

УДК 532.5, 533.6.011

Характеристики прецессирующего вихревого ядра в изотермической модели горелочного устройства радиального типа *

Е.Ю. Гореликов^{1,2}, И.В. Литвинов^{1,2}, Д.А. Суслов^{1,2}, М.А. Цой¹,
С.И. Шторк¹

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

²Новосибирский государственный университет

E-mail: gorelikoeu@gmail.com

Приведены экспериментальные данные по реконструкции пространственной структуры закрученной струи в модели горелочного устройства. Рассмотрен изотермический случай смещения свободной струи с окружающим воздухом при различных уровнях закрутки потока. Исследуемые течения с высокой закруткой сопровождаются распадом ядра вихря и интенсивными когерентными пульсациями потока, связанными с крупномасштабными вихревыми структурами. Экспериментальные данные по распределениям аксиальной и тангенциальной скоростей получены методом цифровой трассерной визуализации. Вклад когерентных флуктуаций потока в турбулентный перенос оценен на основе ортогонального разложения (POD). Частота периодических пульсаций давления была измерена с помощью акустических датчиков. Измерения частоты прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ) и соответствующих распределений скорости проводились при фиксированном числе Рейнольдса (16500). Получена немонотонная зависимость числа Струхала от закрутки потока. Визуализирована пространственная вихревая структура в изотермических условиях. С помощью POD-анализа было показано, что при росте закрутки увеличиваются радиус прецессии и шаг винтовой структуры ПВЯ.

Ключевые слова: закрученные течения, полевой измеритель скорости (Particle Image Velocimetry, PIV), разложение на ортогональные моды (Proper Orthogonal Decomposition, POD).

Введение

Турбулентные закрученные струйные течения широко используются в различных технологиях, в том числе в камерах сгорания ракетных и газотурбинных двигателей, газовых горелках и т.д. Перед современной энергетикой стоит задача повышения эффективности сжигания углеводородов, а также снижения вредных выбросов в атмосферу. Возникает острая необходимость разработки метода оптимального перемешивания топливовоздушной смеси, с чем связаны проблемы исследования влияния крупномасштабных вихревых структур на процесс горения [1], а также возникающего в ходе этих процессов акустического шума. Горелки с закруткой потока обычно используются для стабилизации факела и создания компактной зоны реакции для широкого диапазона

* Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 21-19-00769 (<https://rscf.ru/project/21-19-00769>).

расходов топлива и окислителя. При высоких величинах закрутки потока стабилизация пламени обеспечивается центральной рециркуляционной зоной, где горячие продукты сгорания возвращаются к устью факела и поджигают свежую топливовоздушную смесь. Следует отметить, что динамика сильнозакрученных течений зачастую становится нестационарной из-за распада и генерации прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ) как источника высокого уровня турбулентных пульсаций [2]. Вихревые потоки обеспечивают эффективное перемешивание топливовоздушной смеси, поэтому широко используются на практике как метод стабилизации горения обедненной смеси [3]. Для достижения низких выбросов NO_x топливо в современных камерах сгорания сжигают в условиях обедненной смеси после предварительного смешивания с воздухом [4]. Следует добиться устойчивого сгорания предварительно перемешанной смеси, чтобы избежать колебаний температуры, и варьировать соотношение топливо/воздух для поддержания высокой эффективности сгорания. Известно, что обедненные пламена чувствительны к внешним возмущениям [5]. Это приводит к термоакустическим колебаниям в камере сгорания, снижению полноты сгорания и срыву пламени. Следовательно, важно обеспечить устойчивое сжигание обедненной смеси в вихревых горелках, что, в свою очередь, требует детальных исследований возникающих крупномасштабных вихревых структур. В конечном итоге цель данных исследований — перейти к управлению крупномасштабными вихревыми структурами в реагирующих условиях, т.е. к изменению амплитудно-частотных характеристик эффекта ПВЯ.

Можно выделить несколько способов такого управления, которые делятся на активные и пассивные [6]. Большинство способов направлено на изменение геометрии вихревой структуры как для увеличения, так и для уменьшения интенсивности турбулентного переноса. Пассивные способы управления, как правило, основаны на изменении геометрической формы горелочного устройства. Способы активного управления вихревыми структурами отличаются от пассивных тем, что активное управление можно подстраивать под конкретный режим работы горелочного устройства или под имеющиеся амплитудно-частотные характеристики вихревых явлений. Таким образом, становится актуальной задача получения зависимости безразмерного числа Струхала Sh , характеризующего колебательные процессы в потоке, от параметра закрутки потока.

Важно отметить, что в таких закрученных потоках имеет место нелинейное взаимодействие между пламенем и вихревым ядром, что может приводить к нежелательным вибрациям горелочного устройства [7]. Поэтому важно знать характеристики возникающих в потоке крупномасштабных вихревых структур.

Цель настоящей работы — получение трехмерной структуры ПВЯ в горелочном устройстве для анализа его влияния на поток в изотермических условиях. Представлена динамика амплитудно-частотной характеристики потока в зависимости от закрутки потока и числа Рейнольдса в горелочном устройстве радиального типа.

Экспериментальная установка и техника

Схема горелочного устройства радиального типа приведена на рис. 1 и подробно описана в работе [8]. Воздух подавался воздуходувкой из комнаты в аэродинамический контур. Расход воздуха измерялся ультразвуковым расходомером «ИРВИС-РС4М-УЛЬТРА» с погрешностью 1,5 % и составлял $Q = 24,7 \text{ м}^3/\text{ч}$. Воздух проходит через камеру диаметром 500 мм и высотой 800 мм. На входе в камеру установлены выравнивающие сетки. Затем поток поступает на радиальный завихритель с поворотными лопатками

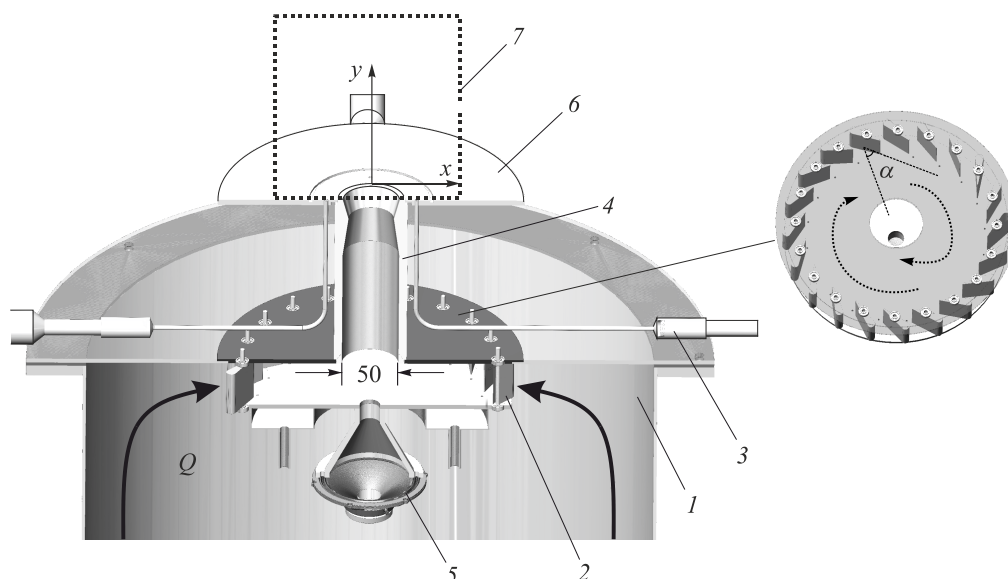


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — успокоительная камера, 2 — поворотные лопасти, 3 — отборники давления, 4 — камера смешения, 5 — актуатор, 6 — защитный экран, 7 — измерительная область PIV.

и через камеру смешения ($D = 50$ мм) выходит в открытое пространство. На выходе камеры смешения установлен защитный экран диаметром 250 мм для предотвращения эжекции воздуха снизу. Лопаточный завихритель состоит из 20 лопаток длиной 36,5 мм, шириной 9 мм. Угол поворота лопаток радиального завихрителя α варьируется от 0 до $76,5^\circ$ и устанавливается с точностью до 1° одновременным вращением осей лопаток с помощью шагового двигателя. Таким образом, с помощью автоматизированной системы управления и сбора данных на персональном компьютере реализуется прецизионное управление режимами вихревого течения в горелочном устройстве. Для измерения пульсаций давления использовались микрофоны Behringer ECM-8000 с отборниками давления, сигналы которых оцифровывались для последующей обработки.

В основании лопаточного завихрителя герметично установлен актуатор для периодического воздействия с нулевым расходом. Измерение полей скорости проводится с помощью метода PIV [9]. В качестве трассеров для проведения PIV-измерений в центральной области использовались капельки масла средним диаметром 1 мкм, полученные при помощи атомайзера Ласкина. Для реализации метода стерео-PIV применялась система «Полис», включающая лазер Nd: YAG с двойной головкой (Quantel, EverGreen), формирующей оптический «нож», и две камеры CCD (Bobcat ImperX с размером матрицы 2048×2048). Изображения PIV были обработаны с помощью программного обеспечения ActualFlow с применением итерационного адаптивного алгоритма взаимной корреляции [9]. Конечный размер расчетной области составил 16×16 пиксел.

В представленной работе для восстановления пространственной структуры ПВЯ использовался способ понижения размерности посредством POD-разложения. Метод POD [10] основан на разложении, например, поля скорости по оптимальному базису. Известно [11], что для выделения пространственной структуры ПВЯ можно аппроксимировать поле течения суперпозицией среднего течения и двух первых POD-мод. Визуализация структуры ПВЯ осуществлялась с помощью Q -критерия [12].

Результаты

На рис. 2а показаны спектры мощности пульсаций давления моды $m = 1$ для $S = 1,3$ при варьировании числа Рейнольдса Re от 1 до $4,5 \cdot 10^4$. Спектры пульсаций получены при помощи отборников давления по методике, описанной в работах [13, 14]. Основной пик на спектрограмме при $Sh = 1$ ассоциируется с частотой ПВЯ. Следующий по амплитуде пик ($Sh = 2$) является гармоникой ПВЯ. Видно, что сама частота ПВЯ слабо зависит от Re , т.е. реализуется автомодельность по частоте ПВЯ. В то же время амплитуда пульсаций $A/A_{\max}$ линейно растет с увеличением Re , что необходимо учитывать при управлении эффектом ПВЯ.

Для дальнейшего анализа частотной характеристики потока зафиксируем значение $Re = 1,65 \cdot 10^4$ и проследим динамику спектров пульсаций давления азимутальной моды $m = 1$ при варьировании параметра закрутки S . Из приведенных на рис. 2б спектров видно, что эффект ПВЯ появляется в потоке при преодолении критического значения параметра закрутки $S = 0,5$. Частота ПВЯ при этом немонотонно изменяется с увеличением S : при $S = 0,5 - 0,8$ падает, а начиная с $S = 0,8$ растет. Данный эффект был описан в работе [8] и связан с винтовой структурой ПВЯ, параметры которой изменяются при варьировании режима течения (параметра S).

Для описания пространственной структуры ПВЯ рассмотрим разложение по POD-модам полей флуктуаций скоростей для двух случаев, полученных методом PIV: малой закрутки ($S = 0,6$) и сильной закрутки ($S = 1,3$). На рис. 3а, 3с приведены распределения осредненной аксиальной скорости. Видно, что увеличение закрутки приводит к формированию обширной и интенсивной центральной области рециркуляции. На рис. 3б, 3с, 3е, 3ф для двух чисел закрутки S приведены первые две POD-моды для тангенциальной компоненты скорости. Знакопеременный характер распределений POD-мод демонстрирует, что в потоке возникает ПВЯ для обоих случаев, но при сильной закрутке расстояние между экстремумами растет. Из этого следует, что радиус прецессии ПВЯ увеличивается и для сильной закрутки ($S = 1,3$) приближается к радиусу камеры смещения.

На рис. 4 показаны изоповерхности распределения Q -критерия [12] для малой ($S = 0,6$) и сильной ($S = 1,3$) закруток. Трехмерное распределение было получено при допущении, что ПВЯ является квазипериодическим движением. Поэтому временной фазовый угол φ был заменен на азимутальный пространственный угол в цилиндрической системе координат.

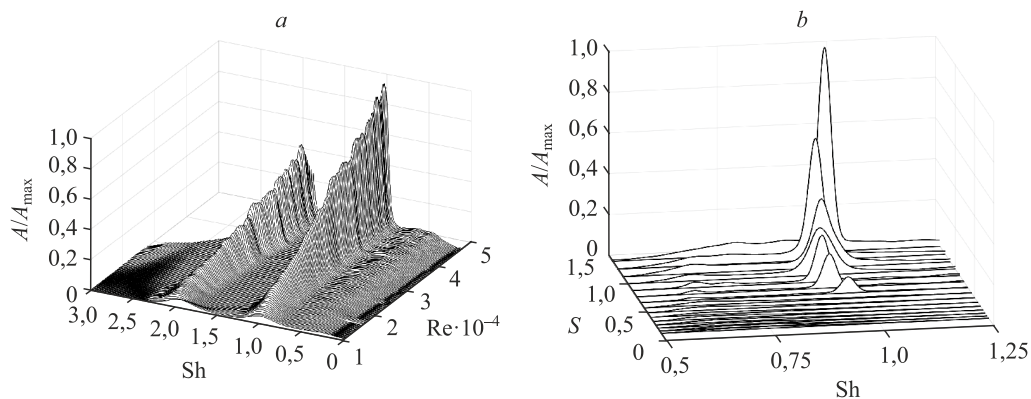


Рис. 2. Спектрограммы пульсаций давления для азимутальной моды $m = 1$ при варьировании Re (а) и параметра закрутки S (б).

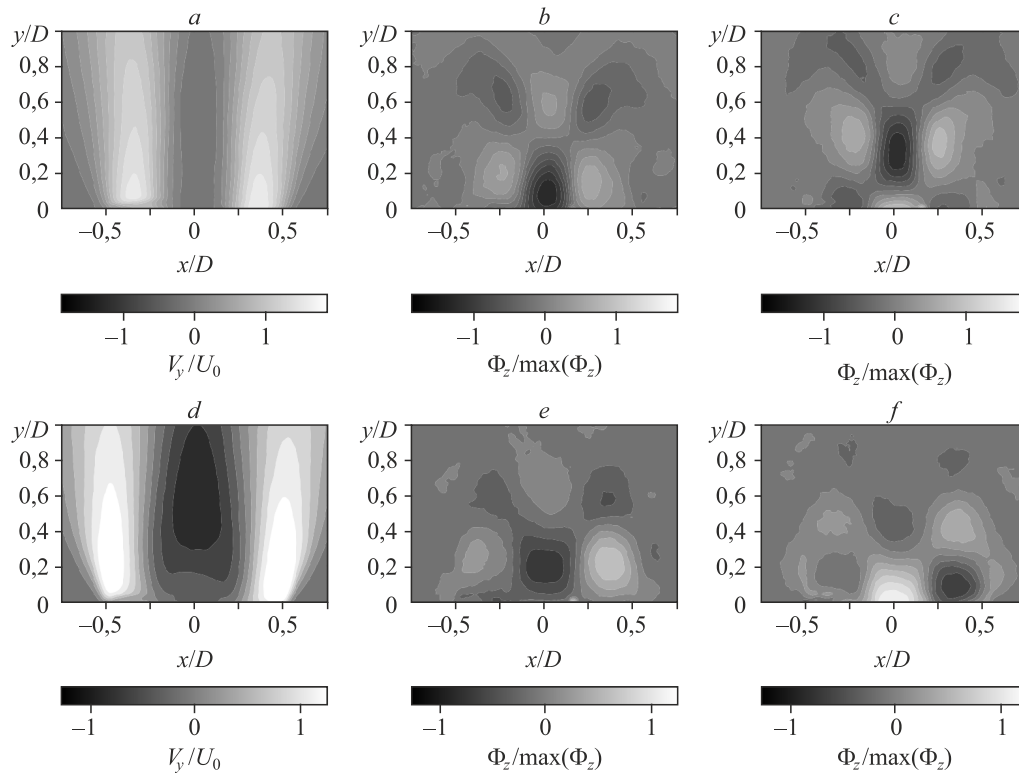


Рис. 3. Анализ полей скоростей для двух случаев: малой закрутки ($S = 0,6$) ($a-c$) и сильной закрутки ($S = 1,3$) ($d-f$).

a, d — среднее распределение осевой скорости V_y/U_0 ,

b, e — первая POD-мода для тангенциальной компоненты,

c, f — вторая POD-мода для тангенциальной компоненты скорости $\Phi_z/\max(\Phi_z)$.

По визуализациям, приведенным на рис. 4, отмечена винтовая структура ПВЯ. Возникают вторичные вихревые структуры во внешнем слое смешения, которые неразрывно связаны с ПВЯ [15]. Видно, что при изменении закрутки форма вторичного вихря меняется слабо. Винтовой вихрь во внутреннем слое смешения представляет собой основное ПВЯ, которое совершает прецессионное движение вместе с зоной рециркуляции.

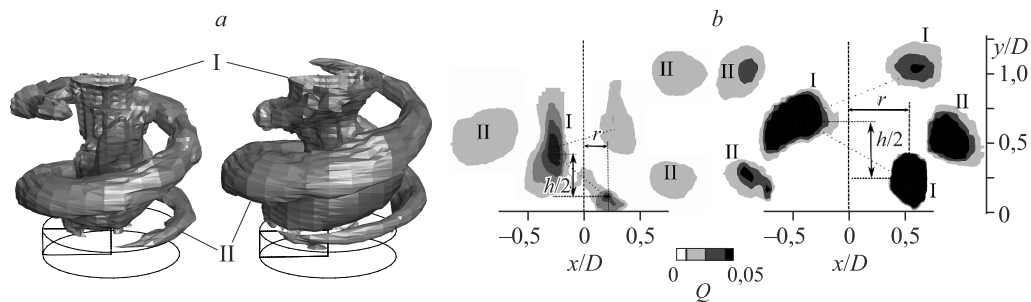


Рис. 4. Визуализация вихревых структур с помощью Q -критерия для разных параметров закрутки.

a — трехмерная визуализация ($Q = 0,05$, внизу показано выходное сопло горелочного устройства), слева — для слабой закрутки ($S = 0,6$), справа — для сильной закрутки ($S = 1,3$);

b — распределение в вертикальном центральном сечении, слева — для слабой закрутки ($S = 0,6$), справа — для сильной закрутки ($S = 1,3$);

цифра I обозначает внутреннюю вихревую структуру (ПВЯ),

цифра II — внешнюю вторичную вихревую структуру.

Исходя из двумерного сечения визуализации Q -критерия (см. рис. 4) можно вычислить и сравнить между собой горизонтальное отклонение центра ПВЯ от оси r , а также полушаг винтовой структуры ПВЯ $h/2$. Сравнение двух случаев ($S = 0,6$ и $1,3$) показывает, что увеличение закрутки действительно приводит к увеличению радиуса прецессии r/D с $0,15$ до $0,36$ и росту шага винтовой структуры h/D с $0,56$ до $0,8$. Эти закономерности подтверждают предположения об увеличении радиуса ПВЯ и шага винтовой структуры, сделанные при косвенном анализе средних профилей скорости в работе [8].

Заключение

Проведенные исследования с использованием PIV и четырех акустических датчиков позволили визуализировать пространственную структуру ПВЯ при изотермических условиях для двух случаев закрутки $S = 0,6$ и $1,3$ в модели горелочного устройства радиального типа. С помощью восстановления трехмерной структуры ПВЯ с использованием аппроксимации поля течения двумя POD-модами было показано, что при росте закрутки увеличиваются радиус прецессии и шаг винтовой структуры ПВЯ в модели горелочного устройства. Полученные результаты будут в дальнейшем использоваться для задачи управления ПВЯ в горелочном устройстве.

Список литературы

1. Stöhr M., Geigle K.P., Hadeff R., Boxx I., Carter C.D., Grader M., Gerlinger P. Time-resolved study of transient soot formation in an aero-engine model combustor at elevated pressure // Proc. Combust. Inst. 2019. Vol. 37, No. 4. P. 5421–5428.
2. Lucca-Negro O., O'Doherty T. Vortex breakdown: a review // Prog. Energy Combust. Sci. 2001. Vol. 27, No. 4. P. 431–481.
3. Алексеев С.В., Дулин В.М., Козорезов Ю.С., Маркович Д.М. Влияние внешнего периодического возбуждения на закрученное поднятое пламя // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 6. С. 71–77.
4. Prosser R. Lean combustion: technology and control // Aeronaut. J. 2008. Vol. 112, No. 1131. P. 290–291.
5. Meier W., Weigand P., Duan X., Giezendannerthoben R. Detailed characterization of the dynamics of thermoacoustic pulsations in a lean premixed swirl flame // Combust. Flame. 2007. Vol. 150, No. 1–2. P. 2–26.
6. Blommaert G., Prenat J.E., Avellan F., Boyer A. Active control of Francis turbine operation stability // Proc. 3rd ASMEJSME Jt. Fluids Eng. Conf. 1999. No. 8. P. 3–11.
7. Moeck J.P., Durox D., Schuller T., Candel S. Nonlinear thermoacoustic mode synchronization in annular combustors // Proc. Combust. Inst. 2019. Vol. 37, No. 4. P. 5343–5350.
8. Litvinov I., Gorelikov E., Shtork S. Frequency response of the flow in a radial swirler // J. Mech. Sci. Technol. 2022. Vol. 36, No. 5. P. 2397–2402.
9. Бильский А.В., Гобызов О.А., Маркович Д.М. История и тенденции развития метода анемометрии по изображениям частиц для аэродинамического эксперимента (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 1. С. 1–24.
10. Sirovich L. Turbulence and the dynamics of coherent structures. I. Coherent structures // Quart. Appl. Math. 1987. Vol. 3, No. 45. P. 561–571.
11. Stöhr M., Sadanandan R., Meier W. Phase-resolved characterization of vortex–flame interaction in a turbulent swirl flame // Exp. Fluids. 2011. Vol. 51, No. 4. P. 1153–1167.
12. Chen Q., Zhong Q., Qi M., Wang X. Comparison of vortex identification criteria for planar velocity fields in wall turbulence // Phys. Fluids. 2015. Vol. 27, No. 8. P. 085101-1–085101-14.
13. Lückhoff F., Sieber M., Paschereit C.O., Oberleithner K. Phase-opposition control of the precessing vortex core in turbulent swirl flames for investigation of mixing and flame stability // J. Eng. Gas Turbines Power. 2019. Vol. 141, No. 11. P. 111008-1–111008-10.
14. Litvinov I.V., Sharaborin D.K., Gorelikov E.U., Suslov D.A., Shtork S.I. Stereo-PIV study of unsteady flow in a laboratory air hydro turbine model over a wide range of operating regimes // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 774, No. 1. P. 012044-1–012044-8.
15. Cala C.E., Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I. Coherent structures in unsteady swirling jet flow // Exp. Fluids. 2006. Vol. 40, No. 2. P. 267–276.

Статья поступила в редакцию 4 июля 2022 г.,
после доработки — 13 июля 2022 г.,
принята к публикации 2 сентября 2022 г.