

УДК 532.5.032, 532.582.31, 532.542

Трехмерная структура потока в ближнем следе за цилиндром в щелевом канале*

М.В. Шестаков, Д.М. Маркович

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

E-mail: maximvsh@gmail.com

С использованием томографического PIV-метода выполнено экспериментальное исследование трехмерной структуры течения в ближнем поле следа за цилиндром, расположенном в щелевом канале. Впервые на основании прямых измерений объемных трехкомпонентных распределений скорости представлена осредненная структура течения в следе за цилиндром для отношения высоты цилиндра к диаметру 0,4 и числа Рейнольдса $Re_D = 3500$. Показано, что подковообразные вихри, образующиеся перед цилиндром, существенно влияют на структуру течения. Обнаружено, что в ближнем следе формируется два квадрупольных распределения средней продольной завихренности.

Ключевые слова: обтекание цилиндра, щелевой канал, трехмерная структура потока, продольные вихревые структуры, томографический PIV-метод.

Введение

Обтекание цилиндра, ограниченного с двух сторон плоскими стенками, реализуется во многих технических приложениях, и изучение течений в подобных конфигурациях имеет важное практическое значение. Несмотря на квазидвумерную геометрию, течение в подобных конфигурациях обладает трехмерной структурой и сопровождается формированием сложных когерентных вихревых систем, взаимодействующих с ограничивающими стенками. Известно, что основной особенностью обтекания ограниченных цилиндров является система подковообразных вихрей, образующихся в области сопряжения цилиндр – стенка [1–5]. Эти подковообразные вихри значительно увеличивают коэффициент теплообмена в окрестности передней части цилиндра, а также в слоях смешения за счет ориентированных по потоку «ножек» подковообразных вихрей [6, 7]. В последнее время в связи с развитием микрофлюидики и биомикрофлюидики, а также с необходимостью оптимизации систем охлаждения электроники и аэродинамических поверхностей лопаток газовых турбин системы с соотношением высоты цилиндра к диаметру $h/D < 1$ привлекают все большее внимание исследователей. Гидродинамическая структура течения за цилиндром зависит от соотношения h/D , а также от абсолютного значения h [8–13]. При обтекании цилиндра, размещенного в щелевом канале, вихревая топология существенно отличается от случая больших отношений длины цилиндра к высоте канала, причем не только в окрестности самого цилиндра, но и в его

* Исследование выполнено при финансировании РФФИ (грант № 19-79-30075). Экспериментальное оборудование предоставлено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

следе [8–13]. Рядом авторов было показано, что в таких условиях в следе формируются продольные вихревые структуры, которые могут существенным образом влиять на процессы смешения и тепломассообмена [6–10]. Для определения вклада продольных вихревых структур в эти процессы необходимо иметь представление о пространственном распределении компоненты скорости нормальной к стенке, либо полную информацию о трехмерных трехкомпонентных распределениях скорости. На сегодняшний день в литературе главным образом представлены работы по численному трехмерному моделированию структуры течения в следе за ограниченным цилиндром с малым соотношением h/D [8–14]. Ввиду технических сложностей, связанных с малостью геометрических размеров исследуемого объекта, экспериментальные данные о структуре течения представлены только визуализацией [2], плоскостными двумерными PIV-данными [3, 7, 10], а также двумерными данными инфракрасной термографии [6], которые не дают полного представления о топологии течения и о мгновенной вихревой структуре следа за цилиндром в ограниченном пространстве. Идентификация трехмерных структур и определение их вклада в локальную конвекцию является основной предпосылкой для выработки подходов для управления интенсивностью теплопередачи. В настоящее время хорошо развитым методом для исследования мгновенной трехмерной структуры потока является томографический PIV (Tomo-PIV, Tomographic Particle Image Velocimetry) метод [15–19].

Цель представленной работы состоит в экспериментальном исследовании трехмерной структуры течения в ближнем следе за цилиндром в щелевом канале с низким соотношением высоты к диаметру с помощью метода Томо-PIV.

Параметры эксперимента и измерительной системы

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Исследования выполнялись на гидродинамическом стенде с рабочим участком, представляющим собой вертикальный щелевой канал шириной 200 мм, длиной 520 мм и высотой $h = 4$ мм. Цилиндр диаметром $D = 10$ мм и высотой, равной высоте канала h , устанавливался в центре щелевого канала. Натекающий поток имел равномерное распределение продольной скорости. Измерения трехмерных распределений мгновенной скорости проводились за цилиндром в объеме $26 \times 34 \times 3,9$ мм³, обозначенным красной пунктирной линией на рис. 1. Число Рейнольдса $Re = D \cdot U_0 / \nu = 3500$ рассчитывалось по диаметру цилиндра D , среднерасходной скорости U_0 и кинематической вязкости жидкости ν .

Измерения мгновенных трехкомпонентных распределений скорости в исследуемом объеме проводились при помощи Томо-PIV системы «ПОЛИС». Поток засеивался полиамидными трассерами диаметром 20 мкм и плотностью 1,05 кг/л. Проекция исследуемого объема регистрировались четырьмя цифровыми КМОП-камерами PCO.1200 hs с объективами Sigma DG Macro с фокусным расстоянием $f = 50$ мм. Камеры располагались в горизонтальной плоскости на окружности с радиусом 300 мм с центром, совпадающим с центром цилиндра. Углы обзора камер относительно оси цилиндра равнялись $\pm 42^\circ$ и $\pm 18^\circ$. Коррекция Шаймпфлюга не применялась, так как глубина резкости превышала глубину исследуемого объема. Освещение исследуемого объема осуществлялось при помощи сдвоенного Nd:YLF-лазера New wave Pegasus по схеме, указанной на рис. 1. Калибровка оптической системы производилась по пяти изображениям плоской высокоточной калибровочной мишени размером 25×25 мм² с диаметром маркеров 1 мм и шагом между ними 1 мм.

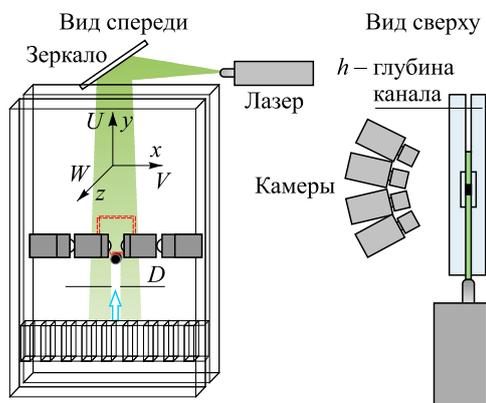


Рис. 1. Схема рабочего участка и расположение измерительной системы.

Процедура калибровки осуществлялась посредством перемещения измерительной системы с точностью 10 мкм. Положения измерительной системы пересчитывались в соответствующие положения мишени внутри измерительного объема. Измерения проводились в двухкадровом режиме, время между кадрами составляло 1,35 мс. В эксперименте было зарегистрировано 1000 пар изображений трассеров для каждой камеры. Реконструкция и обработка объемных распределений трассеров проводились в ПО «ActualFlow». Процедура самокалибровки по изображениям частиц позволила получить среднее значение невязки не более 0,05 пикселя [20]. Томографическая реконструкция объемов проводилась по предобработанным изображениям частиц с помощью SMART-алгоритма [21]. Корреляционный анализ проводился с использованием итерационного многосеточного алгоритма с непрерывным смещением расчетного окна. При расчете скорости было выполнено четыре итерации, по две с разрешением $64 \times 64 \times 32$ и $32 \times 32 \times 16$ вокселей. Пространственное разрешение с учетом 75 % перекрытия на последней итерации составило $0,34 \times 0,34 \times 0,17$ мм³ на один вектор скорости.

Результаты эксперимента

Применение Томо-PIV метода позволило впервые получить трехмерное распределение для каждой компоненты скорости в следе за ограниченным цилиндром с соотношением $h/D = 0,4$ (рис. 2). Объемные распределения нормированных осредненных компонент скорости U , V , W указывают на сложную трехмерную структуру течения,

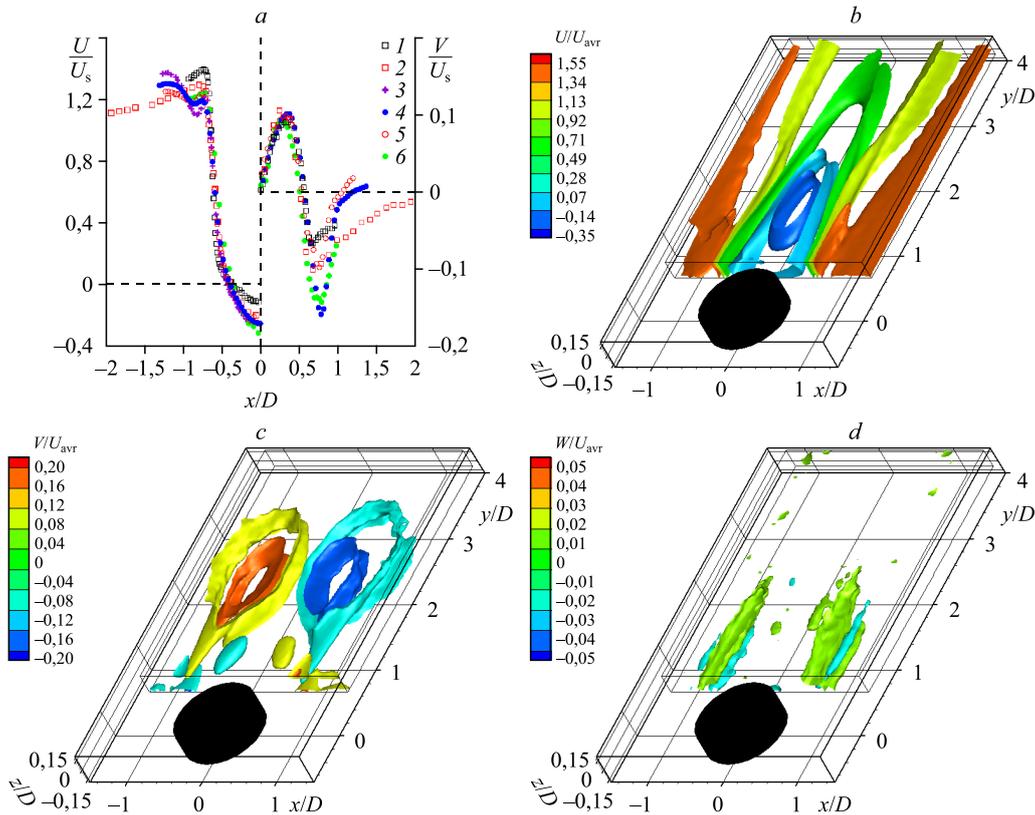


Рис. 2. Профили продольной и поперечной компонент скорости в центральном сечении канала $z/D = 0$ (a), а также изоповерхности объемных распределений продольной компоненты скорости $U/U_{avr} = -0,1, 0, 0,6, 1,2, 1,5$ (b), поперечной компоненты скорости $V/U_{avr} = \pm 0,2, \pm 0,1$ (c), нормальной компоненты скорости $W/U_{avr} = \pm 0,025$ (d).
 a: 1 — PIV, $y = 1,06d$, $Re = 3900$ [22], 2 — DNS, $y = 1,06d$, $Re = 3900$ [23], 3 — LES, $y = 0,95d$, $Re = 3750$ [10], 4 — Томо-PIV, $y = 1,04d$, $Re = 3500$, 5 — PIV, $y = 1,04d$, $Re = 3500$, 6 — PIV_{h.res.}, $y = 1,04d$, $Re = 3750$.

формирующуюся в слоях смешения. На рис. 2а представлено сравнение результатов Томо-PIV метода (синие маркеры) с результатами численного моделирования LES (Large Eddy Simulation) (фиолетовые маркеры) [10], результатов PIV для двух различных пространственных разрешений для цилиндра в ограниченном пространстве (красные и зеленные маркеры), а также представлены литературные данные по экспериментам (черные маркеры) [22] и прямому численному моделированию (красные квадратные маркеры) для обтекания неограниченного цилиндра [23]. Профили продольной и поперечной скоростей, построенные в центральном сечении, указывают на хорошее совпадение данных, полученных методами Томо-PIV и PIV высокого разрешения. Данные PIV- и LES-моделирования также хорошо отслеживают поведение продольной скорости. Для цилиндра в ограниченном пространстве наблюдается локальное падение продольной скорости в окрестности точки $x/D = \pm 0,85$ в отличие от профилей скорости для случая обтекания неограниченного цилиндра, где подобного минимума не наблюдается. На рис. 2b представлены изоповерхности осредненной нормированной продольной компоненты скорости. Особенностью распределения продольной скорости для ограниченного цилиндра является наличие двух выделенных максимумов, расположенных в плоскости $x/D = \pm 0,7$. Такое распределение скорости обусловлено наличием близкорасположенных интенсивных подковообразных вихревых структур, образующихся в местах сопряжения цилиндра с ограничивающими стенками. Максимумы продольной скорости наблюдаются впервые и, по-видимому, являются характерными для течений, реализующихся при обтекании тел в щелевых каналах с малым отношением высоты канала к характерному размеру обтекаемого тела: $h/D \lesssim 0,4$. Влияние подковообразных вихревых структур в подобных случаях изменяет и распределения поперечной компоненты скорости, что приводит к образованию вблизи стенки течений, направленных противоположно основному потоку в центре канала (рис. 2c). Трехмерные распределения нормальной компоненты осредненной скорости представлены в виде четырех пар продольных структур (синие и желтые) (см. рис. 2d). Эти распределения соответствуют восходящим и опускающимся течениям в слоях смешения в следе.

Анализ объемных распределений всех трех компонент скорости указывает на наличие вторичных течений, формирующихся между ограничивающими стенками. Для идентификации вторичных течений по измеренным трехмерным распределениям скорости были рассчитаны распределения продольной завихренности (рис. 3). Эти распределения

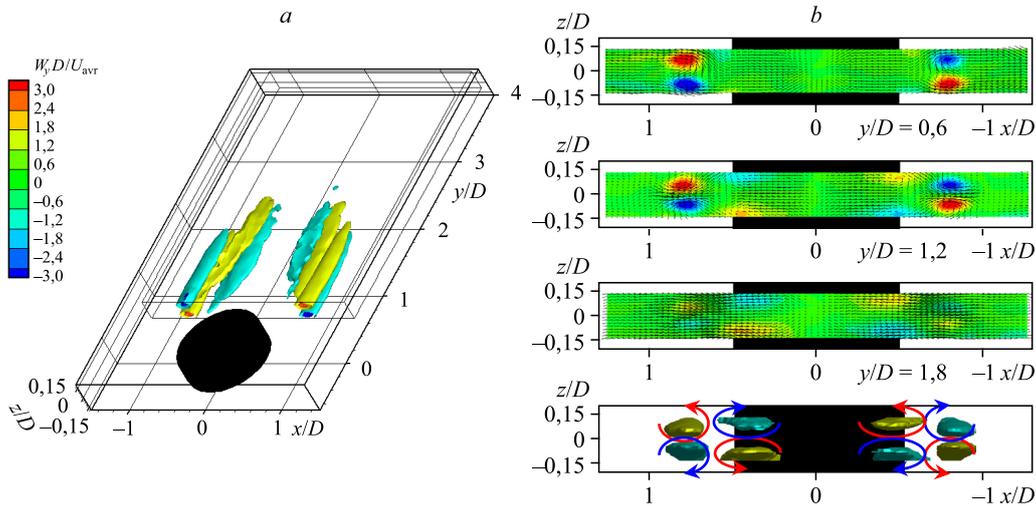


Рис. 3. Распределение продольной завихренности: изометрическое представление (а), фронтальное представление в поперечных сечениях в виде контурных полей завихренности и поперечного поля вектора скорости, а также изоповерхности завихренности с указанием направления вращения (b).

Здесь W_y — продольная компонента завихренности, D — диаметр цилиндра, U_{avr} — среднерасходная скорость.

образуют две квадрупольные системы, которые соответствуют внутренним и внешним вторичным течениям (рис. 3*b*). Анализ последовательных трехмерных мгновенных распределений скорости, измеренных с помощью Томо-PIV с высоким временным разрешением (не приводятся в настоящей статье), показывает, что внутренние вторичные течения формируются за счет появления продольно ориентированных участков в сдвиговых вихревых структурах Кельвина–Гельмгольца вследствие их растяжения основным потоком. При этом внешние вторичные течения с максимумами в точках $x/D = \pm 0,75$ являются результатом наличия в потоке «ножек» концевых участков подковообразных вихревых структур, локализованных вблизи ограничивающих стенок, что подтверждается авторами работ [11, 16–18, 24]. Квадрупольные распределения продольной завихренности характерны для течений при обтекании консольно установленных цилиндров конечной длины [24].

Заключение

Представленная работа посвящена экспериментальному исследованию структуры осреднённого течения в ограниченном следе за цилиндром для соотношения $h/D < 1$. Измерения трехмерных распределений скорости были выполнены при помощи томографического PIV-метода. Уменьшение соотношения h/D приводит к тому, что зарождающиеся в областях сопряжения цилиндра с ограничивающими стенками канала подковообразные вихревые структуры приближаются друг к другу и их влияние на структуру осредненного потока становится значительным. Показано, что при обтекании ограниченного цилиндра с соотношением высоты цилиндра к диаметру 0,4 формируются два квадрупольных распределения продольной завихренности, соответствующие внешним и внутренним вторичным течениям. Внешние обусловлены наличием в потоке двух подковообразных вихревых структур. Внутренние, обнаруженные впервые в данной работе, формируются в результате деформации и растяжения сдвиговых вихревых структур Кельвина–Гельмгольца. Дальнейшие исследования с использованием томографического PIV с высоким пространственным и временным разрешением позволят более детально описать динамику вихревых структур в ограниченных сдвиговых течениях.

Список литературы

1. Simpson R.L. Junction flows // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2001. Vol. 33. P. 415–43.
2. Rodríguez y Domínguez M., Romero-Méndez R., Ramos-Paláu M., Pérez-Gutiérrez F.G. The laminar horseshoe vortex upstream of a short-cylinder confined in a channel formed by a pair of parallel plates // *J. Visualization*. 2006. Vol. 9, No. 3. P. 309–318.
3. Ozturk N.A., Akkoca A., Sahin B. PIV measurements of flow past a confined cylinder // *Exp. Fluids*. 2008. Vol. 44. P. 1001–1014.
4. Escauriaza C., Sotiropoulos F. Reynolds number effects on coherent dynamics of the turbulent horseshoe vortex system // *Flow, Turbulence, and Combustion*. 2011. Vol. 86. P. 231–262.
5. Kirkil G., Constantinescu G. A numerical study of the laminar necklace vortex system and its effect on the wake for a circular cylinder // *Phys. Fluids*. 2012. Vol. 24. P. 073602-1–073602-25.
6. Vintrou S., Bougeard D., Russeil S., Nacereddine R., Harion J.-L. Quantitative infrared investigation of local heat transfer in a circular finned tube heat exchanger assembly // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 2013. Vol. 44. P. 197–207.
7. Simo Tala J.V., Russeil S., Bougeard D., Harion J.-L. Investigation of the flow characteristics in a multirow finned-tube heat exchanger model by means of PIV measurements // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2013. Vol. 50. P. 45–53.
8. Borello D., Hanjalić K. LES of fluid and heat flow over a wall-bounded short cylinder at different inflow conditions // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2011. Vol. 318. P. 042046-1–042046-10.
9. Palkin E., Mullyadzhanov R. Influence of streamwise vortical structures on heat transfer in the far cylinder wake in a slot channel flow // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. Vol. 1359. P. 012011-1–012011-10.
10. Palkin E., Mullyadzhanov R., Shestakov M., Niceno B., Markovich D., Hanjalić K. Secondary currents and heat transfer in flow around a cylinder mounted in a narrow channel: LES and PIV // *THMT-18. Turbulence Heat and Mass Transfer 9. ICHMT Digital library online*. 2018. P. 255–258.
11. Zeng J., Constantinescu G. Flow and coherent structures around circular cylinders in shallow water // *Phys. Fluids*. 2017. Vol. 29. P. 066601-1–066601-23.

12. **Palkin E., Mullyadzhano R.** Vortical structures in a shallow wake of the flow around a confined cylinder at $Re=3750$ // EPJ Web of Conferences 2017. Vol. 159. P. 00034-1–00034-4.
13. **Попова Д.К., Щур Н.А., Смирнов Е.М.** Численное исследование турбулентного обтекания кругового цилиндра, расположенного в щелевом канале // Матер. научн. конф. с международным участием: Неделя науки СПбПУ. СПб.: Политех-пресс, 2019. С. 48–51.
14. **Palkin E., Mullyadzhano R.** Transition to turbulence in confined flow over a cylinder with low aspect ratio // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1382. P. 012027-1–012027-4.
15. **Elsinga G.E., Scarano F., Wieneke B., van Oudheusden B.W.** Tomographic particle image velocimetry // Exp. Fluids. 2006. Vol. 41, No. 6. P. 933–947.
16. **Branson P.M., Ghisalberti M., Ivey G.N., Hopfinger E.J.** Cylinder wakes in shallow oscillatory flow: the coastal island wake problem // J. Fluid Mech. 2019. Vol. 874. P. 158–184.
17. **Zhu H.-Y., Wang C.-Y., Wang H.-P., Wang J.-J.** Tomographic PIV investigation on 3D wake structures for flow over a wall-mounted short cylinder // J. Fluid Mech. 2017. Vol. 831. P. 743–778.
18. **Saredi E., Ramesh N.T., Sciacchitano A., Scarano F.** State observer data assimilation for RANS with time-averaged 3D-PIV data // Comput. Fluids. 2021. Vol. 218. P. 104827-1–104827-12.
19. **Алексеев С.В., Дулин В.М., Токарев М.П., Маркович Д.М.** Трехмерные когерентные структуры в закрученной струе с распадом вихря // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 2. С. 311–314.
20. **Wieneke B.** Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry // Exp. Fluids. 2008. Vol. 45. P. 549–456.
21. **Bilsky A.V., Lozhkin V.A., Markovich D.M., Tokarev M.P.** A maximum entropy reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry // Meas. Sci. Tech. 2013. Vol. 24. P. 045301-1–045301-10.
22. **Parnaudeau P., Carlier J., Heitz D., Lamballais E.** Experimental and numerical studies of the flow over a circular cylinder at Reynolds number 3900 // Phys. Fluids. 2008. Vol. 20. P. 085101-1–085101-14.
23. **Ma X., Karamanos G.-S., Karniadakis G.E.** Dynamics and low-dimensionality of a turbulent near wake // J. Fluid Mech. 2000. Vol. 410. P. 29–65.
24. **Bourgeois J.A., Sattari P., Martinuzzi R.J.** Alternating half-loop shedding in the turbulent wake of a finite surface-mounted square cylinder with a thin boundary layer // Phys. Fluids. 2011. Vol. 23. P. 095101-1–095101-15.

*Статья поступила в редакцию 8 октября 2021 г.,
после доработки — 12 октября 2021 г.,
принята к публикации 20 октября 2021 г.*