

УДК 536.46

ОСОБЕННОСТИ ДИФФУЗИОННОГО ФАКЕЛА ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ЛАМИНАРНОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ К ТУРБУЛЕНТНОМУ

В. С. Козулин^{1,2}, В. Л. Крайнев¹, П. К. Третьяков¹, А. В. Тупикин^{1,2}

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
tupikin@itam.nsc.ru

²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

При изучении поднятого диффузионного пламени в режиме, переходном от ламинарного к развитому турбулентному, зарегистрированы структуры во фронте горения, обладающие пониженной интенсивностью собственного свечения с ярко выраженным контуром. Возникновение таких структур в пламени носит спонтанный характер и может происходить на значительном удалении от точек поджога (области стабилизации поднятого пламени).

Ключевые слова: диффузионный факел, поднятое пламя, фронт пламени.

Диффузионный режим сжигания газообразных углеводородов наиболее распространен на практике. При изучении устойчивости поднятых пламен метана в режиме горения, переходном от ламинарного к турбулентному, были зарегистрированы структуры, свидетельствующие о наличии во фронте пламени замкнутых областей без горения (разрывов фронта или «дыр») [1]. Эти структуры возникали в области стабилизации поднятого пламени метана при наличии воздушного спутного потока. С помощью метода PIV регистрировались поля скоростей, методом PLIF получены распределения концентраций радикалов OH и CH, однако течение носило явно трехмерный характер и представленная авторами информация недостаточна для понимания этого явления. Наличие спутного потока усложняет картину течения и оказывает влияние на условия стабилизации поднятого пламени. Публикации по изучению описанных выше структур отсутствуют в отечественной литературе.

В представленной работе разрывы во фронте диффузионного пламени зарегистрированы не только при наличии спутного потока, но и при истечении различных горючих газов (метана, пропана и смеси метана с пропаном) в затопленное пространство. Такие структуры возникали как в области стабилизации пламени, так и на значительном расстоянии от нее.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований СО РАН (проект Ш.22.6.24, регистрационный номер 01201351870).

© Козулин В. С., Крайнев В. Л., Третьяков П. К., Тупикин А. В., 2014.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Диаметр сопла подачи воздуха спутного потока 20 мм, диаметр сменного сопла подачи газообразного топлива $3 \div 3.5$ мм. Струя газообразного топлива истекала в спутный поток воздуха либо в затопленное пространство со скоростью $12 \div 14$ м/с. Для регистрации формы пламени использовалась камера Imager intense CCD с динамическим диапазоном 12 бит, пространственным разрешением 1376×1040 пиксел и усилителем изображения, чувствительным к излучению в видимом и УФ диапазонах длин волн. Время экспозиции 1 мс, частота съемки 10 кадр/с.

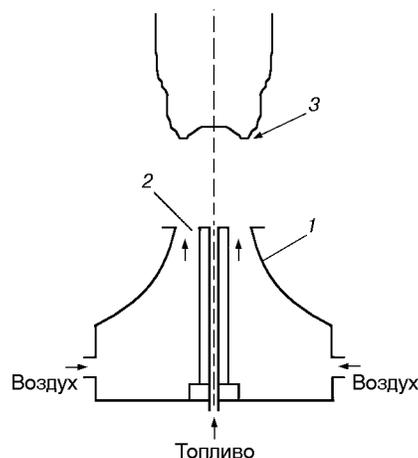


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — сопло подачи воздуха спутного потока, 2 — сменное сопло подачи газообразного топлива, 3 — область стабилизации поднятого пламени

Для регистрации структуры течения применялась теневая схема со щелью и плоским ножом, направленным вдоль потока. Время экспозиции 0.1 мс, частота съемки 60 кадр/с.

При регистрации формы диффузионного пламени в спутном потоке воздуха были получены снимки со структурами во фронте горения, обладающими пониженной интенсивностью собственного свечения и ярко выраженным контуром (разрывы во фронте пламени). Возникновение таких структур в пламени носило спонтанный характер и наблюдалось как вблизи области стабилизации, так и на значительном расстоянии от нее. Разрывы фронта горения зарегистрированы для струи метана с числом Рейнольдса $Re_{мет} \approx 2700 \div 2800$ при числе Рейнольдса спутного потока $Re_{воз} = 80 \div 250$ и для пропана с $Re_{пр} \approx 8700$ при $Re_{воз} = 200 \div 250$. Дальнейшие опыты показали, что наличие спутного потока не является необходимым условием возникновения вышеописанного явления. Согласно [2] переход от ламинарного режима горения к турбулентному происходит при числах Рейнольдса холодной струи $Re_{мет} \approx 3200 \div 3900$, $Re_{пр} \approx 9000 \div 10000$ в режиме присоединенного к горелке пламени. В опытах условия были близки к переходным по числу Рейнольдса, пламя — поднятым. В ламинарном режиме истечения для присоединенного к устью сопла пламени возникновения подобных структур не обнаружено. На рис. 2 приведен пример диффузионного факела метана

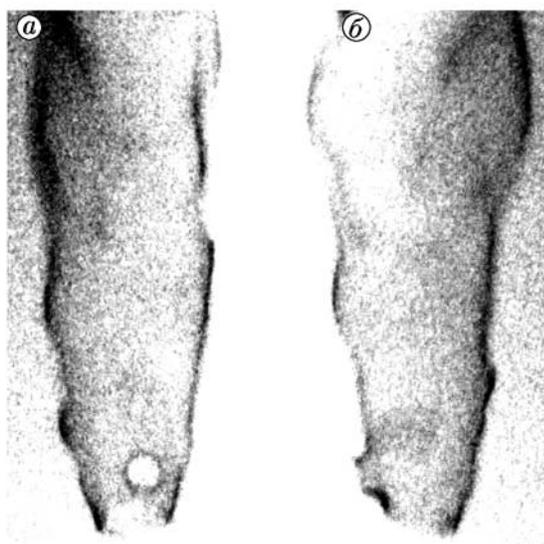


Рис. 2. Разрыв во фронте пламени (негатив):
а — анфас, б — профиль

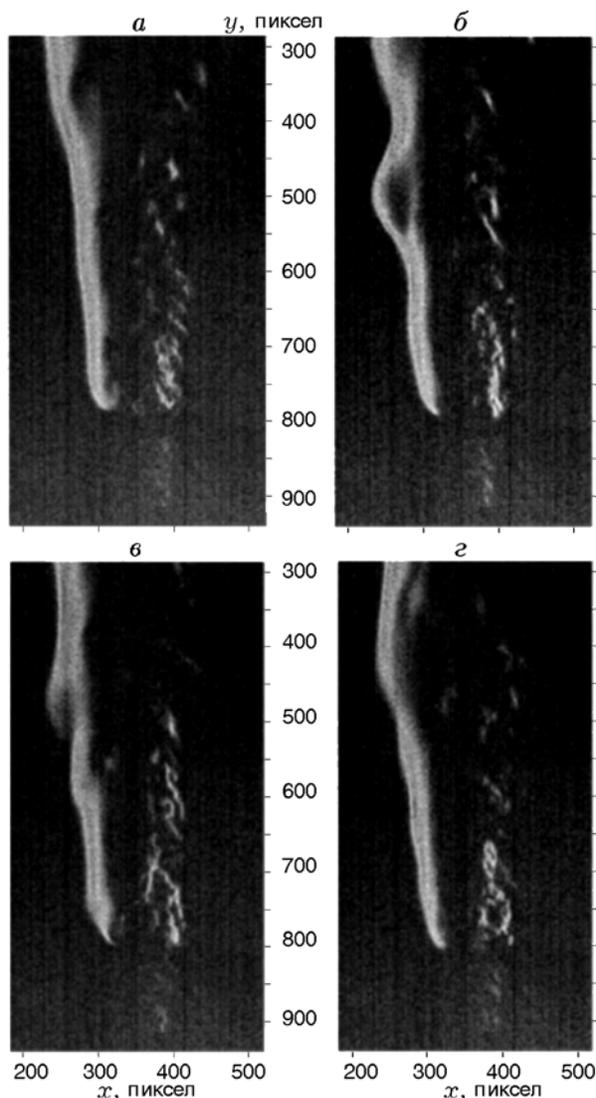


Рис. 3. Теневые снимки (последовательные кадры):

а — невозмущенный факел, б — деформация фронта горения, в — разрыв фронта, г — исчезновение

на с разрывом фронта пламени. Картина, представленная на теневых снимках (рис. 3), отражает динамику образования разрыва фронта: невозмущенный факел (а), деформация фронта горения (б), его разрыв (в) и исчезновение (г). То есть развитие деформации приводит к растяжению фронта горения до критического значения, при котором происходит его разрыв с последующим схлопыванием. В опытах также наблюдалась деформация (вспучивание) фронта пламени, не приводящая к разрыву.

В диффузионном режиме работы горе-

лочного устройства лимитирующими скорость сжигания являются процессы молекулярной диффузии. При рассмотрении диффузионного горения обычно принимается модель, в которой горение протекает в узкой зоне, отделяющей окислитель от горючего [3, 4]. В приближении бесконечно больших скоростей химических реакций зону горения можно считать геометрической поверхностью, на которой концентрации окислителя и горючего равны нулю [3]. Разрыв во фронте пламени возможен при наличии сильных градиентов скорости, возникающих при взаимодействии с вихрем [5]. Хорошо известно, что переходному режиму истечения свойственно возникновение вихревых структур различной интенсивности. Можно предположить, что наблюдаемое явление образования «дыр» в диффузионном факеле связано с возникновением вихря при смешении с воздухом, протеканием горения в нем внутри факела и выходом продуктов сгорания во внешнюю среду с разрывом фронта пламени.

В заключение кратко сформулируем основные результаты:

— разрывы во фронте диффузионного пламени зарегистрированы для различных горючих газов в отсутствие спутного потока и на значительном расстоянии от зоны стабилизации;

— явление наблюдается в диффузионном пламени в переходном режиме горения от ламинарного к турбулентному;

— возможной причиной появления «дыр» во фронте может быть взаимодействие пламени с вихрем, образованным в струйном течении при смешении с воздухом, протекание горения в нем и выход продуктов сгорания во внешнюю среду с разрывом фронта пламени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lyons K. M., Watson K. A., Carter C. D., Donbar J. M. On flame holes and local extinction in lifted-jet diffusion flames // *Combust. Flame.* — 2005. — V. 142. — P. 308–313.
2. Хотел Г., Гаусорн В. Диффузия в пламени в ламинарном потоке // *Вопросы горения: сб. ст.* — М.: Изд-во иностр. лит., 1953. — С. 125–145.
3. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
4. Кузнецов В. Р., Сабельников В. А. Турбулентность и горение. — М.: Наука, 1986.
5. Renard P.-H., Thevenin D., Rolon J. C., Candel S. Dynamics of flame/vortex interaction // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2000. — V. 26. — P. 225–283.

Поступила в редакцию 19/IX 2014 г.