

**С. С. Абдуракипов, В. М. Дулин, Д. М. Маркович**

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: dmark@itp.nsc.ru

## **ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУЕ С РАСПАДОМ И ПРЕЦЕССИЕЙ ВИХРЕВОГО ЯДРА \***

С использованием оптического метода измерения полей скорости Particle Image Velocimetry (PIV) и статистического метода для анализа когерентных структур в турбулентных потоках Proper Orthogonal Decomposition (POD) проведено экспериментальное исследование трехмерной пространственной структуры крупномасштабных вихрей в сильно закрученной турбулентной струе.

*Ключевые слова:* турбулентная закрученная струя, прецессирующее вихревое ядро, крупномасштабные вихри, particle image velocimetry, proper orthogonal decomposition.

Турбулентные струйные течения часто встречаются в различных технических приложениях: в водо-, газо-, нефтепроводах, в камерах сгорания, в ракетных и газотурбинных двигателях, при сжигании попутного газа и т. д. Формирование крупномасштабных вихревых структур, свойственное турбулентным течениям, интенсифицирует процессы тепло- и массообмена, поэтому разработка способов управления этим процессом актуальна как для фундаментальных исследований, так и для практического применения. Общеизвестно, что при достижении критического значения закрутки потока в струе происходит распад вихревого ядра и формирование зоны рециркуляции. Этот режим течения характеризуется доминированием интенсивных спиральных вихрей [1].

Как следствие, закрутка часто используется для стабилизации пламен предварительно перемешанной смеси, так как интенсивные турбулентные флуктуации, вызванные крупномасштабными спиралевидными вихрями, обеспечивают интенсивный тепло- и массообмен между свежей и сгоревшей смесью в области возвратного течения.

Этот контекст объясняет актуальность исследования пространственной структуры, а также понимания взаимодействующих конкурирующих динамических механизмов, возникающих в закрученных турбулентных потоках и определяющих их эволюцию. Целью данной работы являлось экспериментальное исследование пространственной формы когерентных структур в сильно закрученной струе с использованием совре-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (грант № 11.G34.31.0035 для поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (на 2009–2013 годы).

менных подходов для анализа турбулентных течений Particle Image Velocimetry (PIV) и Proper Orthogonal Decomposition (POD).

POD – наиболее часто применяемый статистический метод анализа пространственной структуры флуктуаций скорости в турбулентных потоках. Подробно основы этой процедуры изложены в работах [2; 3]. Метод основывается на представлении полей мгновенной скорости  $u(x, t_i)$  в виде конечно-го ряда пространственных ортонормированных базисных функций  $\varphi_n(x)$  с зависящими от времени коэффициентами  $a_n(t)$ :

$$u(x, t_i) = \sum_{n=1}^N a_n(t_i) \varphi_n(x); \quad (1)$$

$$\langle \varphi_n(x), \varphi_m(x) \rangle_{\Omega} = \delta_{mn}.$$

Используя алгоритм кадрового POD (snapshot POD [2]), можно представить базисные функции  $\varphi_n(x)$  в виде следующей суммы самих полей мгновенной скорости с коэффициентами  $A_k^n$ :

$$\varphi_n(x) = \sum_{k=1}^N A_k^n u(x, t_k)$$

Вариационная задача для нахождения оптимального ортонормированного базиса (1) сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма второго рода:

$$\int_{\Omega} K(x, x') \varphi(x') dx' = \lambda \varphi(x) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left[ \int u(x, t_n) u(x, t_m) dx \right] A_m^i = \lambda_i A_n^i, \quad (2)$$

где ядро интегрального оператора  $K(x, x')$  – это кросскорреляционная функция полей мгновенной скорости. Решение спектральной задачи (2) позволяет вычислить  $N$  собственных векторов  $A_n^i$  и соответствующих собственных значений  $\lambda_i$  для нахождения базисных функций  $\varphi_n(x)$ . В силу симметрии кросскорреляционной матрицы все  $\lambda_i \geq 0$ . Кроме того,  $\varphi_n(x)$  можно упорядочить согласно величине  $\lambda_i$ :  $\lambda_{i-1} \geq \lambda_i \geq 0$  ( $i = 2, \dots, N$ ). Применение метода к ансамблю полей мгновенной скорости позволяет получить конечный набор собственных значений  $\lambda_i$  и пространственных базисных функций  $\varphi_n(x)$ , соответствующих пульсациям скорости, вносящим наибольший вклад в кинетическую энергию турбулентности (КЭТ) потока [2; 3], и таким образом значительно сократить размерность исходных данных. При этом вклад POD моды в КЭТ определяется соответствующим собственным значением

$\lambda_i$  [2; 3], а наиболее энергоемкие пульсации могут быть определены через временные коэффициенты  $a_n(t)$  для главных мод. Обычно первые POD моды связаны с крупномасштабными вихревыми структурами в потоке. Из литературы известно, что если пульсации в турбулентном потоке соответствуют квазипериодичной динамике вихревых структур, то эти структуры будут обязательно отражены в первых двух POD модах [4]. В таком случае мгновенное поле скорости  $u(x, t_i)$  может быть удовлетворительно восстановлено на основе поля средней скорости  $U$  и только этих мод  $\varphi_n(x)$ , взятых с временными коэффициентами  $a_i(t)$ :  $u^*(x, t_i) = U + a_1 \varphi_1 + a_2 \varphi_2$ , где  $u^*(x, t_i)$  – низкоразмерное представление поля мгновенной скорости  $u(x, t_i)$ . Чем больше энергия квазипериодичных вихревых структур, тем точнее  $u^*(x, t_i)$  будет представлять поля скорости.

В данной работе был использован бесконтактный метод PIV в стереоскопической конфигурации [5] для измерения полей мгновенной скорости потока в сильно закрученной струе с распадом и прецессией вихревого ядра. Сопло диаметром  $d = 15$  мм организовывало сильно закрученную струю с выраженным распадом вихревого ядра и зоной рециркуляции в форме «пузыря». Число крутки потока определялось по геометрии завихрителя  $S = 1,0$ ; среднерасходная скорость потока  $U_0$  составляла 0,52 м/с; число Рейнольдса  $Re = 8\,900$ . Детали эксперимента, алгоритмы расчета полей скорости и структура потока описаны в работе [6]. Для исследования пространственной структуры крупномасштабных вихрей в настоящей работе к ансамблю из 1 000 полей скорости был применен кадровый POD метод, описанный выше.

На рис. 1, а представлен нормированный на полную КЭТ спектр собственных значений POD мод, демонстрирующий, что первые две главные POD моды вносят наибольший вклад в интенсивность турбулентных пульсаций сильно закрученной турбулентной струи. Как можно видеть, первые две POD моды содержат  $9,2 + 8,4 = 17,6$  % КЭТ. Согласно рис. 1, б, коэффициенты корреляции  $a_1$  и  $a_2$  двух главных мод с полями мгновенной скорости (или временные коэффициенты) не являются независимыми и расположены вокруг кольца  $\langle a_1^2 + a_2^2 \rangle = R^2$ , средний радиус которого

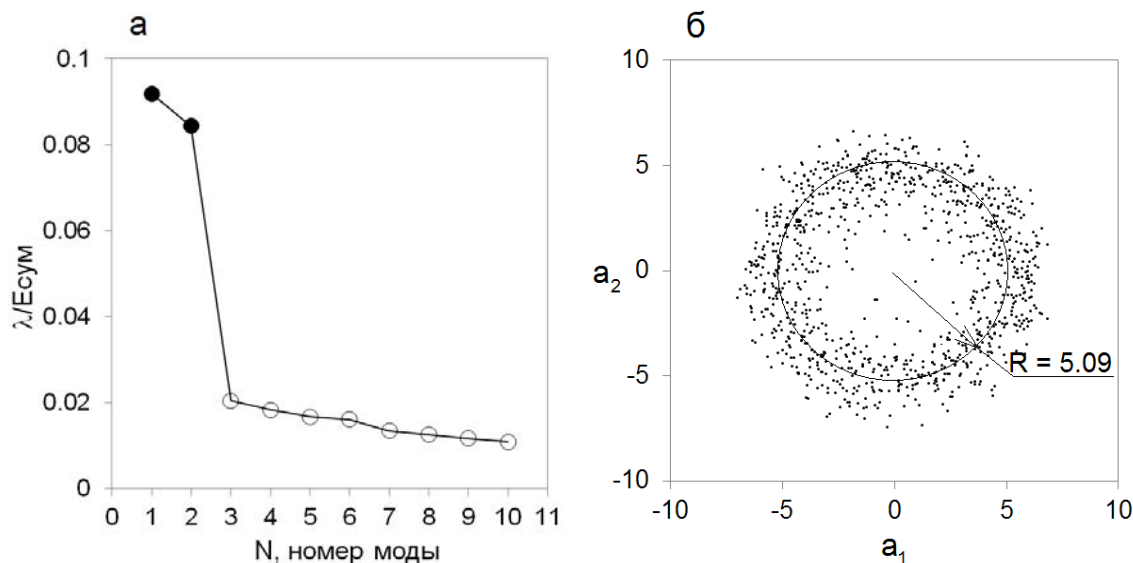


Рис. 1. Спектр собственных значений десяти наиболее энергоемких POD мод (а) и значения временных коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  двух главных мод POD для сильно закрученной турбулентной струи с распадом вихревого ядра (б)

$R = 5,09$  м/с. На рис. 2, а показана наиболее интенсивная нулевая мода разложения, соответствующая полю средней скорости. Отчетливо видна зона рециркуляции, имеющая форму пузыря. На рис. 2, б можно наблюдать относительно большие флуктуации скорости в радиальном направлении (до 50 % от среднерасходной скорости) вблизи критической точки зоны рециркуляции, вызванные прецессией вихревого ядра закрученной струи. Сравнение поля мгновенной скорости и его низкоразмерного представления  $U + a_1\phi_1$ , построенного на основе первой POD моды  $\phi_1$  и поля средней скорости, показано на рис. 2, в, г (для данного примера временной коэффициент  $a_2$  второй моды был близок к нулю). Пример демонстрирует, что поле средней скорости и главная POD мода соответствуют крупномасштабным пульсациям, связанным с прецессией вихревого ядра струи и вихрям во внешнем слое смещения и внутри зоны рециркуляции, в то время как мелкомасштабные пульсации соответствуют остальным модам. В целом в работе был сделан вывод, что крупномасштабные вихревые структуры на полях мгновенной скорости могут быть представлены линейной комбинацией двух POD мод с суммарным весом  $R$ . Таким образом, в данной работе на основе двух POD мод и поля средней скорости аналогич-

но [7] была восстановлена трехмерная форма когерентных структур в потоке, которая представлена на рис. 3. На изоповерхностях критерия «лямбда-два» [8] идентификации вихревых структур (рис. 3) хорошо различимы вихревое ядро закрученной струи (2), а также внешний (3) и внутренний (4) вторичные спиралевидные вихри. Эти вторичные вихри, соответствующие ненулевой азимутальной завихренности, являются левовинтовыми спиралями, т. е. закручены противоположно направлению интегрального вращения и направлению струи (аналогично результату в работе [10]). Это соответствует тому, что вихревая нить внешней спирали ориентирована перпендикулярно к направлению радиального градиента средней скорости в сдвиговом слое струи. Полученный результат хорошо согласуется с результатами других исследований [9; 10]. В работе [9] пара вторичных спиралевидных структур, вызванная прецессией вихревого ядра, была получена посредством фазового усреднения экспериментальных данных лазерной доплеровской анемометрии от пульсаций давления, измеряемых локальным датчиком вблизи кромки сопла. На основе PIV измерений в сильно закрученной турбулентной струе в работе [10] была получена аналогичная форма спиралевидных когерентных структур, как из POD разложе-

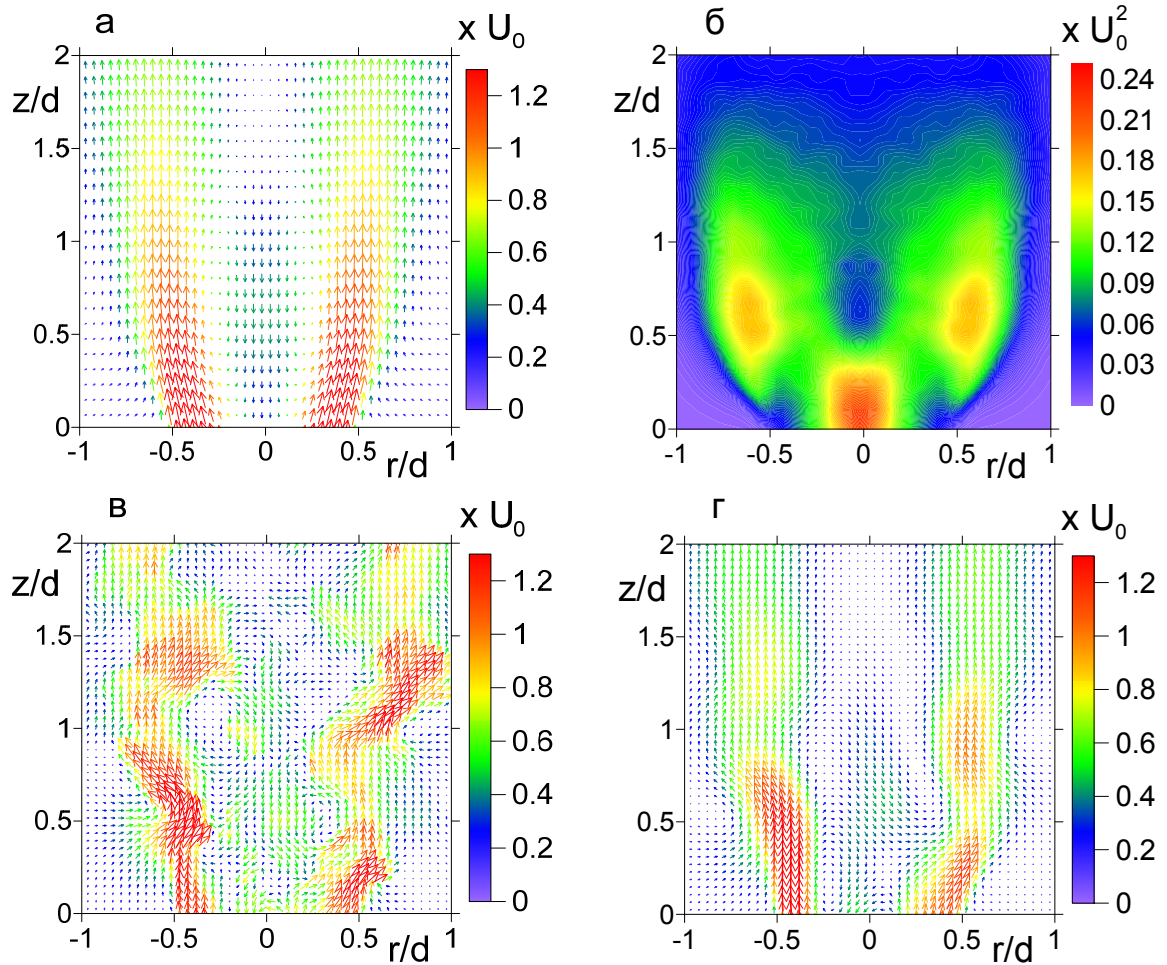


Рис. 2. Поле средней скорости (а) и распределение радиальной компоненты КЭТ (б) в центральном сечении сильно закрученной струи; поле мгновенной скорости (в) и его низкоразмерное представление (г)  $U + a_1\phi_1$ , построенное на основе первой POD моды  $\phi_1$  и поля средней скорости ( $a_2 \approx 0$ )

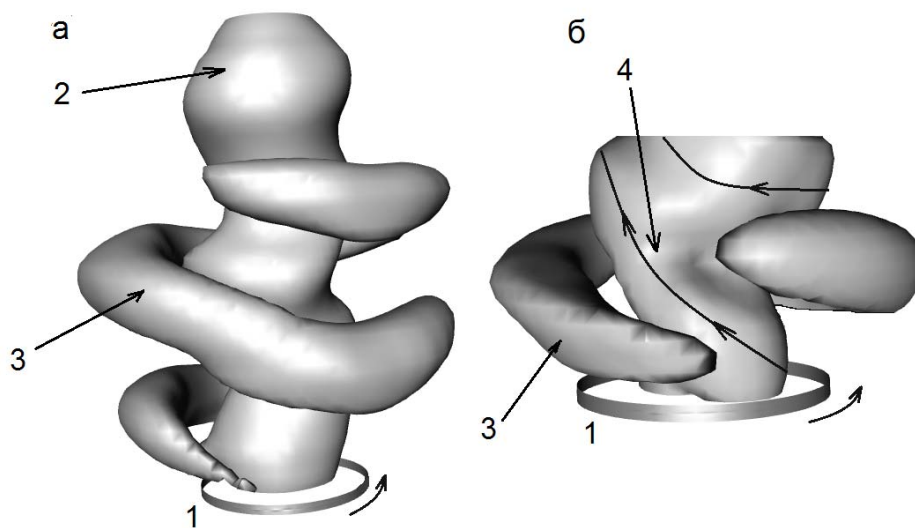


Рис. 3. Пространственная структура крупномасштабных пульсаций в сильно закрученной турбулентной струе с распадом и прецессией вихревого ядра, реконструированная на основе поля средней скорости и двух главных POD мод и визуализированная с использованием критерия «лямбда-два» [8]: а, б – изоповерхности ( $-40\,000$  и  $-70\,000$ ); 1 – кромка сопла; 2 – вихревое ядро закрученной струи; 3, 4 – внешний и внутренний спиральные вихри

ния полей мгновенной скорости, так и из численного анализа моды глобальной неустойчивости для поля средней скорости. Таким образом, результаты PIV измерений свидетельствуют в пользу предположения из работы [11] о том, что прецессия вихревого ядра и организация в потоке двух вторичных спиралей может являться следствием абсолютной неустойчивости течения к первой азимутальной моде даже для изначально осесимметричной зоны рециркуляции.

### Список литературы

1. Liang H., Maxworthy T. An Experimental Investigation of Swirling Jets // J. Fluid Mech. 2005. Vol. 525. P. 115–159.
2. Sirovich L. Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures. Part 1: Coherent structures // Q. Appl. Maths. 1987. Vol. 45. No. 3. P. 561–571.
3. Holmes P., Lumley J. L., Berkooz G. Turbulence, Coherent Structures, Dynamic Systems and Symmetry. Cambridge Univ. Press, 1996. 420 p.
4. Legrand M., Nogueira J., Lecuona A. Flow Temporal Reconstruction from Non-Time-Resolved Data Part 1: Mathematic Fundamentals // Exp. Fluids. 2011. Vol. 51. No. 4. P. 1047–1055.
5. Дулин В. М., Козорезов Ю. С., Маркович Д. М., и др. Исследование газодинамической структуры потока в закрученном турбулентном пламени стереоскопическим методом цифровой трассерной визуализации. // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2009. Т. 4. С. 30–42.
6. Alekseenko S. V., Dulin V. M., Kozorezov Yu. S. et al. Effect of Axisymmetric Forcing on the Structure of a Swirling Turbulent Jet // Int. J. Heat Fluid Flow. 2008. Vol. 29. No. 6. P. 1699–1715.
7. Stohr M., Sadanandan R., Meier W. Phase-Resolved Characterization of Vortex-Flame Interaction in a Turbulent Swirl Flame // Exp. Fluids. 2011. Vol. 51 (4). P. 1153–1167.

8. Jeong J., Hussain F. On the Identification of a Vortex // J. Fluid Mech. 1995. Vol. 285. P. 69–94.

9. Cala C. E., Fernandes E. C., Heitor M. V., Shtork S. I. Coherent Structures in Unsteady Swirling Jet flow // Exp. Fluids. 2005. Vol. 40. No. 2. P. 267–276.

10. Oberleithner K., Sieber M., Nayeri C. N. et al. 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.

11. Ruith M. R., Chen P., Meiburg E. et al. Three-Dimensional Vortex Breakdown in Swirling Jets and Wakes: Direct Numerical Simulation. // J. Fluid Mech. 2003. Vol. 486. P. 331–378.

### Список обозначений

- PIV – Particle Image Velocimetry  
 POD – Proper Orthogonal Decomposition  
 Re – число Рейнольдса  
 КЭТ – кинетическая энергия турбулентности,  $\text{м}^2/\text{с}^2$   
 $a_n$  – коэффициент корреляции  $n$ -й POD моды с полем мгновенной скорости, м/с  
 $d$  – выходной диаметр сопла, м  
 $r$  – поперечная координата (поперек оси струи), м  
 $u$  – поле мгновенной скорости потока, м/с  
 $z$  – продольная координата (вдоль оси струи), м  
 $\varphi_n$  –  $n$ -я POD мода  
 $\lambda_i$  –  $i$ -е собственное значение кросскорреляционной матрицы полей мгновенной скорости,  $\text{м}^2/\text{с}^2$   
 $R$  – степень корреляции двух первых POD мод с ансамблем полей мгновенной скорости, м/с  
 $S$  – степень закрутки  
 $U_0$  – среднерасходная скорость потока, м/с

Материал поступил в редколлегию 09.12.2011

S. S. Abdurakipov, V. M. Dulin, D. M. Markovich

### SPATIAL STRUCTURE OF LARGE-SCALE VORTICES IN A SWIRLING JET WITH BREAKDOWN AND PRECESSION OF THE VORTEX CORE

An experimental study of 3D spatial structure of large-scale vortices in a strongly swirling turbulent jet was performed by using Particle Image Velocimetry (PIV) method and Proper Orthogonal Decomposition (POD) analysis.

**Keywords:** turbulent swirling jet, precessing vortex core, large-scale vortices, Particle Image Velocimetry, Proper Orthogonal Decomposition.