

УДК 536.46

ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОЩАДИ ДИФфуЗИОННОГО ПЛАМЕНИ НАД ДВИЖУЩЕЙСЯ БУНЗЕНОВСКОЙ ГОРЕЛКОЙ В РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДИАПАЗОНАХ

Б. Лоу, Е Ван, С.-Ф. Лун, Ф. Тянь

Южно-Китайский технологический университет, 510641 Гуанчжоу, Китай, epwangye@mail.scut.edu.cn

Исследовалось линейно движущееся диффузионное пламя над бунзеновской горелкой. С помощью высокоскоростной камеры получены последовательные во времени изображения пламени, движущегося с ускорением 3.6 м/с^2 , которые использовались для изучения изменения площади пламени и относительной площади в различных диапазонах температуры. Получено, что в диапазоне экспериментально реализованных скоростей ($< 0.90 \text{ м/с}$) общая площадь пламени в зоне, контролируемой потоком топлива, увеличивается с ростом скорости движения, быстро уменьшается в переходной области и неизменна в зоне, контролируемой потоком поперечного обдува. Низкотемпературная часть площади пламени доминирует в низкоскоростной зоне, контролируемой потоком топлива. В высокоскоростной зоне, контролируемой потоком поперечного обдува, доминирует площадь высокотемпературной части пламени. Переход между этими двумя режимами осуществляется в переходной области. Поперечный воздушный поток увеличивает высокотемпературную площадь по сравнению со стационарным пламенем. Процесс горения в движущемся пламени также становится более интенсивным.

Ключевые слова: движущееся диффузионное пламя, скорость поперечного потока, площадь пламени, температурная область двумерного температурного поля.

DOI 10.15372/FGV20170504

ВВЕДЕНИЕ

В связи с недавними достижениями в компьютерной и оптической технологии, видеокамеры, оснащенные ПЗС-матрицами, и соответствующая техника обработки изображений могут использоваться для измерения параметров площади пламени. Благодаря этому в последние годы проведены обширные и тщательные исследования пламен [1–4] и получены важные достижения в области изучения температурных полей и характеристик площади пламени.

В работе [5] с использованием калиброванной двухцветной методики измерения температуры исследовались температурные поля этиленового пламени, разбавленного гелием, аргоном, азотом, диоксидом углерода и кислородом. Наименьшая температура наблюдалась в пламени, разбавленном диоксидом углерода. Эксперименты [6] по изучению распределений температуры и характеристик передачи тепла в инвертированном диффузионном пламени по-

казали, что температура постепенно понижается в направлении от центра пламени к его краю, соответственно в области более интенсивных химических реакций температура выше. В работе [7] при исследовании пламен разных топлив (метан, пропан, этилен и пропилен) установлено, что площадь пламени пропорциональна скорости выделения тепла, т. е. чем интенсивнее горение, тем больше площадь пламени. В работах [8, 9] показано, что температурное поле и площадь пламени являются важными характеристиками горения. Изменение температурных полей напрямую влияет на этот процесс. Площадь пламени характеризует геометрические свойства пламени и отражает интенсивность горения и его стабильность. Совокупные данные о температурных полях и площадях пламени имеют большое значение для диагностики горения, управления его процессами и исследования механизмов горения. Исследований изменения температуры и площади пламени проведено достаточно много, но ранее результаты редко обобщались. Кроме того, исследования в основном касались стационарных пламен. Вместе с тем площадь и температура движущегося пламени совершенно отличаются

© Lou Bo¹, Wang Ye¹, Long Xinfeng², Tian Fang¹, 2017.

¹School of Electric Power, South China University of Technology, 510641 Guangzhou, China. ²School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, 510640 Guangzhou, China.

ся от характеристик стационарного пламени. При движении пламени топливо более интенсивно смешивается с воздухом. Как результат, температура в центре пламени увеличивается. Однако при этом усиливаются диффузионные процессы и радиационная передача тепла из пламени, что приводит к уменьшению площади пламени.

В данной работе мы использовали движущуюся экспериментальную установку и высокоскоростную камеру для получения изображений движущегося диффузионного пламени. Проведено исследование изменения площади пламени в разных температурных диапазонах, установлены закономерности в каждом диапазоне.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для изучения движущегося с линейным ускорением диффузионного пламени. В бунзеновскую горелку подавался сжиженный углеводородный газ, основные составляющие которого пропан и бутан, теплота его сгорания $11\,264\text{ кДж/м}^3$. Высокоскоростная камера (SR series Kodak Motion Corder Analyzer) закреплялась на тележке, которая приводилась в движение нерастяжимым шнуром, пропущенным через систему блоков с грузом. Груз обеспечивал движение с постоянным линейным ускорением.

Во время съемки бунзеновская горелка и камера двигались синхронно, чтобы исключить ошибки, которые могут быть вызваны изменением расстояния между камерой и объектом съемки. Системные параметры высокоскоростной камеры и компьютера подбирались оптимальными для проведения экспериментов.

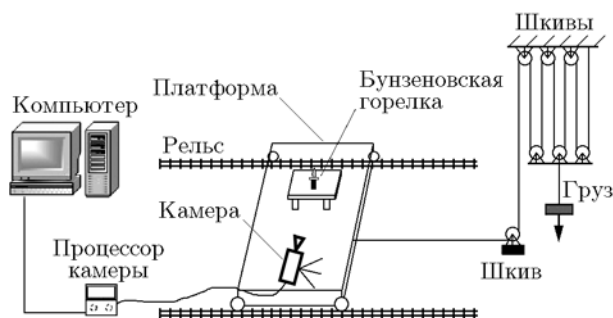


Рис. 1. Установка с горелкой, движущейся с постоянным линейным ускорением

Расстояние между камерой и пламенем было фиксированным, чтобы получать отчетливые изображения в процессе движения. Ускорение движения пламени рассчитывалось по измерениям пройденной дистанции и времени (время движения можно получить из последовательности кадров). Отсюда вычислялась скорость для каждого полученного изображения. Частота кадров равна 500 с^{-1} . Значения ускорения в проведенных экспериментах составляли 2.5, 3.6, 5.4 и 6.5 м/с^2 .

Серия изображений диффузионного пламени, движущегося прямолинейно со скоростью $0.036 \div 0.900\text{ м/с}$, с постоянным ускорением 3.6 м/с^2 , с шагом по времени 0.02 с , представлена на рис. 2. Эти изображения являются исходными данными для измерения температурных полей с использованием цифровой технологии обработки изображений.

2. ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

2.1. Площадь пламени

Реальное диффузионное пламя имеет трехмерную форму, независимо от того, движется оно или нет. Однако снимок, полученный с помощью высокоскоростной камеры, является плоским (двумерным) изображением настоящего пламени. Следовательно, мы определяли проекцию формы пламени на плоскость, перпендикулярную оптической оси объектива высокоскоростной камеры.

После подготовки, фильтрации, устранения шума каждое изображение сегментировалось. Определялась зона пламени, и проводилась бинарная (черно-белая) обработка изображения. Чтобы получить площадь пламени A_s , подсчитывалось число точек с яркостью 1 на изображении пламени. Расчет выполнялся по формуле [10]

$$A_s = \sum_{(x,y) \in S_1} f(x,y), \quad (1)$$

где S_1 — область, в которой проводится измерение, $f(x,y)$ — яркость точки.

2.2. Двумерное температурное поле

Значения трехцветной яркости сигнала изображения можно использовать для восстановления температуры плоского поля пламени.

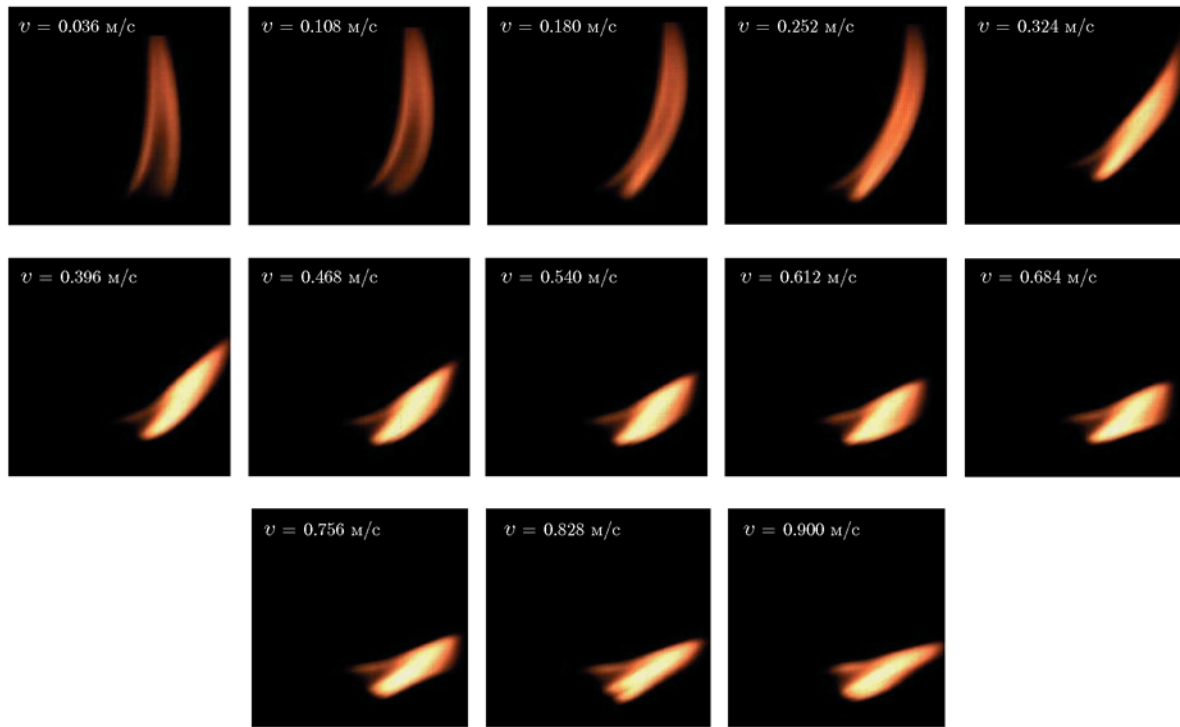


Рис. 2. Изображения движущегося пламени (ускорение 3.60 м/с^2 , скорость $0.036 \div 0.900 \text{ м/с}$, шаг по времени 0.02 с)

Используя сигналы красного, зеленого и синего компонентов в каждой точке (i, j) изображения и соотнося их с температурой, измеренной в этой точке, можно найти соответствующую зависимость между величиной сигнала и температурой $T_{(i,j)}$. Таким образом, технология спектральнозональной съемки позволяет получить двумерные поля температуры движущегося диффузионного пламени. Этот вопрос детально был изучен в работах [11, 12]. Температура определялась по формуле вида [13]

$$T = \frac{c_2(2/\lambda_G - 1/\lambda_R - 1/\lambda_B)}{\ln \frac{L_{\lambda_R}(T)L_{\lambda_B}(T)}{L_{\lambda_G}^2(T)} + \ln K + \ln \left(\frac{\lambda_R \lambda_B}{\lambda_G^2} \right)^5}, \quad (2)$$

где $c_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$; $\lambda_R = 700 \text{ нм}$, $\lambda_G = 546.1 \text{ нм}$, $\lambda_B = 425.8 \text{ нм}$ — длина волны соответственно красного, зеленого и синего цвета; L_{λ_R} , L_{λ_G} , L_{λ_B} — интенсивность красного, зеленого и синего цвета в полученных изображениях. Значение K вычислялось по результатам предварительной калибровки [14].

Используя длины волн в различных комбинациях, по выражению (2) можно рассчитать

температуру на красной, зеленой и синей длинах волн — T_{GB/R^2} , T_{BR/G^2} и T_{RG/B^2} . Предложенный нами способ трехцветной коррекции позволил модифицировать трехцветный термометрический метод расчета температуры. Выражение для температуры в этом случае принимает вид

$$T = \frac{\mu_1 T_1^2 + \mu_2 T_2^2 + \mu_3 T_3^2}{3(\mu_1 T_1 + \mu_2 T_2 + \mu_3 T_3)}, \quad (3)$$

где $T_1 = T_{GB/R^2}$, $T_2 = T_{BR/G^2}$, $T_3 = T_{RG/B^2}$, $\mu_1 = 2/\lambda_R - 1/\lambda_G - 1/\lambda_B$, $\mu_2 = 2/\lambda_G - 1/\lambda_B - 1/\lambda_R$, $\mu_3 = 2/\lambda_B - 1/\lambda_R - 1/\lambda_G$. Подробности получения формулы (3) изложены в работе [14]. Расчет по этому выражению дает более точное значение температуры пламени.

Для проверки модифицированного выражения (3) мы измерили температуру в статическом ламинарном пламени [14] и сравнили экспериментальные данные с результатами расчета по модифицированной формуле. Максимальная ошибка в этих расчетах равнялась 45.5 %. Таким образом, максимальная относительная ошибка при использовании трехцветного термометрического метода составляла 3.6 %, что

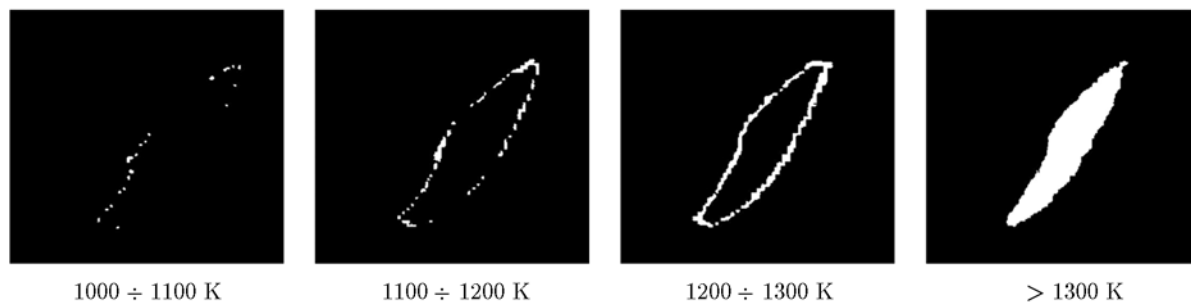


Рис. 3. Двумерные температурные поля пламени, движущегося со скоростью 0.396 м/с, в различных температурных диапазонах

свидетельствует о достаточной достоверности расчетов.

Термин «температурное поле» в этой работе относится к двумерной проекции реального пламени с совокупностью его характеристик в вертикальном направлении. Хотя это не представляет непосредственно температуру, но может отражать интенсивность химической реакции в пламени [15, 16].

2.3. Площадь пламени в определенном температурном диапазоне

В двумерном температурном поле каждая цветовая светимость соответствует своему значению температуры. Устанавливался определенный интервал температуры (например, 900 ÷ 1000 К), и подсчитывалось количество точек в нем, по которому определялась площадь пламени. Для расчетов использовалось следующее выражение:

$$S_i = \sum_{(x,y) \in I} f(x,y), \quad (4)$$

где I — диапазон температуры, необходимый для измерения, $f(x,y)$ — значение пикселя.

Рассматривая изображения движущегося пламени при скорости 0.396 м/с (см. рис. 2), мы определили двумерные поля температуры в четырех ее диапазонах: 1000 ÷ 1100 К, 1100 ÷ 1200 К, 1200 ÷ 1300 К, >1300 К. Результаты показаны на рис. 3. Расчет вышеописанным методом площади пламени в каждом из этих температурных диапазонов дал значения 416, 545, 621 и 992 соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

3.1. Зависимость общей площади диффузионного пламени от скорости его распространения

Размер общей площади определяли методом, описанным в § 2.1, используя последовательность изображений пламени. На рис. 4 показана зависимость общей площади пламени от скорости его движения при различных ускорениях. Видно, что при увеличении скорости пламени его общая площадь изменяется сходным образом при различных ускорениях. Причем две зависимости демонстрируют примерно одинаковые флуктуации по мере роста скорости пламени. В качестве примера мы проанализировали данные, полученные при ускорении $a = 3.6 \text{ м/с}^2$. Анализ показал, что пло-

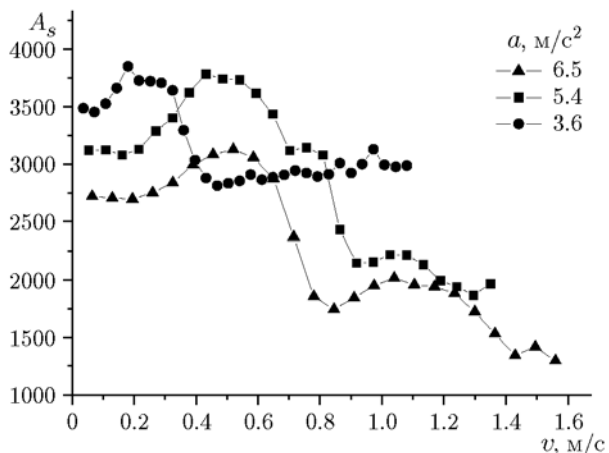


Рис. 4. Зависимость общей площади пламени от скорости его распространения при различных ускорениях

щадь возрастает в начальной стадии и достигает максимума при скорости $v = 0.180$ м/с. По-видимому, причина этого в том, что при движении происходит возмущение потоков в пламени и окружающих потоков воздуха, в результате их смешение становится более интенсивным, что приводит к интенсификации горения. Таким образом, внутренняя температура пламени повышается, объем, занимаемый пламенем, растет и общая площадь увеличивается. При дальнейшем росте скорости ($0.180 < v < 0.432$ м/с) площадь пламени значительно уменьшается. На этой стадии пламя движется достаточно быстро относительно окружающего потока воздуха, что увеличивает потери тепла на краю пламени, сокращает объем пламени и уменьшает его площадь. На следующей стадии, при $v > 0.432$ м/с, площадь пламени изменяется незначительно и в целом остается стабильной. Получить изображения пламени при более высоких скоростях нам не удалось из-за ограниченных размеров экспериментальной установки. Однако можно предположить, что при увеличении скорости движения пламя в конечном счете погаснет, т. е. его площадь станет равной нулю.

В то же время площадь пламени различна при разных ускорениях (см. рис. 4). На начальном участке движения до скорости 0.36 м/с площадь пламени меньше при большем ускорении. При этом воздушный поток сильнее влияет на пламя при той же скорости его распространения. При средних скоростях и наименьшем ускорении $a = 3.6$ м/с² требуется больше времени, чтобы пламя достигло определенной скорости, в этот момент площадь пламени начинает уменьшаться, но при двух других значениях ускорения этого еще не наблюдается. При дальнейшем увеличении скорости с ускорениями $a = 5.4$ и 6.5 м/с² площадь пламени также значительно уменьшается, причем сохраняется та же закономерность: при более высоком ускорении площадь пламени меньше.

3.2. Отношение потоков импульсов

Под действием поперечного потока воздуха скорость диффузионного пламени и температура значительно связаны с отношением импульсов топлива и поперечного потока воздуха [17–19] (предыдущие исследования однозначно подтверждают эту точку зрения). Отношение импульсов потоков определяется выражением

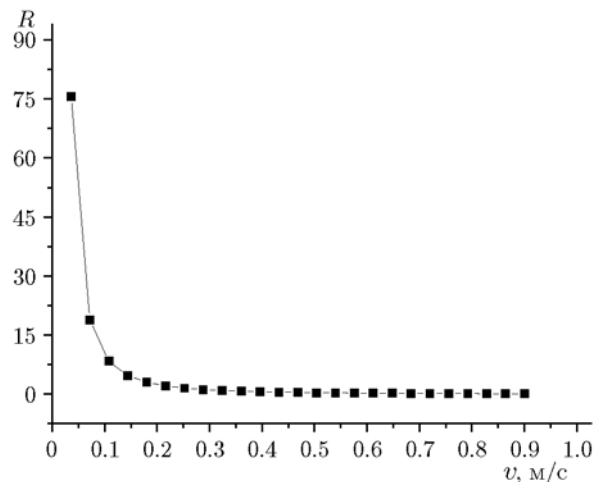


Рис. 5. Зависимость отношения импульсов потоков от скорости пламени

$$R = \rho_j u_j^2 / \rho_w u_w^2, \quad (5)$$

где ρ_j , u_j — плотность топлива и скорость его горения, ρ_w , u_w — плотность поперечного потока воздуха и его скорость. В случае движущегося диффузионного пламени скорость подачи топлива была постоянной $u_j = 0.2724$ м/с, скорость распространения пламени полагалась равной скорости поперечного обдува. Отношение импульсов потоков R движущегося пламени рассчитывалось в диапазоне скоростей $v = 0.036 \div 0.900$ м/с при ускорении $a = 3.6$ м/с². Зависимость $R(v)$ показана на рис. 5.

Как видно из рис. 5, отношение импульсов в диапазоне малых значений v с увеличением скорости сначала быстро уменьшается, а затем снижается медленно. В [20] с использованием параметра R описаны пламена, подвергающиеся поперечному обдуву. По форме движущегося пламени (см. рис. 2) авторы выделили три категории. При $R > 3$ ($0 < v < 0.180$ м/с) доминирующую роль играет импульс топлива — это зона, контролируемая потоком топлива. При $0.5 < R < 3$ ($0.180 < v < 0.432$ м/с) наблюдается переходная зона. При $R < 0.5$ ($0.432 < v < 0.900$ м/с) больший эффект на пламя оказывает поперечный обдув — это зона, контролируемая потоком обдува. Согласно данным рис. 4, при $a = 3.6$ м/с² общая площадь пламени в зоне, контролируемой потоком топлива, увеличивается, в переходной зоне — уменьшается и в зоне, контролируемой потоком обдува, изменяется слабо, остается достаточно стабильной.

3.3. Высокотемпературная относительная площадь пламени

Определим относительную площадь пламени в определенных его зонах как отношение площади части пламени S_i в заданном диапазоне температуры к общей площади пламени A_s :

$$\eta = S_i/A_s. \quad (6)$$

Высокотемпературная зона пламени наиболее важна для горения, она отражает интенсивность и стабильность процесса. В этой работе диапазон $T > 1200$ К мы определили как высокотемпературный.

Относительную высокотемпературную площадь η_{ht} получали из последовательности изображений, представленных на рис. 2, используя метод, приведенный в § 2.3. Динамику изменения общей площади пламени в зависимости от скорости иллюстрирует рис. 6. Видно, что при небольшой скорости движения горение происходит в зоне, контролируемой потоком топлива. Общая площадь пламени большая, а относительная высокотемпературная площадь мала, совокупная температура пламени низкая. При достижении скорости $v = 0.216$ м/с горение находится в переходной зоне. Относительная высокотемпературная площадь быстро увеличивается, а общая площадь пламени при этом уменьшается. Высокотемпературная зона локализована большей частью в центральной части пламени. При

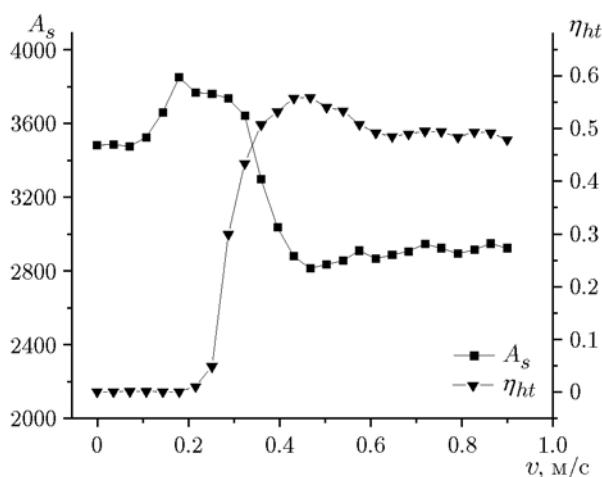


Рис. 6. Зависимость общей площади пламени и относительной высокотемпературной площади от скорости пламени

$v = 0.432$ м/с горение переходит в зону, контролируемую потоком обдува. Относительная высокотемпературная площадь незначительно уменьшается и стремится к постоянному значению. Аналогично, общая площадь пламени также стремится к постоянному значению.

В диапазоне малых скоростей ($0 < v < 0.180$ м/с) пламя находится в зоне, контролируемой потоком топлива, влияние поперечного потока воздуха мало. Смешивание воздуха и топлива незначительно усиливает горение. Площадь пламени увеличивается, но максимальная температура не превышает 1200 К, и, соответственно, относительная высокотемпературная площадь равна нулю. При росте скорости в диапазоне $0.180 \leq v \leq 0.432$ м/с пламя находится в переходной зоне. Импульс истечения топлива соответствует воздействию поперечного обдува, и поток воздуха усиливает вынужденное излучение тепла из пламени. Внешняя низкотемпературная граница пламени «сдувается» потоком воздуха. Как результат, общая площадь пламени увеличивается и пламя отклоняется от вертикального направления. Однако область взаимодействия с поперечным обдувом становится больше и горение усиливается. Таким образом, в пламени появляется высокотемпературная область и ее размер быстро увеличивается. Далее при повышении скорости в диапазоне $0.432 < v < 0.900$ м/с пламя находится в зоне, контролируемой обдувом. Импульс потока топлива недостаточен, чтобы компенсировать действие поперечного обдува. Пламя отклоняется на большой угол, но его наветренная сторона подвержена влиянию обдува. Поэтому относительная высокотемпературная площадь уменьшается медленно. Когда угол отклонения пламени приближается к максимальному, относительная высокотемпературная площадь стремится к постоянному значению.

3.4. Изменение площади пламени в различных температурных диапазонах

Температуру пламени, изображения которого представлены на рис. 2, можно разделить на шесть диапазонов: $A = 800 \div 900$ К, $B = 900 \div 1000$ К, $C = 1000 \div 1100$ К, $D = 1100 \div 1200$ К, $E = 1200 \div 1300$ К, $F > 1300$ К. Площади, соответствующие этим диапазонам, можно рассчитать как функцию скорости движения пламени. Результаты показаны на рис. 7.

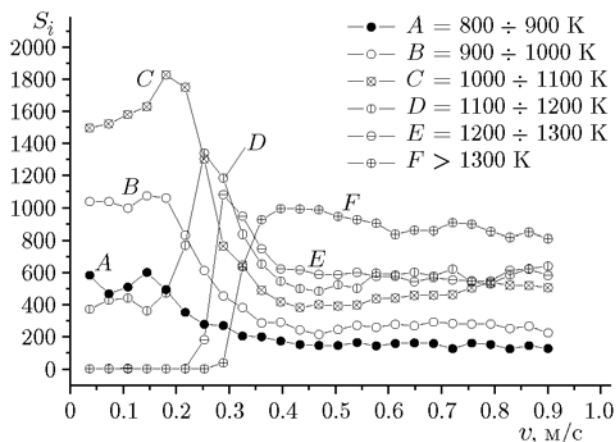


Рис. 7. Зависимость площади пламени в различных температурных диапазонах от скорости пламени

Соответственно данным рис. 7, в низкоскоростной зоне, контролируемой потоком топлива, температура пламени в основном находится в диапазонах $900 \div 1000$ и $1000 \div 1100$ К (*B* и *C*). При $v = 0.180$ м/с площадь, соответствующая линии *C*, достигает максимального значения. Сравнивая с данными рис. 5, можно заметить, что в это время общая площадь пламени также достигает максимума и диапазон *C* занимает основную позицию. Как только скорость возрастает, горение вступает в переходную зону. Площадь пламени в диапазоне ниже 1100 К начинает уменьшаться (линии *A*, *B*, *C*), а в диапазоне $1100 \div 1200$ К — увеличиваться до своего максимума при $v = 0.252$ м/с. В пределах $v = 0.252 \div 0.432$ м/с площадь пламени в температурных диапазонах $1200 \div 1300$ и $1300 \div 1400$ К увеличивается (линии *E* и *F*). Переходная зона наблюдается при $v = 0.180 \div 0.432$ м/с. Площадь пламени в различных температурных диапазонах изменяется значительно. При дальнейшем повышении скорости горение переходит в зону, контролируемую поперечным потоком. Площадь в каждом температурном диапазоне относительно стабильна. В диапазоне *F* (>1300 К) площадь достигает максимума, а в диапазоне *A* ($800 \div 900$ К) — минимума.

При увеличении скорости движения пламени площадь пламени в каждом температурном диапазоне сначала увеличивается, затем уменьшается и в конце стремится к постоянному значению. В низкоскоростной, контролиру-

руемой потоком топлива зоне площадь пламени низкотемпературного диапазона занимает преимущественную позицию. В высокоскоростной, контролируемой потоком поперечного обдува зоне доминирует площадь высокотемпературного диапазона пламени. Изменение между этими состояниями происходит в переходной зоне.

3.5. Соответствие между относительной площадью и температурным диапазоном при различных скоростях пламени

Для последовательности изображений пламени, показанной на рис. 2, получены двумерные температурные поля при типичных скоростях — $v = 0, 0.324, 0.360$ и 0.612 м/с. Соотношение между температурным диапазоном и относительной площадью показано на рис. 8.

Как видно из рис. 8, при неподвижном и направленном прямо вверх пламени основная его площадь (примерно 43 % общей площади) находится в диапазоне $C = 1000 \div 1100$ К. Когда начинается движение, форма пламени начинает наклоняться. С увеличением скорости наклон становится всё больше и пламя начинает укорачиваться. При $v = 0.324$ м/с площадь пламени сконцентрирована в основном в диапазонах температуры $D = 1100 \div 1200$ К и $E = 1200 \div 1300$ К. При $v = 0.360$ м/с площадь, соответствующая интервалу *E*, занимает доминирующее положение, но в граничащих интервалах $D = 1100 \div 1200$ К и $F = 1300 \div 1400$ К размеры площади также значительны. При $v = 0.612$ м/с площадь пламени в основном (29 %) сконцентрирована в диапазоне *F*, на последующие диапазоны температуры *D* и *E* приходится около 20 % площади. Как можно заметить, если пламя не движется, его площадь сосредоточена в диапазоне *C*, низшем по температуре. При увеличении скорости площадь в диапазонах *D*, *E*, *F* приобретает всё большие размеры. Другими словами, доли относительной площади растут в высокотемпературных зонах.

На неподвижное пламя оказывает действие только подъемная сила, вызываемая разностью температур. В движущемся пламени на горение значительно влияет поперечный обдув, появляющийся между движущимся пламенем и окружающим воздухом. Как результат, воздух может проникать в области с более высокой концентрацией топлива. Это усиливает химическую реакцию и повышает температуру. При увеличении скорости поперечного обдува относительные площади пламени в различных

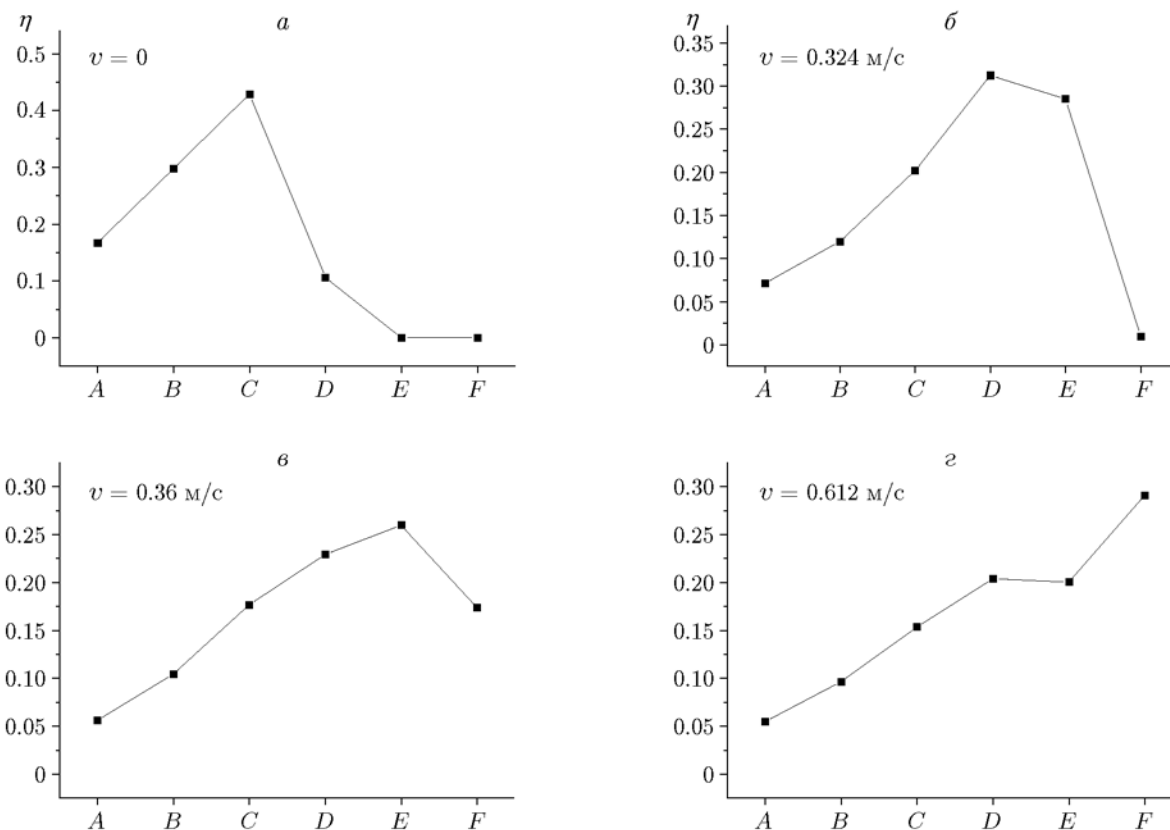


Рис. 8. Относительная площадь пламени в температурных диапазонах A, B, C, D, E, F

температурных диапазонах имеют разный размер (см. рис. 7). В зоне, контролируемой потоком топлива, доминирует низкотемпературная относительная площадь, а в зоне, контролируемой потоком воздуха, — высокотемпературная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При ускорении 3.6 м/с^2 в диапазоне скоростей $v < 0.900 \text{ м/с}$ общая площадь пламени при увеличении его скорости растет в зоне, контролируемой потоком топлива ($R > 3$), быстро уменьшается в переходной зоне ($0.5 < R < 3$) и слабо изменяется и стремится к постоянному значению в зоне, контролируемой обдувом ($R < 0.5$).

2. При увеличении скорости распространения пламени площадь его низкотемпературной зоны (и соответствующая относительная площадь) доминирует в контролируемой потоком топлива низкоскоростной зоне. В высокоскоростной зоне, контролируемой потоком воздуха, превалирует площадь высокотемпературной зоны (и соответствующая относительная площадь). Между этими двумя режимами

находится переходная зона.

3. По сравнению с неподвижным пламенем, процесс горения в движущемся пламени более сложный и интенсивный вследствие влияния поперечного потока.

Работа выполнена при частичной поддержке фондов: the Natural Science Foundation of Guangdong Province (N S2013010016748), Guangdong Province Key Laboratory of Efficient and Clean Energy Utilization (2013A061401005), the Scientific Research Plan Project of Guangdong Province (N 2014A020216005) in China.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mahmoud S. M. et al. Simultaneous planar measurements of temperature and soot volume fraction in a turbulent non-premixed jet flame // Proc. Combust. Inst. — 2015. — V. 35, N 2. — P. 1931–1938.
2. Aalburg C., Dies F. J., Faeth G. M., et al. Shapes of nonbuoyant round hydrocarbon-fueled laminar-jet diffusion flames in still air // Combust. Flame. — 2005. — V. 142, N 1-2. — P. 1–16.
3. Yan Y., Lu G., Colechin M. Monitoring and characterisation of pulverised coal-ames using dig-

- ital imaging techniques // *Fuel*. — 2002. — V. 81, N 5. — P. 647–656.
4. **Liu F., Wen J. X.** The effect of turbulence modelling on the CFD simulation of buoyant diffusion flames // *Fire Saf. J.* — 2002. — V. 37, N 2. — P. 125–150.
 5. **Yelverton B. T. L., Roberts W. L.** Soot surface temperature measurements in pure and diluted flames at atmospheric and elevated pressures // *Exp. Therm. Fluid Sci.* — 2008. — V. 33, N 1. — P. 17–22.
 6. **Sze L. K., Cheung C. S., Leung C. W.** Temperature distribution and heat transfer characteristics of an inverse diffusion flame with circumferentially arranged fuel ports // *Intern. J. Heat and Mass Transf.* — 2004. — V. 47, N 14–16. — P. 3119–3129.
 7. **Linteris G. T., Rafferty I. P.** Flame size, heat release, and smoke points in materials flammability // *Fire Saf. J.* — 2008. — V. 43, N 6. — P. 442–450.
 8. **Hu L., Zhang X., Wang Q., Palacios A.** Flame size and volumetric heat release rate of turbulent buoyant jet diffusion flames in normal- and a sub-atmospheric pressure // *Fuel*. — 2015. — V. 150. — P. 278–287.
 9. **Roper F. G.** Prediction of laminar jet diffusion flame sizes. 1. Theoretical model // *Combust. Flame*. — 1977. — V. 29. — P. 219–226.
 10. **Lou B., Xu Y., Lin Zh. G.** Image characteristic analysis of moving fire diffusion flame in circular motion // *J. Combust. Sci. Technol.* — 2013. — V. 19, N 1. — P. 60–66.
 11. **Zhou H. C., Sheng F., Han S. D., et al.** A fast algorithm for calculation of radiative energy distributions received by pinhole image-formation process from 2D rectangular enclosures // *Numer. Heat Transf. Pt A: Applications*. — 2000. — V. 38, N 7. — P. 757–773.
 12. **Zhou H. C., Sheng F., Han S. D., et al.** Reconstruction of temperature distribution in a 2D absorbing emitting system from radiant energy images // *JSME Intern. J. Ser. B*. — 2000. — V. 43, N 1. — P. 104–109.
 13. **Cheng X. F., Zhou Z.** Study on measurement principle of temperature by three primary colors // *Sci. China Ser. E. Technol. Sci.* — 1997. — V. 40. — P. 518.
 14. **Lou B., Qiu Y., Xu J.** Characteristics of diffusion flames with accelerated motion // *Therm. Sci.* — 2016. — V. 20, N 6. — P. 2079–2090.
 15. **Choi M. V. et al.** Simultaneous optical measurement of soot volume fraction and temperature in premixed flames // *Combust. Flame*. — 1994. — V. 99. — P. 174–196.
 16. **Collins S.** Advanced flame monitors take on combustion control // *Power*. — 1993. — V. 10. — P. 75–77.
 17. **Huang R. F., Yang M. J.** Thermal and concentration fields of burner-attached jet flames in cross flow // *Combust. Flame*. — 1996. — V. 105, N 1–2. — P. 211–224.
 18. **Johnson M. R., Kostiuk L. W.** Efficiencies of low-momentum jet diffusion flames in crosswinds // *Combust. Flame*. — 2000. — V. 123, N 1–2. — P. 189–200.
 19. **Castiñeira D., Edgar T. F.** Computational fluid dynamics for simulation of wind-tunnel experiments on flare combustion systems // *Energy Fuels*. — 2008. — V. 22, N 3. — P. 1698–1706.
 20. **Huang F., Wang M.** Characteristic flow modes of wake-stabilized jet flames in a transverse air stream // *Combust. Flame*. — 1999. — V. 117, N 1–2. — P. 59–77.

Поступила в редакцию 26/VIII 2016 г.