

УДК 532.517.4, 532.525.2, 532.574.7

Трехмерные когерентные структуры в закрученной струе с распадом вихря*

С.В. Алексеенко^{1,2,3}, В.М. Дулин^{1,2}, М.П. Токарев^{1,2}, Д.М. Маркович^{1,2,3}

¹Новосибирский государственный университет

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

³Томский политехнический университет

E-mail: vmd@itp.nsc.ru

В работе экспериментально исследована когерентная структура пульсаций скорости закрученной струи с распадом вихревого ядра. В результате измерений ансамбля трехмерных полей мгновенной скорости методом tomographic particle image velocimetry (tomographic PIV) и анализа методом proper orthogonal decomposition (POD) обнаружена интенсивная когерентная составляющая, соответствующая структуре струи из вихревого ядра и двух вторичных спиральных вихрей. Установлено, что динамика когерентной структуры соответствует её вращению вокруг оси струи в направлении закрутки потока и может быть описана уравнением бегущей волны: $\text{Re}[A(y, r) \cdot e^{i(m\theta + ky - \omega t)}]$ с номером спиральной моды $m = +1$ для положительно определенных k и ω .

Ключевые слова: закрученная струя, распад вихревого ядра, когерентная мода, tomographic PIV, POD.

Актуальность исследований закрученных течений обусловлена их частой реализацией в технических устройствах. Камеры сгорания являются ярким примером: наличие приосевой зоны возвратных токов в закрученном течении способствует стабилизации пламени. В литературе представлено большое количество работ по экспериментальному исследованию структуры закрученных струй и условий распада вихревого ядра при формировании центральной зоны рециркуляции.

Так как для больших чисел Рейнольдса возможности визуализации ограничены, выводы о структуре турбулентных течений часто делаются с использованием методики условного осреднения. Основываясь на одновременных измерениях давления и скорости, авторы работы [1] сформулировали концепцию тройной когерентной структуры в сильно закрученной струе с распадом вихревого ядра на спиралевидное прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ) и два вторичных спиральных вихря. С развитием метода PIV стали возможны измерения полей мгновенной скорости, которые подтвердили сосуществование вторичных когерентных структур одновременно с ПВЯ [2].

Трехмерная модификация метода PIV (tomographic PIV, см. [3]), основанная на вычислительной томографии распределений трассерных частиц в объеме, открывает возможность исследования трехмерных когерентных структур без привлечения гипотез о взаимосвязи между фазой осреднения и углом наблюдения структуры. В настоящей работе это выполнялось для турбулентной ($Re = 30000$) закрученной струи с распадом

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 14-29-00203).

вихревого ядра. Детали экспериментального исследования и оценка точности измерений приведены в предыдущей работе [4].

Рабочей жидкостью служила вода с добавленными полиамидными частицами со средним диаметром 20 мкм. Турбулентная струя со среднерасходной скоростью $U_0 = 1,7$ м/с формировалась соплом диаметром $d = 15$ мм, внутри которого был установлен лопаточный завихритель. Число крутки $S = 1,0$ было существенно больше критического значения ($\approx 0,6$) для распада вихревого ядра. На рис. 1 начало системы координат (x, y, z) соответствует центру выходного отверстия сопла. Ось y совпадает с осью струи. Область измерения размером $40 \times 31 \times 40$ мм соответствовала массиву из $54 \times 41 \times 54$ векторов скорости.

Для выделения когерентной составляющей пульсаций скорости (тройной декомпозиции) был использован метод POD [5], в котором ансамбль полей скорости раскладывается по базису ортонормированных пространственных функций $\boldsymbol{\varphi}_n$ с коэффициентами a_n^i .

$$\mathbf{u}_i^*(\mathbf{x}) = \sum_{n=0}^N a_n^i \boldsymbol{\varphi}_n(\mathbf{x}), \text{ где } \langle \boldsymbol{\varphi}_i(\mathbf{x}) \boldsymbol{\varphi}_j(\mathbf{x}) \rangle_{\Omega} = \delta_{ij}. \quad (1)$$

Символом $\langle \cdot \rangle_{\Omega}$ в выражении (1) обозначено осреднение по пространству, δ_{ij} — символ Кронекера. Цель разложения заключается в выборе N мод $\boldsymbol{\varphi}_n$ таких, что первая и каждая последующая моды определяются максимальной степенью коррелированности с исходным ансамблем полей скорости, то есть: $\lambda_i \rightarrow \max (i = 0, \dots, N)$, где λ_i это $\sum (a_n^i)^2$ по всем n . Для потоков с постоянной плотностью значения λ_i соответствуют доле кинетической энергии турбулентности, содержащейся в каждой отдельной моде. Нулевая POD мода $\boldsymbol{\varphi}_0$ соответствует полю средней скорости \mathbf{U} .

POD разложения выполнены для ансамблей трехмерных полей скорости (100 реализаций) и для их двумерных сечений в плоскостях yOx и yOz (200 реализаций). В POD спектрах (рис. 2) как для двумерных, так и для трехмерных данных преобладают две наиболее энергоемкие моды, содержащие 17 и 13 % кинетической энергии турбулентности соответственно. По результатам анализа распределений сделан вывод, что первые две POD моды двумерных распределений (рис. 3a, 3d) соответствуют двум ортогональным сечениям структуры, наблюдаемой также в распределениях первых двух трехмерных мод (для каждой трехмерной моды на рис. 3b, 3c, 3e, 3f показаны два перпендикулярных сечения). Распределения трехмерных POD мод с хорошей точностью отличаются лишь поворотом на 90° .

Метод POD позволяет получить низкоразмерную модель динамики системы при использовании наиболее энергоемких мод. Для течений с интенсивными квазипериодическими пульсациями фазово-осредненная (когерентная) составляющая пульсаций скорости может быть представлена с использованием поля средней скорости и двух первых POD мод (как для трехмерных распределений, так и для двумерных сечений): $\mathbf{U}(\mathbf{x}) + \text{Re}([R_1 \boldsymbol{\varphi}_1(\mathbf{x}) + i R_2 \boldsymbol{\varphi}_2(\mathbf{x})] e^{i\phi})$, где ϕ — фазовый угол, $R_i = (2\lambda_i)^{1/2}$.

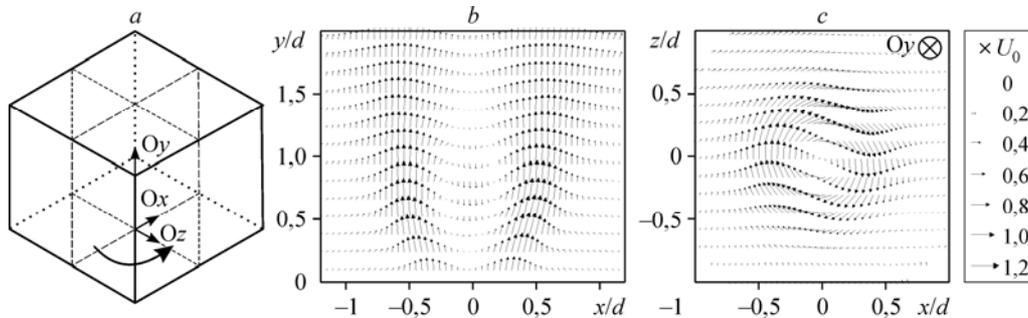


Рис. 1. Трехмерный измерительный объем и двумерные сечения, использованные для POD обработки, система координат и направление закрутки потока (a); сечения $z = 0$ (b) и $y = 0,7d$ (c) трехмерного поля средней скорости в закрученной струе.

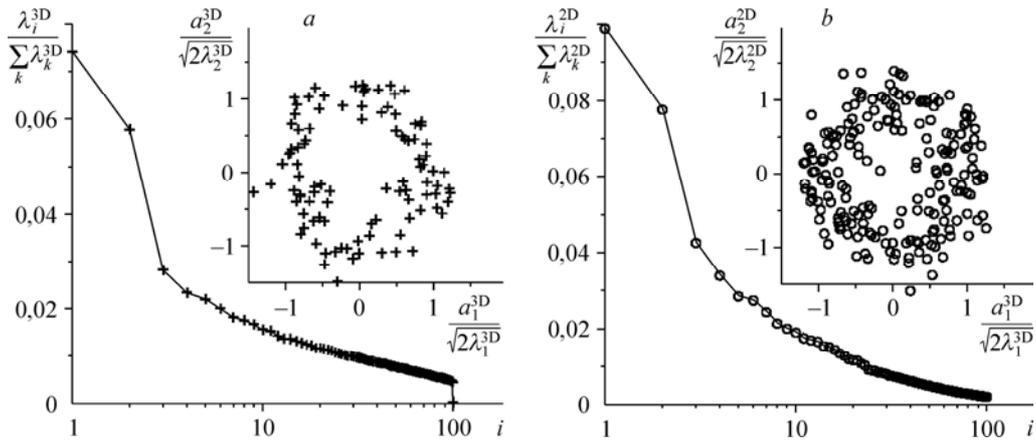


Рис. 2. POD спектр для ансамблей из трехмерных (a) и двумерных (b) полей скорости.

Когерентная составляющая в трехмерных распределениях показана на рис. 4a и 4b для $\phi = 0$ и $-\pi/2$. Поверхность является границей области со значениями $Q = \Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij} > 1,4(U_0/d)^2$ (разница свертков тензоров завихренности и скоростей деформаций, [6]) и визуализирует фазово-осредненное положение крупных вихревых структур. Как уже отмечалось, трехмерные моды отличаются поворотом на 90° (т.е. $d\theta = d\phi$), когда увеличение азимутального угла θ соответствует направлению закрутки потока.

Установлено, что первые две трехмерные POD моды могут быть достаточно точно представлены суперпозицией первых мод двумерного POD: $\text{Re}([R_1\phi_1^{2D} + iR_2\phi_2^{2D}]e^{i(\theta - \phi^*)})$, где фазовый угол ϕ^* когерентных пульсаций в двумерном сечении отличается от ϕ сдвигом. На рис. 4d показаны изоповерхности квадратов аксиальной и азимутальной завихренности (порог соответствует значению Q на рис. 4c). Когерентная структура соответствует трем крупным вихрям: спиралевидному вихревому ядру и двум вторичным спиральным вихрям.

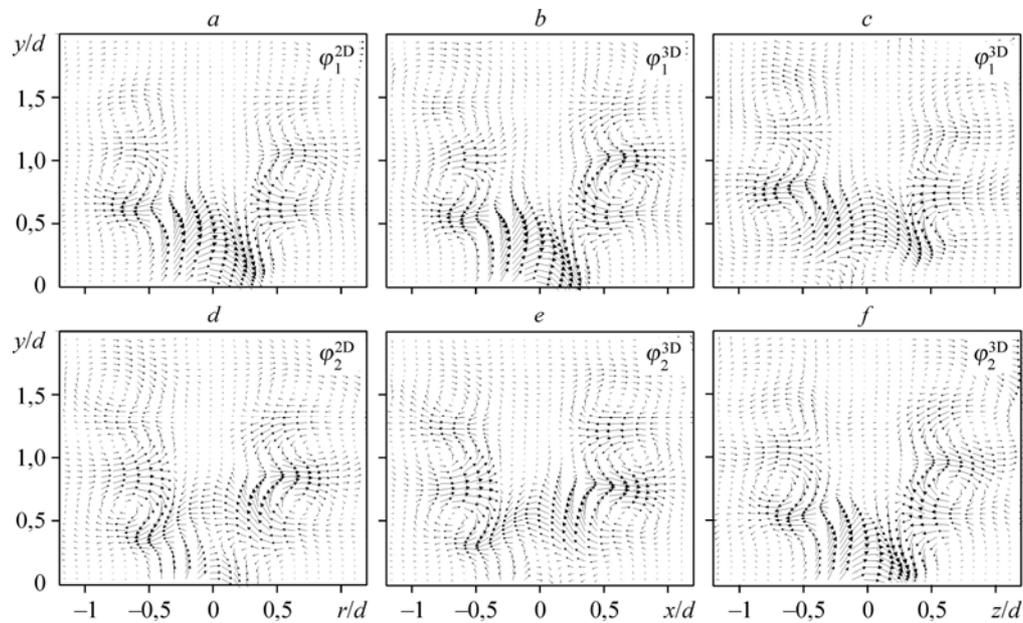


Рис. 3. Распределения первой (a) и второй (d) POD-мод для ансамбля из двумерных сечений ($z = 0$ и $x = 0$) полей мгновенной скорости. Сечения $z = 0$ (b, e) и $x = 0$ (c, f) первой (b, c) и второй (e, f) POD-мод для ансамбля трехмерных полей скорости.

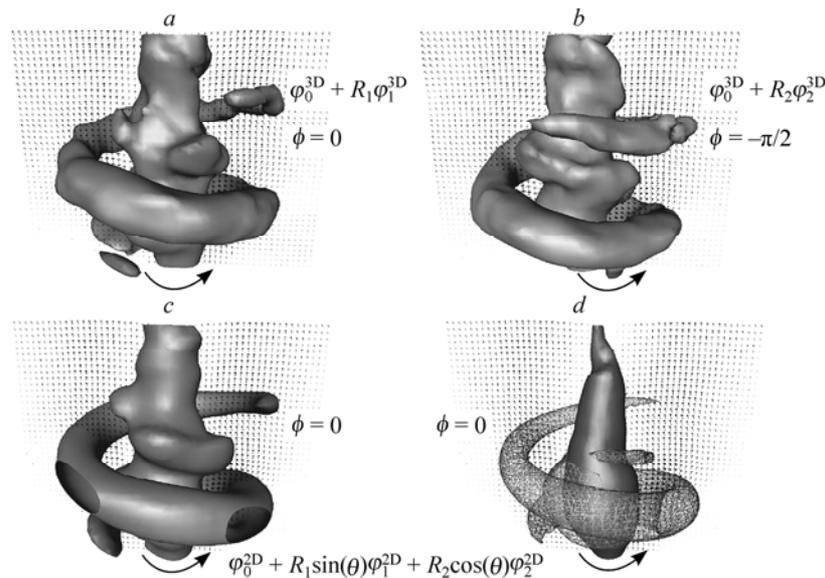


Рис. 4. Низкоразмерное представление когерентной моды в закрученной струе из ансамблей трехмерного (a, b) и двумерного (c, d) полей скорости. Поверхности на (a, b, c) включают значения критерия Q выше определенного порога $Q_{cr} > 0$. Гладкая поверхность и полигональная сетка соответственно визуализируют области, где квадрат аксиальной и азимутальной завихренности больше Q_{cr} .

Один вихрь расположен во внешнем слое смешения, другой опоясывает зону рециркуляции.

Как и в работе [7], увеличение фазового угла $\phi = \omega t$ ($\omega > 0$) соответствует перемещению внешнего вихря в направлении его локальной скорости (т.е. вращению в направлении закрутки потока). Динамика всей когерентной структуры может быть представлена в виде $\text{Re}(A(y, r)e^{i(m\theta + ky - \omega t)})$, где $k \approx 7,6d^{-1}$ — волновое число в направлении y , определяющее осевой шаг спирали, а $m = +1$ — номер спиральной моды. Сделанные выводы по направлению завивки спирали соответствуют данным, полученным в работе [8].

Список литературы

1. Cala C.E., Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I. Coherent structures in-unsteady swirling jet flow // Exp. Fluids. 2006. Vol. 40. P. 267–276.
2. Oberleithner K., Sieber M., Nayeri C.N., Paschereit C.O., Petz C., Hege H.-C., Noack B.R., Wygnanski I. Three-dimensional coherent structures in a swirling jet undergoing vortex breakdown: stability analysis and empirical mode construction // J. Fluid Mech. 2011. Vol. 679. P. 383–414.
3. Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice // Meas. Sci. Technol. 2013. Vol. 24. P. 012001–1–012001–28.
4. Alekseenko M.V., Bilsky A.V., Dulín V.M., Kozinkin L.A., Markovich D.M., Tokarev M.P. Diagnostics of jet flows by using tomographic particle image velocimetry // Optoelectr., Instrum. Data Processing. 2014. Vol. 50, No. 5. P. 457–465.
5. Lumley J.L. The structure of inhomogeneous turbulent flow // Atmospheric Turbulence and Radio Wave Propagation / Ed. A.M. Yaglom, V.I. Tatarski 1967. P. 166–178.
6. Hunt J.C.R., Wray A.A., Moin P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. // In Proc. 1988 Summer Program of the Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford University. P. 193–207.
7. Alekseenko S.V., Dulín V.M., Kozorezov Yu.S., Markovich D.M. Effect of high-amplitude forcing on turbulent combustion intensity and vortex core precession in a strongly swirling lifted propane-air flame // Combust. Sci. Technol. 2012. Vol. 184, No. 10–11. P. 1862–1890.
8. Ceglia G., Discetti S., Ianiro A., Michaelis D., Astarita T., Cardone G. Three-dimensional organization of the flow structure in a non-reactive model aero engine lean burn injection system // Exp. Therm. Fluid Sci. 2014. Vol. 52. P. 164–173.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2015 г.,
после доработки — 29 сентября 2015 г.