

Рис. 4. Зависимость потенциала сопла  $\varphi$  и прикладываемого напряжения  $U$  от коэффициента избытка окислителя. 1 — электрический потенциал сопла при постоянной скорости потока; 2 — то же, при постоянном общем расходе; 3 — электрическое поле наложено на область подготовки; 4 — на область догорания.

ми параметрами, как считалось ранее [2], но и другими процессами, которые нужно учитывать вкуче со специфической электризацией [4]. Механизм воздействия внешнего электрического поля можно описать, основываясь на приведенном объяснении влияния поля на процесс горения. Считаем, что электризация сопла идет при участии по крайней мере двух механизмов (специфической электризации поверхности сопла при его нагреве и взаимодействии заряженных частиц, генерируемых пламенем, с заряженной поверхностью). В этом случае можно предположить, что наложение поперечного электрического поля на область подготовки (заставляющее ориентироваться полярные молекулы, а заряженные частицы двигаться по направлению силовых линий) в первом случае (центральный электрод положительный) способствует рекомбинации заряженных частиц на сопле, уменьшая его заряд, или препятствует ей во втором случае (на центральном электроде минус) и тогда заряд сопла, обусловленный специфической электризацией металла, растет.

Показательно, что при повышении степени ионизации продуктов горения путем введения в камеру раствора NaCl потенциал сопла уменьшался, что подтверждает сказанное выше (рост числа ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в потоке ускоряет рекомбинацию последних с зарядами на поверхности сопла, возникшими в результате специфической электризации). Обнаруженные эффекты могут быть использованы для увеличения степени сгорания топлива в энергетических агрегатах, снятия заряда с сопловых поверхностей и т. д.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Черепнин С. Н. // Тезисы докладов семинара по электрофизике горения.— Караганда, 1986.
2. Электрогазодинамика течения/Под ред. А. Б. Ватажина.— М.: Наука, 1983.
3. Потанов Г. П., Ившин В. П. // Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов.— Казань, 1973.— Вып. 158.
4. Филалков Б. С. // Горение органического топлива // Материалы V Всесоюз. конф.— Новосибирск, 1985.

г. Караганда

Поступила в редакцию 9/1 1990

УДК 622.126

Г. Т. ЦЫГАНКОВ

#### СТРУКТУРА, ФОРМА И РАЗМЕРЫ ЖЕСТКОГО ЛАМИНАРНОГО ФАКЕЛА

Жесткий ламинарный факел (ЖЛФ) развивается и существует в определенных условиях и имеет ясно видимые контуры (рис. 1, коэффициент избытка воздуха  $n = 0,6$ ). Под ЖЛФ подразумевается такой

© 1990 Цыганков Г. Т.

78

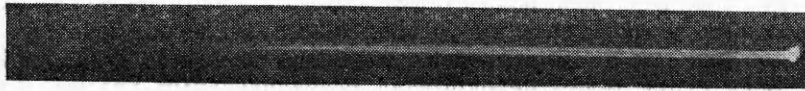


Рис. 1.

факел, который существует при больших числах Рейнольдса  $Re$  сколько угодно длительное время, имеет значительное динамическое давление на оси потока, вследствие чего при любой ориентации его в пространстве не теряет целостности и направленности своего движения и в то же время сохраняет основное свойство ламинарного факела: бесшумное поверхностное горение. ЖЛФ относится к новому, ранее неизвестному типу факела. Для его получения используется установка, состоящая из смесителя, трубопроводов для подвода газа и воздуха (кислорода), расходомеров, компрессора, вентиля для регулирования расхода и измерительных устройств для определения геометрических размеров, аэродинамических, тепловых и других характеристик факела. Измерительные устройства устанавливаются и крепятся на координатнике, который обеспечивает их перемещение по трем координатным осям.

ЖЛФ получается следующим образом. Смесь топлива и окислителя с различным коэффициентом избытка воздуха (кислорода)  $n$  истекала из сопла в окружающее пространство и сразу же поджигалась от самостоятельного поджигающего устройства, в качестве которого может быть использовано пилотное пламя обычной поджигающей горелки, раскаленное тело со вдувом газа, постоянно действующий электроразряд или их комбинация. Режим факела при числах  $Re > Re_{кр}$  зависит от высоты расположения поджигающего устройства над концом сопла основной горелки. В случае расположения поджигающего устройства на высоте  $l/d_0 = 2-3$  калибра от среза сопла ( $d_0$  — диаметр сопла) при  $Re > Re_{кр}$  факел всегда находится в турбулентном режиме.

Когда поджигающий источник расположен на участке  $l/d_0 < 3$  при тех же условиях по составу смеси и  $Re = 3000 \div 30\,000$  (скорость истечения  $u \leq 90$  м/с), то формируется, устойчиво и длительно существует жесткий ламинарный факел со значительным динамическим давлением на оси потока. Устойчивое ламинарное горение здесь обеспечивается образованием наружной горячей оболочки. Для исследования устойчивости последней в таких условиях на ЖЛФ нормально к нему при числах  $Re > 8000$  через наконечник направлялась турбулентная струя воздуха с  $u = 30 \div 35$  м/с. Установлено, что она на участке  $l/d_0 \leq 40 \div 60$  по визуальным наблюдениям практически не оказывала никакого влияния на факел, хотя частично деформировала в месте касания горящую оболочку (вдавливала ее внутрь потока). При  $l/d_0 > 60-70$  струя воздуха вызывала местную турбулентность на поверхности факела, которая сносилась по потоку. Струя, направленная на вершину факела, сдувала ее или дробила на отдельные части.

Наружная горячая оболочка ЖЛФ «прорезалась» в разных местах по длине факела в направлении, перпендикулярном движению основного газового потока, различными предметами толщиной 1—1,5 мм. Установлено, что в момент «прорезания» на участке  $l/d_0 \leq 50 \div 60$  на поверхности факела в месте «прорезания» возникала локальная турбулентность и был слышен сильный шум. Возникающая турбулентность по визуальным наблюдениям на небольшом расстоянии по направлению движения потока исчезала и целостность горячей оболочки восстанавливалась. После расстояния  $(60-70) d_0$  и по мере приближения к вершине факела шум в момент «прорезания» горячей оболочки уменьшался и в вершине факела совсем исчезал.

На газовый поток ЖЛФ воздействовали струями гелия, углекислого газа, азота и водяного пара. Установлено, что подача гелия в устье горелки (корень факела) во всех случаях при указанных числах  $Re$  приводила только к образованию и существованию турбулентного факела,

хотя струя гелия не оказывала существенного влияния на режим работы поджигающего устройства и он устойчиво выполнял свои функции. При обдуве поверхности ЖЛФ струей He уменьшается толщина горячей оболочки. Если струя гелия перекрывала незначительный участок факела, составляющий меньше половины его периметра, то он продолжал существовать в ламинарном режиме. Если струя He перекрывала большую поверхность, факел переходил в турбулентный режим.

Исследовалось поведение и развитие ЖЛФ в закрытом объеме, заполненном инертным газом. Если ЖЛФ с  $n < 1$  ввести в закрытый объем с инертным газом, то он сразу же прекращает свое существование, хотя поджигающее устройство в таких условиях устойчиво работает. Опытами доказано, что при установке газовой горелки в закрытый объем с инертным газом при недостатке окислителя получить ЖЛФ невозможно, хотя выполняются все условия, необходимые для его устойчивого и длительного существования.

Из обобщения полученных данных можно сделать вывод, что наружная горячая оболочка достаточно надежно защищает газовый поток внутри и снаружи ЖЛФ от воздействия внешней среды, а также способствует быстрой ликвидации случайно возникшей локальной турбулентности на его поверхности и внутри.

Устойчивому существованию ЖЛФ можно дать такое толкование. При поджигании газовой смеси, истекающей из сопла, на поверхности факела выделяется достаточное количество тепла, обеспечивающее по тепловому балансу расход тепла по законам теплопередачи и для поддержания температур, при которых надежно поджигается смесь, поступающая в зону горения. В этом случае образуется наружная горячая оболочка как одно из главных условий существования ЖЛФ и происходит длительное устойчивое поверхностное горение в ламинарном режиме.

**Фронт горения.** В ЖЛФ газозвушной смеси отчетливо видны наружная горячая оболочка (фронт пламени) и внутренний конус (см. рис. 1). ЖЛФ газокислородной смеси состоит из ярко светящейся наружной горячей оболочки и внутреннего, с синеватым оттенком, конуса. Светимость наружной оболочки газокислородного факела гораздо выше, чем газозвушного, причем вследствие более высоких температур ее толщина на порядок выше.

ЖЛФ можно ориентировать вертикально вниз, в этом случае он имеет заостренную вершину. Фронт горения газозвушного факела при  $0,4 < n < 1$  представляет собой тонкий слой толщиной 0,4—1,0 мм (последняя зависит от свойств сжигаемого газа и  $n$ ). Он устойчив к различного рода механическим и физическим воздействиям, но при  $n > 0,8$  и  $Re > 15\,000$  вершина факела иногда разрушалась и фронт горения терял целостность и распадался.

Толщину фронта горения газозвушного факела удобно наблюдать визуально, прорезав горизонтальной или наклонной плоскостью контур факела (наружную горящую оболочку). При этом фронт горения движется по контуру тела сопротивления и может разворачиваться, изменять направление своего движения, плотно прижимаясь к телу, и принимать в принципе любые формы и очертания, сохраняя на определенной длине свои инерционные свойства: ламинарность потока и высокую устойчивость при встрече с преградой (например, цилиндром (рис. 2)).

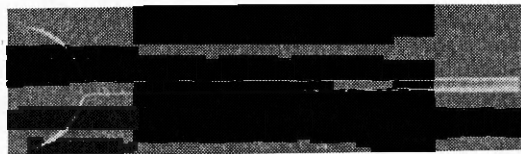


Рис. 2.

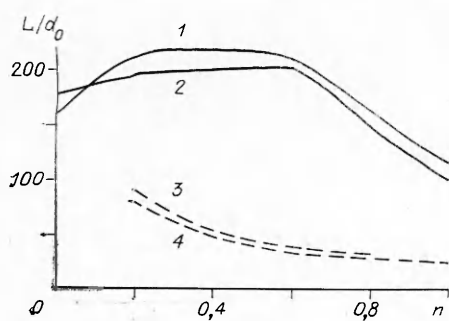


Рис. 3.

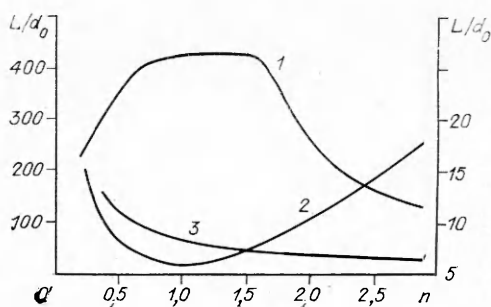


Рис. 4.

Фронт горения ЖЛФ формируется только при наличии определенных условий по составу газовой смеси, способам поджигания и истечения. В газовой смеси с  $n < 0,2$  обеспечить устойчивое и длительное существование фронта горения ЖЛФ не представляется возможным.

**Зависимость длины ЖЛФ от величины  $n$ .** На рис. 3 представлены данные, характеризующие изменение длины жесткого ламинарного газоздушного факела при расходе смеси  $V = 8,35 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $d_0 = 4 \text{ мм}$  (кривая 2) и  $V = 2,34 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $d_0 = 2 \text{ мм}$  (1) в зависимости от  $n$ . Для качественного сопоставления на рис. 3, 3, 4 приведены значения длины турбулентного факела при тех же условиях. Возрастание  $l/d_0$  при  $n = 0 \div 0,2$  объясняется повышением скорости истечения. При недостатке окислителя это приводит к тому, что горение происходит на большем расстоянии. Уменьшение  $l/d_0$  при  $n > 0,6$  связано с тем, что при увеличении доли окислителя в смеси недостающий до стехиометрического соотношения кислород поступает в факел на более коротком расстоянии.

На рис. 4, 1 представлено изменение длины ЖЛФ газокислородной смеси и турбулентного факела (кривая 3) в зависимости от  $n$  при  $V = 4,17 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $d_0 = 2 \text{ мм}$ . Как видно из рис. 3 и 4, длина ЖЛФ превышает длину турбулентного факела в 5–6 раз для газоздушной смеси и в 5–8 раз для газокислородной смеси при одном и том же расходе газа.

Из приведенных данных следует, что интенсивное уменьшение длины ЖЛФ наблюдается в интервале  $n = 0,6 \div 0,8$  для газоздушной и при  $n > 1$  для газокислородной смеси (см. рис. 3, 4).

**Зависимость длины ЖЛФ от тепловой нагрузки.** Исследования показали, что значение  $l/d_0$  при постоянном  $n$  растет линейно с увеличением тепловой нагрузки как для газоздушных, так и для газокислородных смесей (рис. 5). Измерения при  $n = 0$  хорошо согласуются с работами [1, 2]: кривая с максимумом характеризует последовательный переход от ламинарного режима к турбулентному. Установлено, что мощность поджигающего источника оказывает некоторое влияние на  $l/d_0$ , поэтому при проведении опытов принимались меры к обеспечению одинаковых условий поджигания, а мощность поджигающего источника регулировалась так, чтобы наружная горящая оболочка факела по визуальным наблюдениям не деформировалась и длина факела получалась максимальной. Для газоздушной смеси стехиометрического состава  $l/d_0$  может быть определена по известной формуле Михельсона [1, 2].

**Внутренний конус ЖЛФ** отчетливо виден в интервале  $n = 0,6 \div 0,8$  (газоздушные смеси) и  $n = 0,4 \div 2,9$  (газокислородные смеси). При приближении к составу стехиометрической смеси его яркость в газоздушной смеси уменьшается, цвет становится бледно-голубым, контуры менее четкими. При  $n > 1$  контуры внутреннего и внешнего конуса сливаются.

Длина внутреннего конуса ЖЛФ ( $L_k$ ) зависит от  $d_0$ ,  $V$  и  $n$ . Как видно из рис. 4, 2 значение  $L_k/d_0$  для газокислородного факела уменьшается при приближении состава к стехиометрии, переходит через минимум, потом медленно растет. Увеличение  $L_k/d_0$  после перехода через

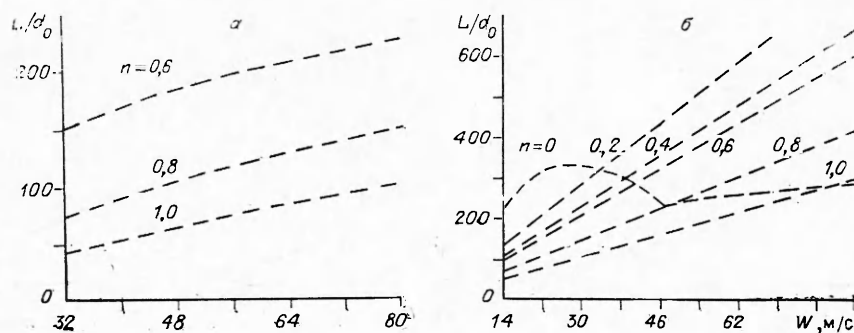


Рис. 5.

стехиометрию можно объяснить тем, что с ростом  $n$  уменьшается скорость нормального распространения пламени.

Замечено, что конус газокислородного факела четко виден в интервале  $n = 0,4 \div 2,9$ , а газозвдушного факела при  $0,4 < n < 1$ . Объясняется это тем, что фронт горения в первом случае имеет более высокую температуру, следовательно, и светимость. Установлено, что величина  $L_w/d_0$  ламинарного факела газозвдушной смеси на порядок и больше превышает длину конуса газокислородной смеси.

Особым образом ведет себя вершина внутреннего конуса ЖЛФ. В зависимости от величин  $w$  и  $n$  она изменяет свою форму от остроконечной до выпуклой. Из обобщенных опытных данных установлено, что угол при вершине внутреннего конуса газозвдушного ЖЛФ составляет  $1-2^\circ$  и его величина зависит от скорости и состава истекающей среды.

При  $w = 20 \div 50$  м/с,  $n = 0,2 \div 0,6$  вершина внутреннего конуса ЖЛФ имеет остроконечную форму, т. е. ее образующие являются продолжением образующих внутреннего конуса. С увеличением скорости движения до  $60-70$  м/с и  $n = 0,7 \div 0,8$  образующие внутреннего конуса у самой вершины терпят излом; остроконечную форму еще вершина факела не теряет, но она имеет уже больший угол между образующими. При дальнейшем росте  $w$  и  $n = 1$  вершина факела изменяет свою форму от клинообразной до выпуклой, а потом переходит в полусферу.

Изменение формы вершины факела связано с увеличением скорости распространения пламени и более интенсивного развития процесса горения у вершины по сравнению с другими участками факела. В этом случае по образующим конуса интенсивно подводится тепло из зоны реакции внутрь острой вершины факела, что вызывает не только рост  $w$ , но и на коротком участке от вершины более сильное падение плотности внутри его. С увеличением  $w$  при  $n = 1$  горение происходит более интенсивно, острая вершина факела исчезает и образующие внутреннего конуса (фронта горения) хотя и сохраняют свое прежнее положение, соединяются сверху в виде выпуклой поверхности, а при росте тепловой нагрузки эта поверхность переходит в полусферу.

**Диаметр ЖЛФ** больше диаметра сопла и зависит от состава газа и числа  $Re$ . Установлено, что чем больше  $Re$ , тем меньше диаметр факела при постоянном расходе газа. Диаметр факела на высоте 150 мм от конца сопла составляет  $(10-13) d_0$  для газокислородной смеси и  $(1,5-4) d_0$  для газозвдушной в зависимости от  $n$  и расхода газа.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Ответственной за высокую устойчивость ЖЛФ является наружная горящая оболочка.

2. Изменяя начальные условия, можно формировать различные типы факелов при одинаковых условиях сжигания по составу топлива и окислителя и числам  $Re$ , что позволяет управлять процессом горения и его интенсификацией.

3. Условия развития, геометрические размеры и форма ЖЛФ имеют принципиальное отличие от обычного (классического) ламинарного факела.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гейдон А. Г., Вольфгард Х. Г. Пламя, его структура, излучение и температура.— М.: Металлургиздат, 1959.
2. Щегинков Е. С. Физика горения газов.— М.: Наука, 1965.

г. Днепропетровск

Поступила в редакцию 28/IV 1989,  
после доработки — 24/X 1989

УДК 536.46 : 629.7

Н. Н. ПАНЧЕНКО

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ С ПРОЦЕССОМ ГОРЕНИЯ

При сжигании топлив в форсированных топочных устройствах, например камерах сгорания ГТД, существенное значение приобретает шум, генерируемый пламенем [1]. Из-за корреляции между пульсациями давления и скорости этот шум может оказывать влияние на горение, изменяя его характеристики, или даже вызывать вибрационное горение [2]. В [3] изучалось влияние звука на открытый диффузионный факел с целью управления процессом горения. Обнаружено, что в зависимости от частоты колебаний давления изменяется распределение средней температуры.

В настоящей работе предпринята попытка экспериментального изучения акустических характеристик пламени при воздействии на него колебаний давления. В экспериментах использовалась струйная горелка, работающая на перемешанных воздухе и пропане. Диаметр выходного отверстия горелки — 4 мм. Горелка 9 (рис. 1) размещена в нижнем торце акустического резонатора 1 и акустически задемпфирована от системы подачи. Длина акустического резонатора — 1070 мм подобрана из расчета, чтобы его собственные акустические частоты определялись соотношением  $f_n = 200n$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$  — номера гармоник. Кроме этого, резонатор работал как гельмгольцевский на частоте 50 Гц.

Акустические колебания генерировались генератором электрических колебаний ГЗ-118 4, сигнал с которого контролировался цифровым частотомером ЧЗ-35 5 и усиливался усилителем мощности ТУ-100 3, после чего подавался на электродинамическую головку ЭДГ-10 2. Возмущения давления регистрировались электретным микрофоном МКЭ-2 8, затем усиливались измерительным усилителем У5-10 7. Спектральный состав сигнала изучался третьоктавным анализатором спектра 01-024 (ГДР) 6.

В экспериментах суммарный расход топлива составлял 0,12 г/с, скорость истечения горючей смеси — 4,1 м/с. На одной из собственных акустических частот резонатора возбуждали регулярные колебания давления различной интенсивности. При этом регистрировался уровень шума на всех резонансных частотах до 1000 Гц. Эксперименты повто-

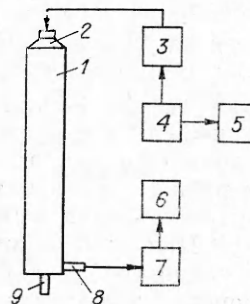


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и системы измерений.