

УДК 536.461, 533.6.01

Подавление прецессии вихревого ядра в закрученном реагирующем потоке*

И.В. Литвинов^{1,2}, А.В. Назаров¹, С.И. Шторк^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

E-mail: litvinov@itp.nsc.ru

С использованием бесконтактного метода лазерной доплеровской анемометрии и специальной процедуры выделения неосесимметричной моды пульсаций течения исследовано влияние эффекта горения на нестационарную вихревую структуру в форме прецессирующего вихревого ядра. Исследования показали, что горение оказывает существенное влияние на параметры такого ядра, уменьшая амплитуду (отклонение вихря от центра горелки) и увеличивая частоту прецессии. При этом акустические датчики регистрируют снижение уровня пульсаций давления, генерируемых прецессирующим вихревым ядром, почти на порядок. Вместе с тем, распределения пульсаций тангенциальной скорости и кросскорреляционный анализ показывают, что прецессия вихря остается достаточно выраженной и в условиях горения, внося заметную когерентную составляющую в распределения пульсаций скорости.

Ключевые слова: прецессирующее вихревое ядро, ЛДА, акустические датчики, вихревая горелка с тангенциальной подачей.

В современных горелочных устройствах широко используется аэродинамический способ стабилизации факела посредством закрутки потока, за счет которой происходит формирование центральной рециркуляционной зоны. Она обеспечивает эффективное смешение горячих продуктов горения со свежей топливно-воздушной смесью, что важно, например, для стабилизации пламени в низкоэмиссионных камерах сгорания, в которых используется обедненное предварительно перемешанное сжигание топлива [1]. Во многих случаях сильная закрутка потока приводит к генерации прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ) [2]. ПВЯ является источником мощных пульсаций потока, которые создают серьезную опасность для энергетического оборудования. Характер влияния горения на ПВЯ весьма неоднозначен и определяется множеством факторов, включая способ подвода топлива и окислителя, степень закрутки потока и тепловую мощность горелочного устройства [3]. В предельных ситуациях горение может полностью подавлять ПВЯ [3] или практически не изменять частотные и амплитудные характеристики пульсаций потока [1]. Все вышесказанное свидетельствует о том, что задача определения характеристик ПВЯ при работе горелочных устройств в реагирующих условиях является актуальной.

Настоящие исследования проводились с использованием модельного горелочного устройства с тангенциальной закруткой (рис. 1). Выбор подобной геометрии обусловлен тем, что тангенциальные или улиточные завихрители имеют самую простую в изготовлении

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по Соглашению о субсидии № 14.613.21.0005 (уникальный идентификатор проекта RFMEF161314X0005).

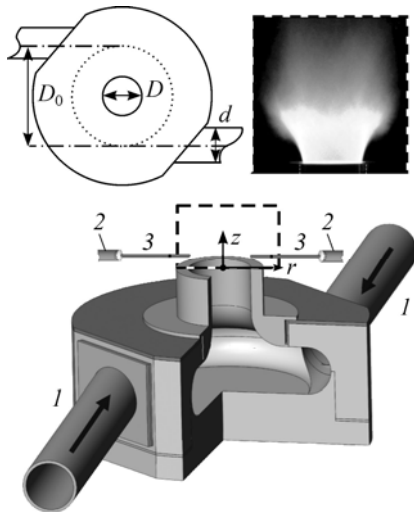


Рис. 1. Схема вихревой горелки.

1 — подача топливно-воздушной смеси, 2 — микрофоны, 3 — отборники давления.

конструкцию и поэтому часто применяются для сжигания различных видов топлива, в том числе мелкодисперсного угольного топлива [4].

Конструктивный параметр крутки вихревой горелки определялся, как и в работах [5, 6], на основе геометрии завихрителя (рис. 1) по формуле $S = DD_0/2d^2$, где в нашем случае диаметр сопла $D = 52$ мм, диаметр завихрителя $D_0 = 145$ мм, диаметр подводящих патрубков $d = 40$ мм, что соответствует параметру крутки $S = 2,4$. Режимы горения задавались параметром ϕ , который характеризует отличие отношения массовых расходов топлива и окислителя от стехиометрических ус-

ловий ($\phi < 1$ соответствует условиям с избытком воздуха, т.е. обедненной смеси). Для измерения профилей скорости потока за выходом из сопла применялась система лазерной доплеровской анемометрии «ЛАД 06-и» разработки ИТ СО РАН. В качестве трассеров потока использовались частицы оксида алюминия со средним диаметром 1–2 мкм. В каждой измерительной точке набиралась статистика из не менее 2,5 тысяч значений скорости. Для регистрации пульсаций давления использовались измерительные микрофоны «Behringer ECM8000», к которым, как в работе [6], присоединялись отборники в виде тонкой трубки диаметром 2 мм. Для минимизации возмущений течения точки отбора пульсаций давления находились на внешней границе горелочной струи (рис. 1).

В рассматриваемой вихревой горелке реализовывалось устойчивое горение, в том числе в случае обедненных режимов, которые представляют интерес с точки зрения достижения ультранизких выбросов NO_x [1]. На рис. 1 показан вид обедненного пламени ($\phi = 0,5$), нижняя часть которого имеет характерную коническую форму. Острие конуса опускается внутрь сопла, по всей видимости, до нижнего торца, что и обеспечивает надежную стабилизацию факела.

На рис. 2 показаны распределения осредненной и пульсационной составляющих скорости вдоль радиальной координаты r , измеренные в условиях горения при расходе воздуха 9 л/сек и расходе пропана 11,3 л/мин, что соответствует $\phi = 0,5$. Здесь же для сравнения представлены данные для изотермического потока при том же расходе воздуха (U_0 — среднерасходная скорость для изотермических условий). Видно, что горение существенно изменяет уровень скоростей за счет термического расширения среды и, соответственно, увеличения объемного расхода потока. Форма профилей осевой скорости U в условиях горения, так же, как в изотермических условиях, имеет вид, характерный для следа, а именно: с центральным провалом и максимумом, смещенным к периферии потока (рис. 2a). Однако размер рециркуляционной зоны в реагирующем потоке заметно уменьшился. Соответственно максимум осевой скорости сдвинут ближе к центру, т.е. в условиях горения радиальное расширение закрученной струи менее выражено, чем это имеет место в изотермических условиях. Горение тоже трансформирует характер распределения тангенциальной компоненты скорости W . Максимум тангенциальной скорости так же, как и в случае осевой скорости, сместился ближе к центру. Соответственно вырос уровень максимальной тангенциальной скорости.

На распределениях пульсаций осевой скорости U_{RMS} (рис. 2b) можно видеть характерные пики, которые появляются в условиях с горением и без горения в слое смешения прямого и обратного течений на границе центральной рециркуляционной зоны при $r \approx 0,07$ и $0,25D$ соответственно. В условиях горения профили пульсационной составляющей тангенциальной скорости W_{RMS} , как и в изотермических условиях, имеют выделенные

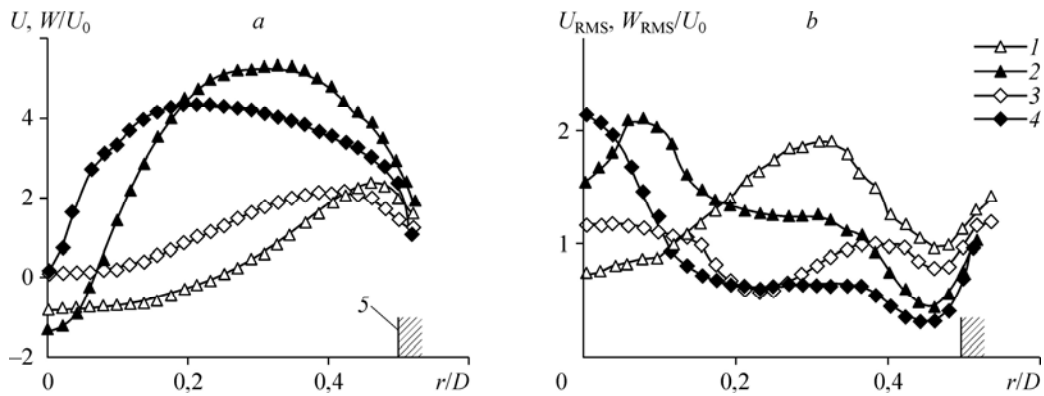


Рис. 2. Профили средней (а) и пульсационной (б) составляющих скорости для изотермического и реагирующего потоков.

Компоненты: 1, 2 — аксиальная, 3, 4 — тангенциальная, 5 — стенка сопла; светлые символы — изотермический поток, темные — реагирующий поток; сечение $z = 0,058D$.

центральные пики, что однозначно указывает на прецессию центра вихря [1]. При горении эти пики становятся более узкими, что может означать уменьшение амплитуды прецессии вихря. Этот вывод согласуется с отмеченным для реагирующего потока уменьшением более чем в три раза радиуса $r = r|_{U=0}$, вблизи которого должен находиться центр ПВЯ [2]. Таким образом, как это отмечалось в исследовании [3], в условиях горения высокоамплитудное ПВЯ подавляется в большей степени. Вместе с тем следует отметить, что высота пиков в распределениях пульсаций скорости вблизи центра струи в условиях горения возрастает за счет более выраженного градиента.

Для получения информации о пульсациях давления были использованы сигналы от двух акустических датчиков, размещенных в диаметрально противоположных направлениях на срезе сопла горелочного устройства (рис. 1). Это позволяло анализировать разностный сигнал от двух датчиков для выделения из зашумленного акустического сигнала моды, соответствующей ПВЯ [7]. Из спектров разностного сигнала пульсаций давления (рис. 3а) видно, что в изотермических условиях и при горении присутствуют выделенные частоты (138,4 и 176,6 Гц соответственно), которые очевидно связаны с ПВЯ [5, 6]. Этот вывод подтверждают также кросскорреляционные функции акустических сигналов датчиков, размещенных в диаметрально противоположных направлениях (рис. 3б). Видно, что первый максимум корреляционной функции без горения приходится на 1/2 периода пульсаций T_1 , который может быть определен на основе спектра разностного сигнала (рис. 3а). Т.е. сигналы изменяются в противофазе, что характерно для неосесимметричной винтовой моды возмущений [8]. Максимум корреляционной функции при горении приходится

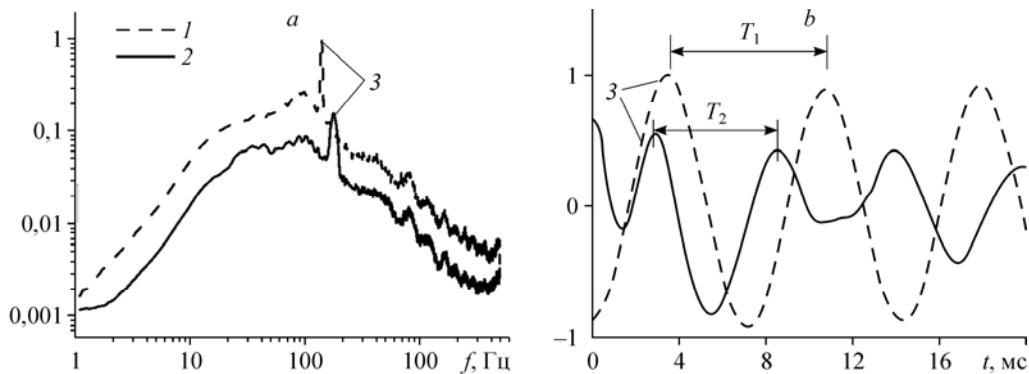


Рис. 3. Энергетические спектры пульсаций давления (а) и кросскорреляционные функции (б).

1 — изотермические условия, 2 — при горении, 3 — максимумы, соответствующие ПВЯ; масштабы по вертикальным осям приведены в относительных единицах.

на нулевой сдвиг фаз, что отражает вклад осесимметричных пульсаций, возможным источником которых является верхняя часть факела (рис. 1). Эти пульсации, регистрируемые датчиками в одной фазе, удаляются из разностного сигнала и поэтому не видны в спектре на рис. 3а. Прецессия центра вихря, которая была определена на основе распределения пульсаций тангенциальной скорости, в условиях горения дает второй пик в корреляционной функции, сдвинутый примерно на половину периода прецессии T_2 , который также можно определить на основе спектра. Таким образом, можно заключить, что горение оказывает существенное влияние на параметры ПВЯ, уменьшая амплитуду (отклонение от центра горелки) и увеличивая частоту прецессии. При этом акустические датчики регистрируют снижение уровня пульсаций давления, генерируемых ПВЯ, почти на порядок, на основании чего можно сделать вывод, что горение приводит к подавлению ПВЯ.

Представленные выше данные позволяют сделать вывод, что исследуемое горелочное устройство тангенциального типа позволяет формировать закрученную горелочную струю с центральным провалом на профилях осевой скорости. Такая аэродинамическая структура течения может считаться оптимальной, поскольку центральная область замедленного течения создает условия для эффективной стабилизации пламени. Важным результатом является тот факт, что в условиях горения за счет заполнения центральной рециркуляционной зоны горячими продуктами горения, выполняющими функцию поджога свежей топливно-воздушной смеси, существенно подавляется сильная неустойчивость течения в форме прецессирующего вихревого ядра. Из измеренных энергетических спектров сигналов акустических датчиков следует, что подавление ПВЯ в условиях горения приводит к существенному снижению уровня пульсаций давления. Вместе с тем, распределения пульсаций тангенциальной скорости и кросскорреляционный анализ показывают, что прецессия вихря остается заметно выраженной и в условиях горения. При этом пики пульсаций скорости, появляющиеся в результате движения ПВЯ, даже возрастают в реагирующем течении.

Таким образом, проведенные исследования с использованием лазерной доплеровской анемометрии и специальных акустических датчиков позволили выявить новые особенности влияния горения на эффект прецессии вихря. В частности, было показано, что в режимах с подавлением ПВЯ оно, тем не менее, присутствует, внося существенную когерентную составляющую в распределения пульсаций скорости. Этот факт, безусловно, должен учитываться при математическом моделировании и проектировании горелочных устройств.

Список литературы

1. Anacleto P.M., Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I. Swirl flow structure and flame characteristics in a model lean premixed combustor // *Combust. Sc. Technol.* 2003. Vol. 175, No. 8. P. 1369–1388.
2. Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems // *Progress in Energy and Combustion Sci.* 2006. Vol. 32, No. 2. P. 93–161.
3. Oberleithner K., Stöhr M., Im S.H., Arndt C.M., Steinberg A.M. Formation and flame-induced suppression of the precessing vortex core in a swirl combustor: experiments and linear stability analysis // *Comb. Flame.* 2015. Vol. 162. P. 3100–3114.
4. Burdukov A.P., Popov V.I., Yusupov T.S., Hanjalić K., Chernetskiy M.Y. Autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal in a 5 Mw pilot-scale combustor // *Fuel.* 2014. Vol. 122. P. 103–111.
5. Литвинов И.В., Шарборин Д.К., Шторк С.И. Определение параметров винтовой симметрии нестационарного вихревого течения на основе фазово-осредненных PIV измерений // *Теплофизика и аэромеханика.* 2015. Т. 22, № 5. С. 673–676.
6. Litvinov I.V., Shtork S.I., Kuibin P.A., Alekseenko S.V., Hanjalic K. Experimental study and analytical reconstruction of precessing vortex in a tangential swirler // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2013. Vol. 42. P. 251–264.
7. Винокуров А.П., Шторк С.И., Алексеенко С.В. Исследование влияния газовой фазы на характеристики прецессирующего вихревого ядра в осесимметричной гидродинамической камере // *Теплофизика и аэромеханика.* 2014. Т. 21, № 6. С. 803–806.
8. Shtork S.I., Vieira N.F., Fernandes E.C. On the identification of helical instabilities in a reacting swirling flow // *Fuel.* 2008. Vol. 87, No. 10. P. 2314–2321.

*Статья поступила в редакцию 26 ноября 2015 г.,
после переработки — 14 декабря 2015 г.*