УДК 536.641, 536.464, 534.222

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ОБЕДНЕННЫХ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ МЕТОДОМ PIV

Дулин В.М., Маркович Д.М., Чикишев Л.М.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа выполнена при поддержке Федеральных целевых программ «Научные и научно-пудагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» и «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы», а также финансировании РФФИ (грант № 11-08-00985).

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты измерений структуры потока при обедненных режимах горения в модельной камере сгорания с различной степенью закрутки потока. В работе исследовались два случая: слабая закрутка потока (S=0,4), не приводящая к образованию центральной зоны рециркуляции, и сильная закрутка (S=1,0) для которой характерен ярко выраженный распад вихревого ядра. Исследование проводилось при помощи современного оптического метода Stereo PIV с высоким временным разрешением (High-Repetition PIV). Применение данного метода позволило получить поля скорости в центральном сечении горелочного устройства и проанализировать структуру обедненных режимов горения предварительно перемешанной метано-воздушной смеси.

ВВЕДЕНИЕ

Закрученные течения широко используются во многих приложениях: горелочные устройства, камеры сгорания, смесители, и т.д. [1]. С практической точки зрения наложение закрутки существенным образом влияет на процессы перемешивания в устройствах, использующих струйную подачу топлива. Поэтому, закрутка часто применяется в горелках для стабилизации пламени, в частности в условиях горения обедненной смеси [2]. С целью оптимизации реальных камер сгорания применяется моделирование закрученных изотермических и реагирующих течений при помощи расчетных кодов вычислительной гидродинамики (CFD). Однако, моделирование даже изотермических закрученных течений является сложной задачей вследствие наличия таких явлений как нестационарная прецессия вихревого ядра, спиральные неустойчивости в слое смешения, а также сложная динамика связанная с явлением распада вихревого ядра. Таким образом, развитие и валидация CFD моделей, удовлетворительно описывающих сложные закрученные течения, требует большого набора достоверных экспериментальных данных. В настоящее время имеется достаточно много работ, посвященных экспериментальному исследованию закрученных изотермических струй при различных режимах течения в зависимости от степени закрутки и способа ее наложения, эффектов сил плавучести и т.д. [3-5]. Для незакрученных и слабо-закрученных струй характерны кольцевые вихри в слое смешения, формирующиеся вследствие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Для сильно-закрученных струй доминируют спиралевидные вихревые структуры в сдвиговом слое (когда степень закрутки меньше критической, при которой возникает распад вихря) [6-7]. Для чисел закрутки превышающих критическое значение распад вихревого ядра может иметь различную форму: спиральную, пузырьковую, коническую [3, 5].

В то время как закрутка часто используется для стабилизации пламени за счет увеличения турбулентных пульсаций до фронта пламени, а также за счет создания области пониженной скорости или зоны рециркуляции (для слабой и сильной закрутки соответственно) вблизи

выхода из сопла, присутствие горения делает структуру закрученных струй еще более сложной [8-10]. Наблюдения разных авторов показывают, что турбулентные закрученные пламена обладают широким спектром режимов горения (например, присоединенные, поднятые, V-образные, квази-цилиндрицеские пламена описаны в работе [8]), что является следствием таких эффектов как термическое расширение (сильное влияние эффектов плавучести на структуру закрученной струи было показано в работе [5]). Так в частности, явление распада вихря, вызванное наличием процесса горения, может возникать в горелочных устройствах с закруткой потока [11].

При проведении экспериментальных исследований по измерению полей скорости методом PIV в закрытых горелочных устройствах экспериментаторы сталкиваются с рядом проблем, связанных с ограниченным оптическим доступом [12]. Так, например, вследствие падения концентрации после прохождения фронта пламени из-за термического расширения возникает неравномерный засев потока трассерами, кроме того время серии измерений ограничено несколькими секундами из-за быстрого налипания частиц на стенки камеры сгорания. В рамках данной работы эти проблемы были решены за счет применения Stereo PIV системы с высоким временным разрешением.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерения проводились на горелочном стенде, состоящем из цилиндрической камеры сгорания, воздушного насоса, камеры предварительного перемешивания и блока расходомеров. В качестве топлива использовался метан (чистота газа 0,99 %). Коэффициент избытка топлива Ф определялся как отношение мольной доли топлива в эксперименте к мольной доле при стехиометрическом составе смеси, с учетом 21% объемного содержания кислорода в воздухе, Ф имеет следующую зависимость от расходов воздуха $Q_{воздух}$ и горючего газа:

$$\Phi = \frac{\left(n_{fuel}/n_{oxider}\right)}{\left(n_{fuel}/n_{oxider}\right)_{stoich}} = 9.6\frac{Q_{метан}}{Q_{воздух}} \qquad (1)$$

Эксперименты проводились при атмосферном давлении. Число Рейнольдса Re_{air} (построенное по выходному диаметру сопла, среднерасходной скорости воздуха и вязкости воздуха) для всех режимов составляло 4100. Среднерасходная скорость смеси на выходе из сопла составляла 5 м/с, что соответствовало среднему расходу 44,2 л/мин. Камера сгорания представляла собой цилиндр из кварцевого стекла (внутренний диаметр D_0 = 77 мм, высотой 120 мм). Предварительно перемешанная метано-воздушная смесь подавалась через профилированное сужающееся сопло. Выходной диаметр сопла составлял 15 мм. Во внутреннюю область сопла помещался завихритель лопаточного типа, представляющий собой тело обтекания с шестью лопатками с углом наклона 55° в случае сильной закрутки и 30° в случае слабой закрутки. Схема расположения завихрителя внутри сопла представлена на рис.1.

Степень закрутки определялась исходя из геометрических параметров завихрителя:

$$S = \frac{2}{3}\left(\frac{1-\left(d_1/d_2\right)^3}{1-\left(d_1/d_2\right)^2}\right)\tan\left(\varphi\right) \qquad (2)$$

где, d_1 = 7 мм – диаметр центрального тела поддерживающего лопатки, d_2 = 27 мм – это внешний диаметр завихрителя, и φ - это угол наклона лопаток

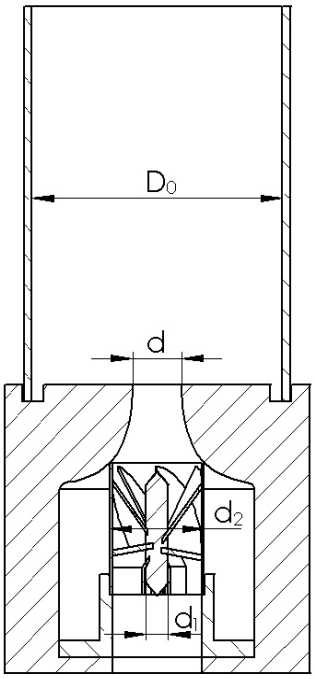

Рис.1 Схема расположения лопаточного завихрителя внутри соплового блока.

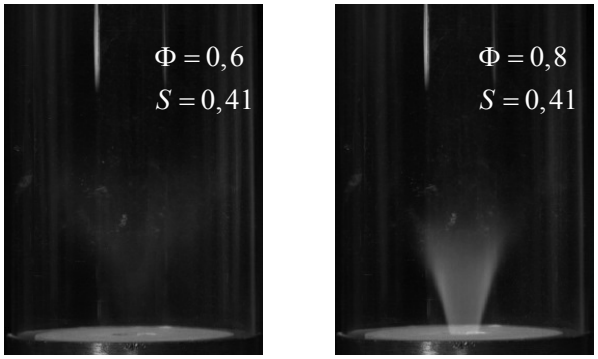

Рис.2 Визуализация режимов горения слабо-закрученных обедненных метано-воздушных пламен.

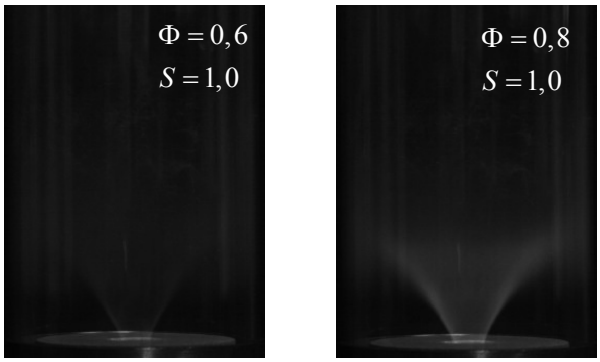

Рис.3 Визуализация режимов горения сильно-закрученных обедненных метано-воздушных пламен.

Для измерения мгновенных полей скорости использовалась Stereo PIV система, состоящая из двойного импульсного Nd:YLF лазера Pegasus PIV производства New Wave Research (длина волны 527 нм, энергия импульса 10 мДж на частоте 1 кГц, максимальная частота импульсов 10 кГц), двух скоростных КМОП камер PCO 1200HS оснащенных объективами Nikor 60 с оптическими фильтрами производства Dantec (для подавления излучения пламени) и синхронизатора «ПОЛИС». Поток засевался частицами диоксида титана средним размером порядка 1 мкм. Для формирования лазерного ножа использовалась оптическая насадка, представляющая собой систему из фокусирующей и цилиндрической линзы. Толщина лазерного ножа в области измерений составляла 1 мм. Измерения проводились в центральном сечении струи (пламени). PIV система работала в двухкадровом режиме с частотой съемки 770 Гц. Задержка между парами кадров (и соответственно между парами вспышек лазера) составляла 1300 мкс. Задержка между двумя вспышками, определяющая смещение частиц на паре кадров составляла 40 мкс. Для возможности расчета статистики по ансамблю из 2700 мгновенных полей скорости для каждого режима проводилось три независимых запуска по 900 полей скорости.

Стерео калибровка проводилась при использовании многоуровневой калибровочной мишени. Мишень размером 150×150 мм^2 имела три уровня калибровочных маркеров: {−2, 0, +2} мм относительно центра мишени. Чтобы минимизировать ошибку стерео калибровки использовалась итерационная процедура коррекции рассогласования плоскости калибровочной мишени и плоскости лазерного ножа. Ошибка 3D реконструкции калибровки не превышала 0,78 пикселя, что обеспечивало высокую точность измерения смещения частиц, пространственное разрешении составляло 14,2 пикселя на 1 мм.

Визуализация исследованных режимов горения предварительно перемешанной метновоздушной смеси для случая сильной и слабой закрутки потока представлена на рис.2 и рис.3 соответственно. Как можно видеть, в случае слабой закрутки потока пламя с коэффициентом Φ=0,6 представляет собой поднятое пламя, стабилизированное на некотором расстоянии от сопла. В остальных режимах пламя стабилизируется за телом обтекания завихрителя и его фронт проникает внутрь сопла.

ОБРАБОТКА PIV ДАННЫХ

Управление системой, сбор, хранение и обработка данных осуществлялись при помощи компьютера с программным обеспечением “ActualFlow”. Поля скорости рассчитывались, используя итерационный кросскорреляционный алгоритм с деформацией изображения и конечным размером расчетной области 32×32 пикселя и 75% перекрытия. Для расчета мгновенных полей скорости использовалась центрально-разностная дифференциальная схема второго порядка [13]. Данная схема представляет собой низкочастотный дифференциальный фильтр, позволяющий эффективно подавлять высокочастотный шум. Детальное описание

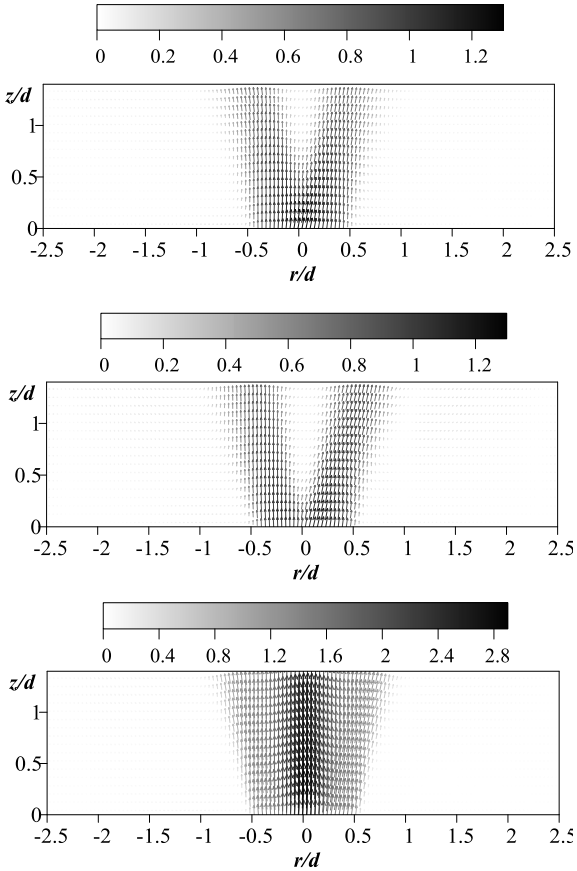

Рис.4 Пространственное распределение поля средней скорости в случае слабой закрутки потока (S=0,41 Re=4100) для изотермического течения (а) и горения метано-воздушной смеси Ф=0,6 (б) и Ф=0,8 (в).

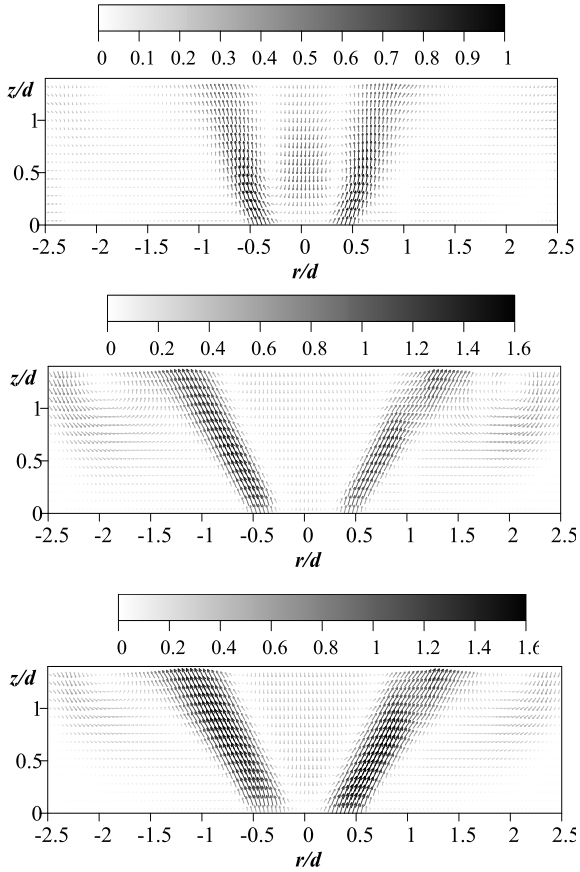

Рис.5 Пространственное распределение поля средней скорости в случае смльной закрутки потока (S=1,0 Re=4100) для изотермического течения (а) и горения метано-воздушной смеси Ф=0,6 (б) и Ф=0,8 (в).

алгоритмов обработки изложено в работах [14], [15]. Кроме того для улучшения качества PIV данных, полученных с разрешением 10 бит применялась процедура вычитания фона, которая позволила в значительной степени устранить влияние бликов, возникающих вследствие переотражения лазерного излучения стенками камеры сгорания. Более детально вопросы, касающиеся погрешности измерений методом PIV обсуждались в статье [8].

В данных экспериментах погрешность измерения мгновенных полей скорости в центральном сечении модельной камеры сгорания не превышала 5 %.

Далее перейдем к обсуждению полученных результатов. Представленные векторные поля (рис.4-5) нормированы на среднерасходную скорость смеси, длина и цвет векторов соответствуют двухкомпонентному модулю скорости в измерительной плоскости. Координаты нормированы на внутренний диаметр сопла (d=15 мм). Для всех полей скорости показан каждый второй веткор.

Как можно видеть, характерной особенностью изотермического течения в случае слабой закрутки потока является наличие области пониженной скорости вблизи оси струи (см. рис.4). В случае горения метано-воздушной смеси с коэффициентом стехиометрии Ф=0,6 область пониженной скорости смещается ближе к соплу, при этом сохраняется спиральный тип распада вихря. При дальнейшем увеличении коэффициента стехиометрии до Ф=0,8 на выходе из сопла возникает область повышен-

ной скорости вблизи ядра струи, связанная с тем, что при таком режиме горения пламя стабилизируется за телом обтекания завихрителя внутри соплового блока, и из сопла выходит уже горячий газ (см. рис.2).

На рис.5 представлены результаты PIV измерений для изотермического и реагирующего течений в случае сильной закрутки потока (S=1,0) которая сопровождается наличием ярко выраженного распада вихря. Как можно видеть в этом случае изотермическое течение характеризуется наличием центральной зоны рециркуляции пузырькового типа. Наличие горения в случае сильной закрутки приводит к существенной модификации структуры течения, изменяется тип распада вихря. В случае горения для коэффициентов стехиометрии Ф=0,6 и Ф=0,8 можно видеть конический тип центральной зоны рециркуляции, а также ярко выраженные боковые зоны рециркуляции между основным потоком и стенками камеры сгорания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы были проведены исследования структуры течения в модельной камере сгорания. Применение метода Stereo PIV с высоким временным разрешением позволило избежать проблем с налипанием трассерных частиц на стенки камеры сгорания и набрать необходимый статистический ансамбль для расчета средних полей скорости. Проведено сравнение режимов течения в случае изотермического потока, а также потока с горением при обедненном составе предварительно перемешанной метано-воздушной смеси в случае сильной и слабой закрутки потока. Для случая слабой закрутки потока горение существенно модифицирует структуру течения при коэффициенте стехиометрии Ф=0,8 и приводит к образованию области повышенной скорости вблизи оси струи на выходе из сопла вследствие теримического расширения. Было показано, что наличие горения в случае сильной закрутки потока приводит к изменению типа распада вихря: центральная зона рециркуляции в форме пузыря в случае изотермического течения сменяется зоной рециркуляции конического типа в случае горения обедненной смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.K. Gupta, D.G. Lilley, N. Syred, Swirl flows. Abacus Press, Kent, England, 1984, p 475
2. D. Dunn-Rankin, Lean Combustion: Technology and Control. Academic Press, 2008, p. 280
3. Billant P., Chomaz J.-M., Huerre P.// Experimental study of vortex breakdown in swirling jets //J. Fluid Mech., 376 (1998) 183-219.
4. Liang H., Maxworthy T., An experimental investigation of swirling jets. // J. Fluid Mech., 525 (2005) 115-159.
5. Mourtazin D., Cohen J., The effect of buoyancy on vortex breakdown in a swirling jet. // J. of Fluid Mech., 571 (2007) 177-189.
6. Gallaire F., Rott S., Chomaz J.-M., Experimental study of a free and forced swirling jet // Phys. Fluids, 16 (2004) 2907-2917.
7. Loiseleux T., Chomaz J.M., Breaking of rotational symmetry in a swirling jet experiment // Phys. Fluids, 15 (2003) 511-523
8. Alekseenko S.V., Dulin V.M., Kozorezov Yu.S., Markovich D.M., Shtork S.I., Tokarev M.P., Flow structure of swirling turbulent propane flames. // Flow Turbulence Combust., 87 (2011) 569-595
9. R.K. Cheng, Low swirl combustion, in R. Dennis (Ed.) The Gas Turbine Handbook, DOE, Washington, DC, 2006.
10. Legrand M., Nogueira J., Lecuona A., Nauri S., Rodríguez P.A., Atmospheric low swirl burner flow characterization with stereo PIV //Exp. Fluids, 48 (2009) 901-913.
11. Konle M., Kiesewetter F., Simultaneous high repetition rate PIV-LIF-measurements of CIVB driven flashback // Sattelmayer T., Exp. Fluids, 44 (2008) 529-538.
12. Willert C., Jarius M. (2002) Planar flow field measurements in atmospheric and pressurized combustion chambers // Exp. Fluids 33, p.931-939

13. Foucaut, J.M., and Stanislas, M. (2002) Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields. Meas. Sci. Technol., 13, 1058-1071
14. Маркович Д.М., Токарев М.П. Алгоритмы реконструкции трехкомпонентного поля скорости в методе Stereo PIV// Вычис. методы и программир.2008. 9. С. 311-326
15. Дулин В.М., Козорезов Ю.С., Маркович Д.М., Токарев М.П. Исследование газодинамической структуры потока в закрученном турбулентном пламени методом цифровой трассерной визуализации // Вестн. НГУ Сер. Физика. 2009 4. вып. 3, С. 30-42