

03

О формировании когерентных винтовых структур в закрученной струе

© С.И. Шторк, К.Э. Кала, Э.К. Фернандес, М.В. Хейтор

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

E-mail: kuibin@itp.nsc.ru

Лаборатория термогазодинамики, горения и энергетических систем,

Технический университет Лиссабона, 1049–001 Лиссабон, Португалия

E-mail: mheitor@ist.utl.pt

Поступило в Редакцию 15 марта 2005 г.

Нестационарное течение с вращающимися винтовыми вихревыми нитями, образующимися в зоне распада закрученной струи, было исследовано с помощью фазового осреднения выходного сигнала лазерно-доплеровского анемометра (ЛДА). Для выделения вихрей в измеренном поле течения применялась λ_2 -техника, основанная на анализе тензора градиента скорости. Было впервые обнаружено, что прецессия центрального монополярного вихря сопровождается образованием пары вторичных вихрей с противоположными циркуляциями, которые формируют винтообразную дипольную структуру.

Закрученные струи являются важным объектом изучения с точки зрения практических приложений в связи с широким распространением вихревых горелочных устройств. С другой стороны, в закрученных струях реализуется богатое разнообразие режимов течения и эффектов, представляющих большой научный интерес [1]. Одним из наиболее интригующих таких эффектов является феномен распада вихря, до конца не изученный до настоящего времени. Представленная работа посвящена экспериментальному исследованию структуры течения, реализующегося после распада интенсивно закрученной струи за моделью вихревой горелки. Данные условия характеризуются генерацией мощных регулярных колебаний потока, производимых прецессирующим вихревым ядром (ПВЯ).

Эксперименты проводились с изотермической закрученной струей, истекающей из цилиндрического сопла в неограниченное пространство. Закрутка потока производилась с помощью осесимметричного лопаточного завихрителя. В качестве рабочей среды использовался

атмосферный воздух комнатной температуры (20°C). Режим течения с числом Рейнольдса $Re = dU/\nu = 15\,000$ ($d = 56\text{ mm}$ — диаметр сопла, U — средняя скорость внутри сопла, ν — кинематическая вязкость) и параметром крутки 1.0 был выбран в качестве тестового варианта для детальных измерений скорости. Эти условия соответствуют режиму работы практической камеры сгорания, используемой для опытов с горением [2].

Поля скоростей исследовались с помощью стандартного однокомпонентного ЛДА фирмы „Дантек“ и техники фазового осреднения сигнала скорости. Датчик давления, установленный на выходе из сопла, использовался для генерации опорного сигнала, отслеживающего фазу колебаний. Фазовое осреднение было выполнено в пространственных точках двумерной r - z плоскости (r , z , θ — цилиндрические полярные координаты) для всех трех компонент скорости. Периодические пульсации скорости в измеряемых точках связаны с вращением неосесимметричного поля течения. Соответственно фазовый угол пульсаций использовался в качестве пространственного угла θ (полный цикл колебаний соответствует полному обороту течения в 360°), что позволяло восстановление фазово-осредненной трехмерной структуры закрученного потока внутри объемной цилиндрической области. Для выделения вихрей в измеренном поле течения применялся подход, предложенный в [3] и представляющий собой необходимый и достаточный критерий распознавания вихревого ядра на основе принципа минимума давления, исключая при этом эффекты вязкости и нестационарности течения. Предложенная ими так называемая λ_2 -техника предполагает поиск связанных областей течения с отрицательными значениями λ_2 . λ_2 является вторым собственным значением симметричного тензора $\mathbf{S}^2 + \mathbf{\Omega}^2$. Здесь соответственно \mathbf{S} и $\mathbf{\Omega}$ обозначают симметричную и антисимметричную части тензора градиента скорости $\nabla\mathbf{V}$ (\mathbf{V} — вектор скорости). Поскольку λ_2 вычисляется через производные скорости, эта техника применима к движущимся вихревым объектам.

Фазово-осредненная структура потока за выходом из горелки представлена на рис. 1, *a* с помощью поверхности нулевого уровня λ_2 , ограничивающей области вихревого течения (поле течения вращается в направлении закрутки струи с частотой 75.5 Hz). Два крупных спиральных вихря, вложенных один в другой, обозначены здесь как рециркуляционный вихрь (РВ) и внешний вихрь (ВВ). ВВ определяет смещение горелочной струи на ее внешней границе. РВ формирует приосевую

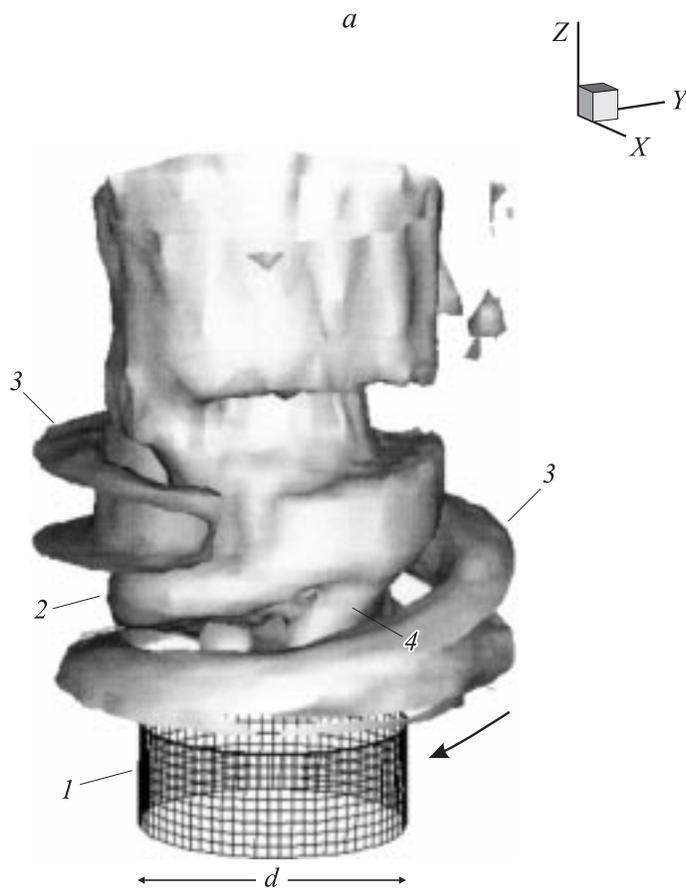


Рис. 1. Трехмерная структура закрученной струи за выходом из сопла (течение снизу вверх). *a* — граница вихревых структур, визуализированная с помощью изоповерхности $\lambda_2 = 0$. *1* — выходная часть сопла, *2* — РВ, *3* — ВВ (часть ВВ находится за пределами визуализированной области, поэтому его граница на диаграмме не замкнута), *4* — ПВЯ. Стрелкой обозначено направление закрутки потока. *b* — поля скоростей и изолинии λ_2 в вертикальном сечении. Уровни λ_2 даны в единицах $(d/U)^{-2}$. *c* — то же в горизонтальном сечении.

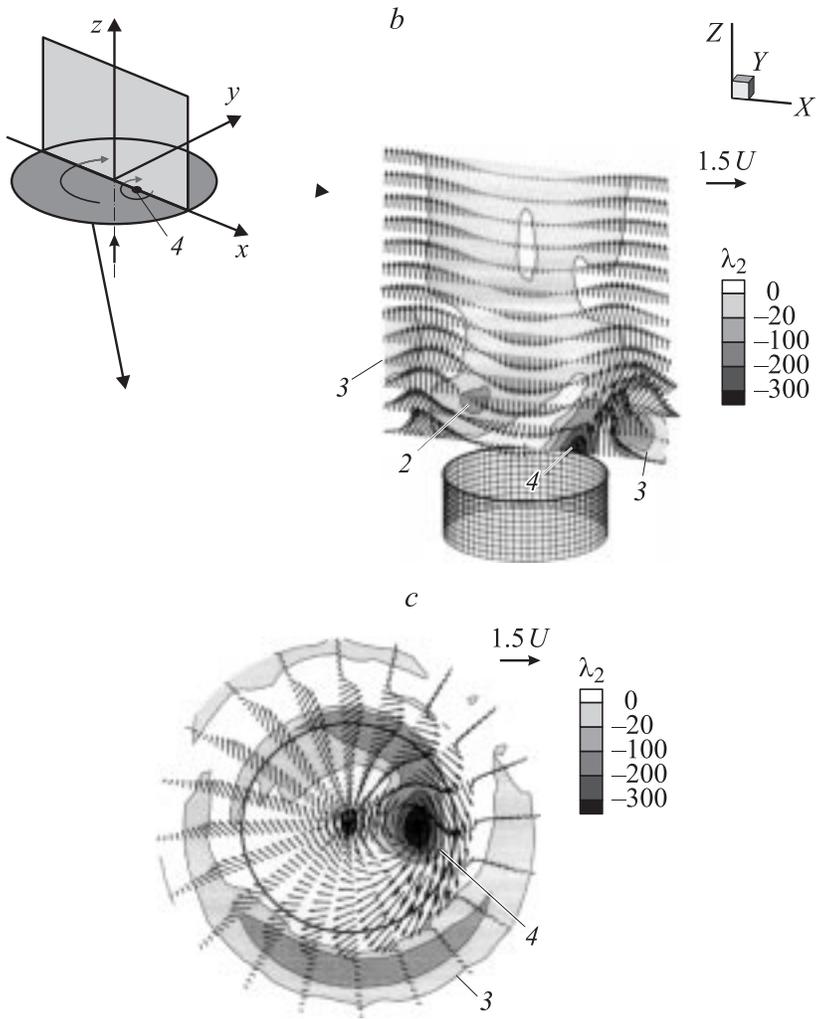


Рис. 1 (продолжение).

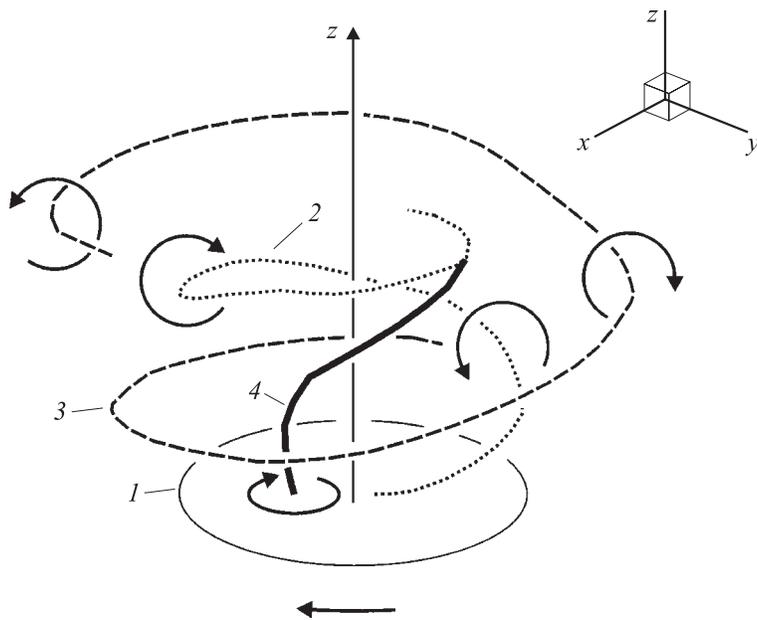


Рис. 2. Семейство крупномасштабных вихрей, выявленных в поле течения. Обозначения как на рис. 1.

зону возвратного течения, обеспечивающую стабилизацию пламени. Показанные вихри являются вторичными структурами, образующимися при распаде закрученной струи после выхода из сопла. Основное ПВЯ, образующееся внутри горелки, практически скрыто на этой диаграмме, но видно в поперечном и продольном сечениях, показанных на рис. 1, *b* и *c* вместе с полями векторов. Можно видеть, что продольное сечение пересекает вторичные вихри почти перпендикулярно, а ПВЯ — вдоль оси. Вблизи выхода из горелки интенсивность ПВЯ в несколько раз превышает интенсивность вторичных вихрей, как можно судить по величине λ_2 (более низкие отрицательные значения λ_2 соответствуют более выраженному минимуму давления, образующегося в ядре вихря).

На рис. 2 показаны восстановленные оси всех трех вихрей, образующихся в исследуемом течении. Стрелки обозначают знаки вихрей,

определенные на основе векторов скоростей. Конфигурация вихрей указывает на то, что все вихри левовинтовые, т.е. завиты в направлении, противоположном направлению вращения потока. Что касается внутренних вихрей РВ и ПВЯ, это является необходимым условием их сопряжения с приосевой зоной возвратного течения [4]. В свою очередь, геометрия внешнего вихря задается, по всей видимости, конфигурацией РВ и ПВЯ. Взаимодействие между внутренним вторичным вихрем и ПВЯ фактически приводит к поглощению последнего, с предшествующим радикальным уменьшением его интенсивности. Таким образом, ПВЯ существует на дистанции менее $0.5-0.6d$ от среза сопла, тогда как вторичные вихри могут быть прослежены вплоть до расстояний порядка $1.5d$.

Весьма интересной особенностью морфологии течения является то, что вторичные винтовые вихри с циркуляциями разного знака образуют систему с локально-параллельными вихревыми трубками. Данная конфигурация вихрей носит явно дипольный характер, подобно структурам, исследованным в теоретической работе [5]. В общем случае диполь, составленный из двух точечных вихрей на плоскости, создает линейный момент, перемещающий его в пространстве. Направление перемещения определяется знаками вихрей, и для конфигурации, изображенной на рис. 2, момент диполя направлен вниз по потоку. Этот эффект, очевидно, способствует тому, что вторичные вихри РВ и ВВ, образующие диполь, распространяются на более дальние расстояния от среза сопла, чем монополярный ПВЯ. Заметим, что обнаруженная дипольная структура явно отличается от ранее открытой двойной спирали, сформированной из пары правовинтовых вихрей одного знака [6].

Физический механизм образования внутреннего и внешнего вторичных вихрей в данном случае подобен тому, который был продемонстрирован на основе численного моделирования распада закрученной струи [1]. Этими авторами было показано, что коническая форма струи в зоне распада приводит к образованию внутреннего и внешнего сдвиговых слоев, имеющих азимутальную завихренность разного знака. Далее, вследствие неустойчивости, происходит сворачивание этих слоев с образованием крупномасштабных вихрей с противоположными циркуляциями. Последующая эволюция вихрей в дипольную структуру является отражением фундаментального свойства набора вихревых трубок ориентировать самих себя антипараллельно, как было подтверждено, например, в численных расчетах изотропной турбулентности [7].

Следует отметить, что в эксперименте ранее не наблюдались винтообразные вихревые структуры дипольного типа, когда существуют вместе две сопряженных винтовых нити противоположных циркуляций, которые индуцируют вращение жидкости в разные стороны вокруг себя. Данные структуры могут быть удобным объектом для экспериментальной проверки теоретических моделей винтового диполя, развиваемых в настоящее время [5]. Практическое значение работы определяется тем, что вторичные вихри играют существенную роль в динамике закрученной горелочной струи, участвуя в интенсификации процессов смещения и способствуя стабилизации горения и уменьшению длины факела.

Работа выполнена при поддержке Научно-технического фонда Португалии (грант N SFRH/BPD/1641/2000).

Авторы выражают благодарность В.Л. Окулову за полезные комментарии по поводу данной работы.

Список литературы

- [1] *Kollmann W., Ooi A.S.H., Chong M.S. et al. // Journal of Turbulence. 2001. V. 2–005.*
- [2] *Anacleto P.M., Fernandes E.C., Heitor M.V. et al. // Combustion Science and Technology. 2003. V. 175. N 8. P. 1369–1388.*
- [3] *Jeong J., Hussain F. // J. Fluid Mech. 1995. V. 285. P. 69–94.*
- [4] *Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L. et al. // J. Fluid Mech. 1999. V. 382. P. 195–243.*
- [5] *Окулов В.Л., Фукумото Я. // ДАН. 2004. Т. 399. № 1. С. 56–61.*
- [6] *Алексеенко С.В., Шторк С.И. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 59. В. 11. С. 746–750.*
- [7] *Goto S., Kida S. // Fluid Dynamics Research. 2003. V. 33. P. 403–431.*