

Г. Т. Цыганков

ТЕМПЕРАТУРА И СОСТАВ ГАЗОВ НА ОСИ И В ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЯХ ЖЕСТКОГО ЛАМИНАРНОГО ФАКЕЛА

Исследованы температура и состав газов на оси и в поперечных сечениях жесткого ламинарного факела.

Под жестким ламинарным факелом (ЖЛФ) понимается такой факел, который существует при больших числах Рейнольдса Re , 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. Для получения ЖЛФ используется установка, состоящая из смесителя, сопла, измерительных устройств для определения аэродинамических, тепловых и других характеристик и источника поджигания.

Смесь топлива и окислителя с коэффициентом избытка воздуха (кислорода) n подводится к соплу, выбрасывается через него в окружающее пространство и поджигается постоянно действующим источником. Режим факела при $Re > Re_{кр}$ зависит от высоты расположения поджигающего устройства над концом сопла. Если источник поджигания находится на длине участка 2—3 калибра, то образуется ЖЛФ, если он расположен выше над соплом на 2—3 калибра (диаметра сопла d_0), то будет существовать турбулентный факел при одинаковых условиях сжигания по составу смеси и Re . Этот процесс хорошо иллюстрируется рис. 1 и 2. Такой принцип работы газогорелочного устройства обеспечивает при одинаковых числах Рейнольдса, аэродинамике потока и составах смеси получение как жесткого ламинарного, так и турбулентного факела, что позволяет управлять процессом горения и его интенсификацией.

Ответственна за высокую устойчивость ЖЛФ наружная горящая оболочка (фронт горения), которая образуется при соблюдении указанных условий. Она не только удерживает поток большой скорости в ла-

Рис. 1. Жесткие ламинарные (а) и турбулентные (б) факелы газозвушной смеси при $d_0 = 4$ мм, $V_r = 8,35 \cdot 10^{-5}$ м³/с.
 n : 1 — 0, 2 — 0,4, 3 — 0,6, 4 — 0,8.

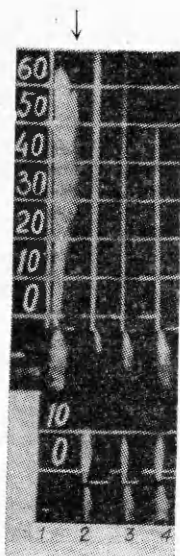


Рис. 2. Жесткий ламинарный (1) и турбулентный (2) факелы при одних и тех же условиях сжигания по составу смеси и числам Рейнольдса; $n = 0,8$, $d_0 = 2$ мм, $w = 62,5$ м/с.

минарном режиме, но и гасит незначительную турбулентность, возникающую на поверхности и внутри факела. ЖЛФ имеет четкие очертания и принципиальное отличие от обычного классического ламинарного факела (см. рис. 1 и 2).

В связи с получением ЖЛФ в данной работе проведено исследование температуры и состава газов на его оси и в поперечных сечениях.

Температура на оси и в поперечных сечениях ЖЛФ

При определении температуры ЖЛФ использовались общепринятые методы [1]. До 1000 °С использовались медь-константановые и хромель-



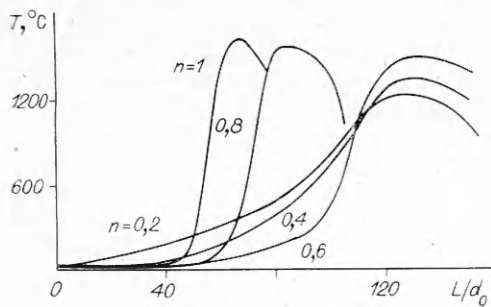


Рис. 3. Температура на оси ЖЛФ газовоздушной смеси для сопла с $d_0 = 4$ мм и различных n в зависимости от безразмерного расстояния для $V_r = 8,35 \cdot 10^{-5}$ м³/с = const.

алюмелевые термопары с диаметром проволоки 0,1—0,3 мм и платино-родий-платиновые диаметром 0,1—0,5 — при $T > 1000$ °С. Все термопары индивидуально тарировались. Часть из них для измерения температур выше 700 °С имела специальные защитные покрытия спая из керамики.

Для оценки влияния энергии излучения показания термопары ее спай помещался в защитный цилиндрический экран из нержавеющей трубки диаметром 3—4 мм и толщиной стенки 0,1—0,15 мм. Установлено, что экранирование не изменяет показаний термопары.

Для защиты термопары от высокотемпературного воздействия наружной горячей оболочки использован специальный водяной холодильник, внутрь которого помещалась термопара, а ее спай выводился наружу. С помощью холодильника высокотемпературная горячая оболочка факела «прорезалась», что давало возможность без повреждения термопары ввести ее внутрь потока и проводить необходимые измерения. Факел до корпуса холодильника находился в ламинарном режиме, за ним частично турбулизовался.

Изменение температуры на оси ЖЛФ от безразмерного расстояния приведено на рис. 3. Анализ полученных данных показывает, что температура на оси жесткого ламинарного газовоздушного факела на большом расстоянии от конца сопла повышалась очень медленно или же оставалась без изменения. Так, для сопла с $d_0 = 2$ мм, $V_r = 2,34 \times 10^{-5}$ м³/с температура на оси факела на расстоянии $(30 \div 35) d_0$ возросла по сравнению с первоначальной на 180 °С при $n = 0,4 \div 1,0$, в то время как температура наружной горячей оболочки ~ 1500 —1680 °С. Более быстрое повышение температуры на оси факела при меньших n объясняется тем, что объем смеси, проходящей через выделенный контур, будет меньшим, поэтому его нагрев, исходя из теплового баланса факела, будет обеспечиваться до более высокой температуры. При $L > (35 \div 40) d_0$ и увеличении n скорость нагрева смеси на оси факела увеличивается. Это связано с тем, что чем больше состав смеси приближается к стехиометрическому, тем выше температура наружной горячей оболочки и тем меньше потребность в доставке необходимого количества кислорода на ось потока для развития устойчивого процесса горения. Оба этих фактора способствуют бурному развитию горения, ускоряя его.

Процессы горения для смеси, близкой к стехиометрическому составу, завершаются на более коротком участке факела. Кривые изменения температуры по длине факела при $n = 0,8$ и 1 близки между собой и подъем температур на оси потока у них почти одинаков. Это свидетельствует о том, что смесь близка к стехиометрической, поэтому горение происходит на коротком участке факела $\sim 10d_0$. Кривые для $n = 0,4 \div 0,6$ также близки между собой, но процесс начала горения ($T \approx 600 \div 800$ °С) растягивается на значительное расстояние до 60—80 калибров. Недостаток кислорода в этом случае тормозит процесс в целом, который развивается вяло. В общем случае, как следует из анализа полученных данных, с увеличением n при $V_r = \text{const}$ максимум температур смещается в сторону меньших L/d_0 . С уменьшением n максимальная температу-

ра на оси факела падает, что может быть объяснено тем, что процесс горения в этом случае растянут во времени, вследствие чего выделяется меньшее количество тепла и возрастают потери его в окружающую среду.

Анализируя данные для случая $d_0 = 4$ мм, $V_r = 8,35 \cdot 10^{-5}$ м³/с = const, видим, что температура на оси ЖЛФ до расстояния $(45 \div 50)d_0$ повышалась очень медленно для всех n . Сохранение практически постоянной температуры на большом расстоянии по сравнению со случаем $d_0 = 2$ мм связано с увеличением диаметра факела. В этой ситуации для прогрева смеси до одинаковой температуры требуется больше времени. Более быстрый рост T_0 при $n = 0,2$ объясняется тем, что скорость смеси меньше и прогрев ее идет быстрее. Здесь при $n = 0,2 \div 0,6$ начало бурного горения происходит на длине $\sim (90 \div 105)d_0$, а при $n = 0,2 \div 0,4$ имеет еще более явно выраженный замедленный характер. Все это связано с диффузией окислителя на ось потока. Кривые для $n = 0,8 \div 1,0$, так же как и при $d_0 = 2$ мм, показывают почти одинаковую скорость нагрева смеси на оси потока (подъем температур). Здесь также с увеличением n при $V_r = \text{const}$ максимум температур смещается в сторону меньших L/d_0 . Обнаружено также, что для всех исследованных случаев температура на оси на расстоянии $\sim 40d_0$ повышается до 10 % от максимальной температуры факела.

Установленные закономерности изменения T_0 на оси ЖЛФ свидетельствуют о его ламинарном характере, так как для турбулентного движения характерно повышение T при $L > 6d_0$ [2]. Из анализа полученных данных следует, что безразмерное расстояние, на котором реализуется максимальное повышение температуры в ЖЛФ, на порядок больше такого же расстояния для турбулентного факела.

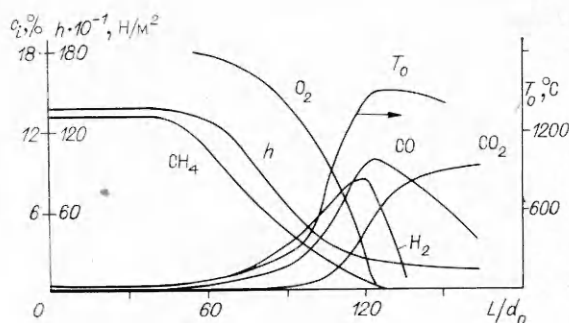
Анализ распределения температуры в поперечных сечениях на различной высоте ЖЛФ показал, что она на расстоянии 25—30 калибров в центральной части факела диаметром 2 мм сохраняется практически без изменения, в то время как температура наружной горячей оболочки составляет 1600—1680 °С. При $L > (35 \div 40)d_0$ и $n = 0,6$ смесь внутри факела прогревается медленнее, чем при $n = 1$. Распределение температур в поперечном сечении факела представляет собой параболу с тупой вершиной в нижней его части до расстояния $(40 \div 45)d_0$, а при $L > (40 \div 45)d_0$ она постепенно переходит в параболу с острой вершиной. Перепад температур между поверхностью и осью факела до $(30 \div 35)d_0$ максимальный и сохраняется практически на одинаковом уровне, после чего он уменьшается.

Температура на оси ЖЛФ газокислородной смеси ориентировочно определена для $d_0 = 2$ мм, $n = 0,6$ и скорости истечения смеси из сопла 85 м/с. Опыты показали, что на высоте 500 мм от конца сопла $T = 1720 \div 1750$ °С, при приближении к соплу она повышалась до 2000 °С и более.

Состав газа на оси ЖЛФ

Анализ состава газа на оси факела выполнен для сопла $d_0 = 4$ мм при $V_r = 8,35 \cdot 10^{-5}$ м³/с и $n = 0,4; 0,6$ и $1,0$. Пробы газа на анализ брались при помощи водоохлаждаемой трубки путем просасывания исследуемого газа инжектором через газоанализатор. Анализ газа выполнялся на аппаратах ОРСа, ВТИ и хроматографе. Результаты исследований представлены на рис. 4, где для анализа и сопоставления опытных данных нанесены также значения динамических давлений и температур на оси факела для тех же условий, при которых проводился отбор газа. Как видно из рис. 4, состав смеси газов при $L = (50 \div 55)d_0$ практически оставался без изменения. Максимум подъема температуры на оси соответствует максимальному количеству СО. После перехода через максимум температура падает, что связано с догоранием СО на оси факела. Изменение состава газа при $n = 1$ качественно аналогично показанному на рис. 4, при этом кривые смещены в сторону меньших

Рис. 4. Зависимость содержания компонентов динамического давления и температуры на оси ЖЛФ от безразмерного расстояния; $d_0 = 4$ мм, $V_r = 8,35 \cdot 10^{-5}$ м³/с, $n = 0,6$.



L/d_0 . Это объясняется наличием достаточного количества кислорода внутри факела. В этом случае падение CH_4 начинается с расстояния $(35 \div 40)d_0$, а образование H_2 — с $(30 \div 35)d_0$, причем эти процессы проходят более интенсивно, чем при $n = 0,6$.

Анализ экспериментальных данных для $d_0 = 4$ мм, $V_r = 8,35 \cdot 10^{-5}$ м³/с показывает, что на расстоянии до $100d_0$ и $n = 0,4 \div 0,6$ и до $50d_0$ при $n = 1$ на оси ЖЛФ горения нет, а имеется лишь низкотемпературное окисление без воспламенения. Низкотемпературное окисление CH_4 можно объяснить диффузией активных центров и радикалов и особенно формальдегидов НСНО от поверхности на ось потока. В этот период идет практически только рост количества H_2 и CO , и он продолжается до полного исчезновения CH_4 . Это согласуется с установленным фактом, что присутствие углеводородов в смеси тормозит выгорание H_2 и CO и в этом интервале идет их накопление. При $L > (100 \div 105)d_0$ для $n = 0,4 \div 0,6$ и $L > (50 \div 55)d_0$ для $n = 1$ происходит воспламенение смеси и на оси развивается самоускоряющийся процесс горения, сначала медленный, а потом интенсивный, с большим ускорением. Об этом свидетельствует быстрое образование CO_2 , резкое уменьшение концентрации O_2 и интенсивный подъем температур. С развитием бурного процесса горения связано и то обстоятельство, что при $n \sim 1$ и $\text{Re} > 15\,000$ вершина газоздушного факела при $d_0 = 4$ мм иногда начинала колебаться (пульсировать). Такое состояние вершины наблюдается обычно в сочетании с внешними возмущениями.

Из рис. 4 следует, что до тех пор, пока в смеси имеется O_2 , содержание CO_2 нарастает, при полном исчезновении O_2 образование CO_2 резко тормозится, так как доставка кислорода посредством молекулярной диффузии из внешней среды на ось факела при $n < 1$ через горящую оболочку затруднительна. Из сопоставления кривых температур, динамического давления и состава газа видно, что с моментом развития процесса горения на оси ЖЛФ совпадает начало падения динамического давления и медленного подъема температур, после чего прохождение этих процессов интенсифицируется бурным развитием реакции горения, и в конце зоны догорания они затухают. Анализ состава газа показывает, что при сжигании газоздушных смесей в областях низких температур сначала идут преимущественно реакции образования H_2 и CO , потом образуется CO_2 , что качественно согласуется с работами других авторов. Скорость образования H_2 больше, чем CO , причем процесс догорания H_2 осуществляется на участке в 3—4 раза более коротком, чем CO . Из представленных данных видно, что процессы реагирования отдельных компонентов газовой смеси на оси ЖЛФ растянуты по времени, что является важным при изучении кинетики процессов горения.

Установленные закономерности изменения динамического давления, температуры и состава газа на оси ЖЛФ, геометрические характеристики и отдельные воздействия на него возмущающих факторов убедительно показывают, что развитие и условия существования, аэродинамика и геометрические параметры такого факела принципиально отличаются от аналогичных характеристик обычного вертикального ламинарного фа-

кела. Такой факел проявляет совершенно новые свойства, которые ранее не были известны: постоянство динамических и тепловых характеристик на большом безразмерном расстоянии и четкие внешние контуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гейдон А. Г., Вольфгард Х. Г. Пламя, его структура, излучение и температура.— М.: Металлургиздат, 1959.
2. Вулис Л. А. Термодинамика газовых потоков.— М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950.

г. Днепропетровск

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

УДК 532.517.4

М. А. Гороховский, И. Г. Шпильберг

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ФАКЕЛОВ

Численно исследуются нестационарные двухфазные турбулентные диффузионные факела в замкнутых камерах постоянного объема при высоком давлении и температуре. Проводится анализ влияния времени инъекции топлива на скорость его горения. Показано, что форсированная подача способствует более полному выгоранию топлива.

В замкнутую цилиндрически симметричную камеру сгорания, заполненную воздухом при температуре $T = 1200$ К и давлении $p = 106$ атм, впрыскивается струя жидкого топлива. Вблизи инжектора струя распыляется и образующаяся воздушно-капельная смесь распространяется в глубь камеры сгорания. Капли испаряются и пары топлива диффундируют в окружающий воздух. Высокая температура в камере сгорания приводит к воспламенению паров топлива. Пламя распространяется по периферии струи и быстро охватывает весь впрыск. Процесс распространяется в пространстве и во времени. В работе проводится расчетное исследование описанной физической постановки задачи.

Ниже записаны основные дифференциальные уравнения и алгебраические соотношения [1], описывающие распространение и горение струи испаряющегося жидкого топлива в воздухе, а также модификации [1], связанные с моделированием турбулентности и турбулентного горения. Подобные задачи в приближении пограничного слоя рассмотрены, например, в [2]. Газовая фаза представляет собой многокомпонентную сжимаемую вязкую теплопроводную смесь. Уравнение разрывности в цилиндрической системе координат для k -го компонента газовой смеси имеет вид

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \frac{1}{R} \vec{\nabla} \cdot (R \rho_k \vec{U}) = \frac{1}{R} \vec{\nabla} \cdot [R \rho D \vec{\nabla} (\rho_k / \rho)] + \dot{\rho}_k^c + \dot{\rho}_s \delta_{k1}$$

Здесь R — радиальная координата; $\vec{\nabla}$ — оператор дифференцирования; ρ — плотность газа; ρ_k — концентрация компонентов смеси; D — коэффициент диффузии; \vec{U} — вектор скорости; $\dot{\rho}_k^c$ — источник массы за счет химических реакций; $\dot{\rho}_s$ — источник за счет испарения жидких капель; δ_{k1} — дельта Кронекера. В векторном виде уравнение баланса импульсов для газовой фазы имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{U}) + \frac{1}{R} \vec{\nabla} \cdot (R \rho \vec{U} \vec{U}) = - \vec{\nabla} p + \frac{1}{R} \vec{\nabla} \cdot (R \vec{\sigma}) - \frac{\sigma_s}{R} \vec{\nabla} R + \vec{F},$$

где p — давление; σ и σ_0 — двумерный тензор и цилиндрические компоненты вязких напряжений соответственно. Вязкие напряжения опреде-