрической газовой смеси и продуктов сгорания в пламени бунзеновской горелки проведено Льюисом и Эльбе [2] методом трассирующих частиц.

Одним из авторов статьи была использована методика работы [2] для изучения структуры факела при изменении коэффициента избытка первичного воздуха  $\alpha$  в пределах от 0 до 1,2 [3]. Из представленного в [2] распределения скоростей и линий тока в пламени бунзеновской горелки видно, что у нижней кромки пламени располагаются точки, в которых линии тока проходят нормально к фронту пламени. Для этих точек правило косинусов Михельсона может быть сформулировано следующим образом:

$$\omega_c = u_{нл}, \quad (1)$$

где  $\omega_c$  — местная скорость смеси;  $u_{нл}$  — нормальная скорость распространения пламени. Эти точки и образуют нижнюю поджигающую кромку, обеспечивающую устойчивое горение. Эта важная роль нижней поджигающей кромки в вопросах стабилизации по отношению к отрыву пламени отмечена в работах [2, 4].

Особый интерес представляет устойчивость пламени по отношению к отрыву при изменении состава газовой смеси. Известно, что при сжигании богатых газоздушных смесей, устойчивость по отношению к отрыву уменьшается с увеличением содержания воздуха в смеси. Большая склонность к отрыву проявляется несмотря на возрастание скорости распространения пламени с увеличением  $\alpha$ . Указанное явление объясняется Льюисом и Эльбе наличием градиента концентрации топлива на границе газового потока и диффузией кислорода из атмосферы в исходную смесь. Такое объяснение не позволяет предложить какие-либо уравнения для определения количественной зависимости условий отрыва от состава газовой смеси. Известно лишь чисто эмпирическое выражение зависимости критического значения градиента скорости от коэффициента избытка воздуха при отрыве, предложенное в [5]

$$g_{отр} = a \cdot 10^{-kx/100},$$

где  $\frac{x}{100} \cong \alpha$ ,  $k$  и  $a$  — постоянные для данного газа.

Зависимость устойчивости пламени по отношению к отрыву от содержания воздуха в богатых газоздушных смесях можно объяснить иначе, если, согласно высказанному ранее предположению [6], рассмотреть перемещение нижней поджигающей кромки пламени при изменении состава смеси. Нижняя поджигающая кромка располагается всегда в зоне перемешивания начального участка струи газовой смеси (рис. 1). В этой зоне скорости смеси падают от  $\omega = \max$  на границе ядра струи до  $\omega = 0$  на ее внешней границе. Известно, что с увеличением  $\alpha$  уменьшается высота внутреннего конуса пламени. Можно предположить, что при этом уменьшается и радиус нижней поджигающей кромки пламени, т. е. поджигающие точки приближаются к оси струи и попадают в зону больших местных скоростей смеси. Тогда увеличение  $\alpha$  приведет к резкому возрастанию местной скорости смеси у поджигающей точки и может возникнуть неравенство, характеризующее отрыв пламени,

$$\omega_c > u_{нл}.$$

Обработка экспериментальных данных по отрыву пламени позволила описать зависимость между коэффициентом избытка первичного

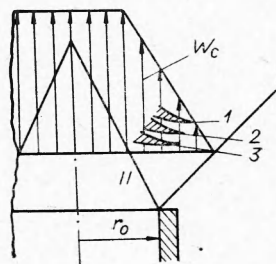


Рис. 1. Схема расположения нижней поджигающей кромки пламени при  $\alpha$ , равном 0,6 (1), 0,8 (2) и 1,0 (3).

I — внешняя граница; II — граница ядра струи.

воздуха и средней скоростью смеси  $W_0$ , при которой происходит отрыв [7]

$$W_{0\alpha} = W_{0\alpha=1} C_r',$$

где  $W_{0\alpha}$  — средняя скорость смеси с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha$  при отрыве;  $W_{0\alpha=1}$  — то же, при значении  $\alpha=1$  (стехиометрическая смесь);  $C_r'$  — относительная концентрация горючей смеси по сравнению со стехиометрической. Значения предельных скоростей при отрыве можно заменить соответствующими значениями критических градиентов скорости

$$g_{отр\alpha} = g_{отр\alpha=1} C_r'$$

В связи с изложенным представляет интерес экспериментальное подтверждение смещения нижней поджигающей кромки факела при изменении состава сжигаемой газовой смеси. Определение положения нижней кромки факела проводилось методом трассирующих частиц и измерением степени ионизации пламени. В первом случае в газоздушную смесь вводился мелкозернистый порошок окиси магния  $MgO$ . Смесь сжигалась в плоской трубке с закругленными краями. Пламя с частицами окиси магния пересекалось над устьем горелки световым ножом в плоскости, перпендикулярной длинной стороне горелки. Толщина светового ножа не превышала  $1,5 \div 2$  мм. В качестве источника света применялась лампа-вспышка, так как частицы окиси магния должны быть освещены значительно ярче, чем они светятся в пламени. Применение лампы-вспышки позволяет, кроме того, получить следы нераскаленных частиц. Пламя помещалось между источником света и рефлектором так, что частицы дополнительно освещались отраженным светом. Световой поток прерывался стробоскопом, и пламя фотографировалось в световой плоскости камерой, у которой оптическая ось объектива была установлена перпендикулярно световой плоскости. На фотоснимке след каждой освещенной частицы  $MgO$  — это ряд светлых узких штрихов.

Пламя фотографировалось фотоаппаратом «Кристалл» с объективом «Гелиос-40» на киноплёнку светочувствительностью 180—250 ед. по ГОСТу. При помощи синхроконтakta лампа-вспышка включалась в момент, когда затвор фотоаппарата был полностью открыт.

При исследовании влияния состава газовой смеси на положение нижней поджигающей кромки при горении в неподвижной окружающей атмосфере расход газовой смеси оставался постоянным и равным  $1,13 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что соответствовало средней скорости истечения газовой струи из устья горелки  $W_0=1 \text{ м/с}$ . Расход газа последовательно уменьшался, а воздуха соответственно увеличивался, так что коэффициент избытка первичного воздуха возрастал от 0 до 1,2 и выше, пока пламя не отрывалось от устья горелки и не гасло. В бедных смесях с  $\alpha > 1,21$  точный состав смеси установить не удалось, так как измерение малых расходов газа было связано с большими погрешностями.

Полученные фотографии пламени дали возможность проследить влияние состава газовой смеси на структуру пламени. Если при  $\alpha < 0,21$  внутренний конус пламени<sup>1</sup> не различим, то при  $\alpha=0,23 \div 0,49$  видно, что в нижней части пламени от наружной мантии отслаивается внутренний конус. При  $\alpha=0,97$  внутренний конус полностью от-

<sup>1</sup> Здесь используется традиционное выражение «внутренний конус», хотя в случае плоской горелки речь идет о поверхности двугранного угла.

делился. При  $\alpha \geq 1,21$  полностью виден четкий внутренний конус. Высота конуса последовательно уменьшается, составляя 60, 29 и 22 мм.

Для проверки основного предположения о влиянии положения нижней кромки пламени на устойчивость горения по фотоснимкам была измерена ширина нижней кромки пламени. На

рис. 2 приведена зависимость этой величины от состава газовой смеси (кривая 1). Видно, что с увеличением коэффициента избытка первичного воздуха ширина нижней кромки последовательно уменьшается, оставаясь, однако, больше ширины огневого отверстия в свету.

Положение нижней поджигающей кромки пламени определялось также методом измерения степени ионизации (двойной зонд) с учетом возможных погрешностей описанного метода. Разность потенциалов на электродах зонда, выполненных из нержавеющей стали, составляла 1,5 В. В момент соприкосновения электродов с фронтом горения в цепи зонда появляется электрический ток, обусловленный ионизацией в пламени. Электроды зонда соприкасались с ионами газа только своими торцовыми поверхностями.

Ток ионизации регистрировали во время быстрого пересечения (прострела) ионизационным зондом нижней поджигающей кромки пламени. Зонд был жестко закреплен на подвижной каретке, которая перемещалась по двум горизонтальным направляющим при помощи пружин.

Во время прострела нижней поджигающей кромки пламени сигнал с зонда поступал на вход усилителя постоянного тока. Усиленный сигнал подавался на вибратор шлейфового осциллографа. Для определения размеров нижней поджигающей кромки пламени в схеме предусмотрен так называемый отметчик положения, состоящий из набора латунных шайб толщиной 0,8 мм, расположенных на расстоянии 3,5 мм одна от другой, с эбонитовой прокладкой. С зондом жестко связан подвижный контакт — подпружиненный шарик.

Латунные шайбы и подвижный контакт составляли электрическую цепь, к которой подавалось напряжение 0,5 В. Во время прострела подвижный контакт скользил по шайбам и эбонитовым прокладкам и замыкал электрическую цепь отметчика положения. Получаемая последовательность импульсов поступала на шлейфовый осциллограф и записывалась на той же осциллограмме, что и ток ионизации. Отметчик аналогичной конструкции был применен в работе [8]. На рис. 3 приведена осциллограмма, полученная при простреле зондом нижней поджигающей кромки пламени. Импульсы (всплески) тока ионизации получают в момент соприкосновения электродов зонда с внешней поверхностью пламени. Для определения точности измерения подсчитывался коэффициент, учитывающий погрешность измерения записи сигнала на осциллограмме (инерционность вибраторов, инерционность нарастания и убывания сигнала, погрешность механического контакта)



Рис. 3. Осциллограмма прострела нижней поджигающей кромки пламени двойным зондом.

1 — сигнал с зонда (импульсы тока ионизации); 2 — сигнал отметчика положения ( $a$  — ширина нижней кромки пламени).

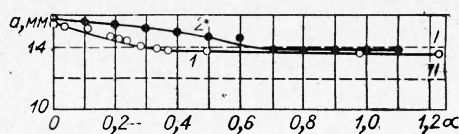


Рис. 2. Зависимость ширины нижней кромки пламени  $a$  от коэффициента избытка первичного воздуха  $\alpha$ .

1 — метод трассирующих частиц; 2 — метод зонда; I, II — ширина наружной и внутренней кромки огневого отверстия соответственно.

$$k = \frac{m_1}{m_2},$$

где  $m_1 = \frac{\sum \delta_2}{\sum \delta_1}$  — действительное отношение сум-

марной толщины эбонитовых прокладок  $\delta_0$  к суммарной толщине латунных шайб  $\delta_{\Sigma}$ ;  $m_2 = \frac{\sum \delta_{\Sigma,0}}{\sum \delta_{\Sigma,л}}$  — то же отношение для значений, снятых с осциллограммы. В нашем случае  $m_1 = 5,1$ ,  $m_2 = 4,87$ , а  $k = 1,048$ , т. е. ошибка измерения не превышала 5%, что для наружной кромки огневого отверстия шириной 14 мм составляет 0,7 мм. Результаты измерений приведены на рис. 2, 2. Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что результаты измерений положения нижней поджигающей кромки пламени обоими методами примерно совпадают. Применение методов трассирующих частиц и измерение степени ионизации позволило определить динамику положения нижней поджигающей кромки пламени в зависимости от состава газозвушной смеси.

Проведенные исследования дают возможность сделать следующие выводы.

1. Экспериментально подтверждена зависимость ширины нижней поджигающей кромки пламени от коэффициента избытка первичного воздуха.

2. Во всех случаях ширина нижней кромки пламени больше ширины огневого отверстия в свету.

3. Смещение нижней поджигающей кромки пламени к оси газозвушной струи при увеличении содержания первичного воздуха в смеси является причиной большей склонности пламени к отрыву.

*Поступила в редакцию  
25/IV 1974*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Михельсон. Собрание соч., т. 1. «Новый агроном», 1930.
2. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М., «Мир», 1968.
3. А. М. Левин. Докт. дисс. Саратов, 1968.
4. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. М., Изд-во МГУ, 1957.
5. К. Воль, Н. Капп, К. Гаслей. В сб. «Вопросы горения», № 1. М., ИЛ., 1953.
6. А. М. Левин. В сб. «Использование газа в народном хозяйстве», вып. III. Саратов, «Коммунист», 1965.
7. А. М. Левин. В сб. «Теория и практика сжигания газа». Л., «Недра», 1972.
8. А. И. Михайлов и др. Труды МАИ, вып. 106. М., Оборонгиз, 1959.

УДК 541.128+622.612

### НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗОНА ФРОНТА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛАМЕН. II. ОКИСЛЕНИЕ ПРОПАНА ВБЛИЗИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ПРИСУТСТВИИ $C_2F_4Br_2$

*Г. И. Ксандопуло, Б. Я. Колесников, Д. С. Однорог  
(Алма-Ата)*

В работе [1] было показано, что в пропан-воздушном пламени пропан вступает в реакцию практически при комнатной температуре, а вблизи зоны свечения почти весь израсходован. Свыше половины прореагировавшего пропана конвертируется в  $CO_2$  и  $CO$  уже на самых ранних стадиях горения, т. е. также при температурах, незначительно превышающих комнатную. Предполагалось [1], что это объясняется