

УДК 532.542.4, 532.574.7, 532.582.3
DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-5-14

Экспериментальное исследование оптическим и статистическим методами крупномасштабных пульсаций потока при обтекании цилиндра

С. С. Абдуракипов, К. Г. Добросельский

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

Аннотация

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 пространственной структуры крупномасштабных пульсаций скорости при докавитационном и кавитационном обтекании цилиндра при числе Рейнольдса 280 000.

Ключевые слова

кавитационное обтекание цилиндра, крупномасштабные вихри, particle image velocimetry, proper orthogonal decomposition

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-79-30075)

Для цитирования

Абдуракипов С. С., Добросельский К. Г. Экспериментальное исследование оптическим и статистическим методами крупномасштабных пульсаций потока при обтекании цилиндра // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 5–14. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-5-14

Experimental Study by Optical and Statistical Methods of Large-Scale Velocity Fluctuations in the Flow Past a Cylinder

S. S. Abdurakipov, K. G. Dobroselsky

*Institute of Thermal Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

Using an optical method for measuring the velocity fields Particle Image Velocimetry (PIV) and a statistical method for analyzing coherent structures in turbulent flows Proper Orthogonal Decomposition (POD), an experimental study of the spatial structure of large-scale velocity fluctuations in the precavitational and cavitation flow past a circular cylinder with a Reynolds number of 280 000 was carried out.

Keywords

cavitation flow around a cylinder, large-scale vortices, particle image velocimetry, proper orthogonal decomposition

Funding

The research was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 19-79-30075)

For citation

Abdurakipov S. S., Dobroselsky K. G. Experimental Study by Optical and Statistical Methods of Large-Scale Velocity Fluctuations in the Flow Past a Cylinder. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 5–14. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-5-14

Введение

Общеизвестно, что поперечно-обтекаемые цилиндрические поверхности широко распространены в теплообменных, энергетических и теплотехнических устройствах. Входные кромки лопаток турбомашин, крыльев летательных аппаратов, как правило, представляют собой часть цилиндра. Несмотря на простоту геометрии, обтекание круглого цилиндра чрезвычайно сложно и зависит от режима обтекания.

В литературе выделяют как минимум три режима обтекания: докритический (ламинарный пограничный слой), сверхкритический и переходный, или критический (переход к турбулентности в пограничном слое) [1].

Критический диапазон чисел Рейнольдса составляет примерно 150 000–400 000 и характеризуется резким уменьшением коэффициента сопротивления при обтекании цилиндра. Для различных экспериментальных установок характеристики потока в этом диапазоне чувствительны к таким факторам, как уровень турбулентности и геометрия модели, включая блокировку рабочего канала, отношение длины к диаметру и возможную шероховатость поверхности, которая может нарушить пограничные слои перед отрывом [2]. Отличительной чертой данного диапазона течений является присутствие крупномасштабных вихревых структур, которые играют значительную роль в процессах тепло- и массопереноса, поэтому их изучение имеет теоретическую и практическую значимость.

При обтекании цилиндра в результате глобальной неустойчивости потока образуются вихри Кармана и продольные вихри, которые возникают в результате вторичной неустойчивости [3], также в литературе описаны мелкомасштабные вихри Кельвина – Гельмгольца, формирующиеся в результате роста конвективной неустойчивости в сдвиговом слое [4].

Характеристики крупномасштабных пульсаций скорости в вихревой зоне за телами важны для проектирования размещения как одиночных, так и групп обтекаемых элементов в гидравлических и теплотехнических конструкциях. Анализ литературы показывает, что практически отсутствуют экспериментальные исследования кавитационного обтекания цилиндров. Кавитация представляет собой неблагоприятное явление для многих конструкций, поэтому необходимо знать границы параметров, условия возникновения и степень влияния. Получение детальной экспериментальной информации также важно для построения и верификации математических моделей, описывающих возникновение и развитие кавитации.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование и сравнение характеристик крупномасштабных пульсаций скорости при докавитационном и кавитационном обтекании цилиндра при большом числе Рейнольдса 280 000 с использованием современных подходов для анализа турбулентных течений – PIV и POD.

Описание эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований использовалась гидродинамическая труба замкнутого типа [5]. Рабочая часть экспериментальной установки состоит из теплообменника, хонейкомба, конфузора длиной 580 мм, выполненного по профилю полинома четвертого порядка, имеющего степень поджатия потока 13,3, рабочего участка, диффузора. Труба позволяет проводить исследования по обтеканию различных моделей как в бескавитационном, так и в кавитационном режимах.

Для измерений полей скорости использовалась PIV-система, состоящая из программируемого синхронизирующего процессора; ПЗС-камеры (2048×2048 пикселей, 8 бит), оснащенной объективом SIGMA 50 mm 1:2.8 DG MACRO; двойного твердотельного импульсного Nd:YAG лазера (длина волны 532 нм, энергия в импульсе 25 мДж, длительность импульса 10 нс, частота повторения импульсов 1,3 Гц) с фокусирующей и цилиндрической линзами для создания лазерного ножа.

На рис. 1 показан рабочий участок и основные элементы измерительной системы. Рабочий участок имеет длину 1 000 мм с поперечным сечением $150 \times 80 \text{ мм}^2$, в центральной части которого перпендикулярно боковым стенкам установлен круглый цилиндр. Цилиндр обте-

кался потоком воды с постоянным объемным расходом, который измерялся с помощью ультразвукового расходомера. Использовалась фильтрованная водопроводная вода. Массовая концентрация воздуха в воде составляла примерно 0,025 мг/кг. Во время экспериментов использовались полиамидные трассеры средним размером 50 мкм и концентрацией около 13 мг/кг. Время между двумя импульсами лазера составляло 150 мкс, что позволило исследовать течение в вихревой зоне за цилиндром.

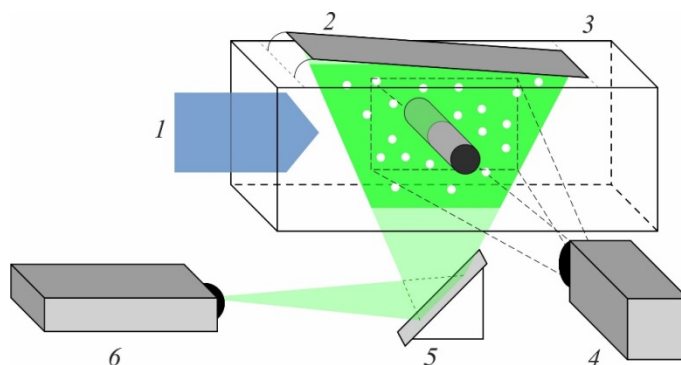


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – набегающий поток; 2 – зеркало; 3 – измерительная область;
4 – камера; 5 – зеркало; 6 – лазер. Белые точки – трассеры

Fig. 1. Experimental setup:
1 – incoming flow; 2 – mirror; 3 – measuring area;
4 – camera; 5 – mirror; 6 – laser. White points – tracers

Измерительная система управлялась синхронизирующим процессором и компьютером с программным обеспечением ActualFlow [6]. Размер измерительной области составлял примерно 125×125 мм. Поля мгновенной скорости рассчитывались с помощью итерационного кросскорреляционного алгоритма с непрерывным смещением и деформацией элементарных расчетных ячеек и 75 % перекрытием расчетных областей. Обработка полученных данных PIV проводилась по методике [7]. Детали эксперимента и методики измерений приведены в [8].

Для исследования полей скорости использовался гладкий ($R_a \approx 1,0$ мкм) круглый стальной цилиндр диаметром $d = 0,026$ м в поперечном потоке с числом $Re \approx 2,8 \cdot 10^5$. Температура потока $t \approx 25^\circ\text{C}$, статическое давление перед цилиндром составляло 161 и 112 кПа для докавитационного и кавитационного режимов соответственно. Среднерасходная скорость потока составляла $U_0 = 8,8$ м/с, пограничный слой на стенках канала – порядка 10 мм, уровень турбулентных пульсаций в свободном потоке – около 1 %.

Описание метода анализа POD

В основе POD [9] лежит задача нахождения оптимального базиса размерностью N , который наилучшим образом приближает ансамбль полей пульсаций скорости по методу наименьших квадратов. С применением POD-разложения ансамбль полей пульсаций скорости представляется в виде конечного ряда пространственных ортонормированных базисных функций с соответствующими корреляционными коэффициентами $a_n(t)$ [9]:

$$\tilde{u}(\mathbf{x}, t_i) = \sum_{n=1}^N a_n(t_i) \varphi_n(\mathbf{x}).$$

При этом собственные функции и корреляционные коэффициенты должны удовлетворять следующим условиям:

$$\int_{\Omega} \varphi_n(\mathbf{x}) \varphi_m^*(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \delta_{nm}, \quad \frac{1}{T} \int_0^T a_n(t) a_m(t) dt = \lambda_n \delta_{nm}.$$

Для нахождения собственных значений, мод и корреляционных коэффициентов используется алгоритм на основе SVD-разложения кросскорреляционной матрицы [10]. Использованный алгоритм был неоднократно апробирован в других исследованиях [11; 12]. Усредненная по пространству кинетическая энергия пульсаций, содержащаяся в последовательности полей пульсаций скорости, равняется половине суммы всех собственных значений $\epsilon = \sum_n \lambda_n / 2$. Следовательно, $\epsilon / \epsilon_n = \lambda_n / \sum_n \lambda_n$ – доля от полной усредненной по пространству кинетической энергии, содержащейся в каждой POD-мод. В силу симметрии кросскорреляционной матрицы все $\lambda_n > 0$. Кроме того, $\varphi_n(\mathbf{x})$ можно упорядочить согласно величине λ_n : $\lambda_{n-1} \geq \lambda_n > 0$ ($n = 2, \dots, N$). Применение метода к ансамблю полей мгновенной скорости позволяет получить конечный набор собственных значений λ_n и пространственных базисных функций $\varphi_n(\mathbf{x})$, соответствующих пульсациям скорости, вносящим наибольший вклад в кинетическую энергию пульсаций скорости. При этом вклад POD-моды в интегральную кинетическую энергию пульсаций определяется соответствующим собственным значением λ_n , а эволюция наиболее энергоемких пульсаций может быть определена через временные коэффициенты $a_n(t)$ для главных мод. Обычно первые POD-моды связаны с крупномасштабными вихревыми структурами в потоке [12; 13]. 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 [11].

Результаты

На рис. 2 показаны поля средней скорости при докавитационном и кавитационном обтекании цилиндра. Для продольной компоненты скорости (см. рис. 2, а) наблюдается почти симметричное распределение относительно оси x , а для поперечной компоненты – ассиметричное (см. рис. 2, б). Перпендикулярная плоскости компонента скорости не измерялась в процессе эксперимента.

На рис. 3, б можно наблюдать относительно большие флуктуации скорости в поперечном направлении (до 80 % от среднерасходной скорости) в верхнем сдвиговом слое, после зоны возвратных токов, продольные пульсации достигают 60 % для случая до возникновения кавитации. Максимальные значения пульсаций поперечной компоненты $\overline{v'v'}$ обнаружены в сдвиговом слое вблизи точки отрыва пограничного слоя. Максимум пульсаций продольной компоненты скорости $\overline{u'u'}$ находится сразу за областью возвратных токов на расстоянии 1,2d и 1,5d для докавитационного и кавитационного обтекания соответственно (рис. 3, а).

Для сравнения были рассчитаны компоненты тензора скоростей деформации $S_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right)$ и тензора скорости вращения $\Omega_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)$. Рассчитанные величины также демонстрировали ассиметричное распределение в верхней и нижней части. Средняя скорость деформации и средняя скорость вращения имеют один и тот же порядок величины из-за преобладания компоненты градиента поперечной скорости $\frac{\partial v}{\partial y}$. Основное различие между двумя этими величинами наблюдалось вниз по потоку, где скорость вращения становится мала по сравнению со скоростью деформации. Максимальные значения завихренности наблюдались вблизи точки отрыва пограничного слоя.

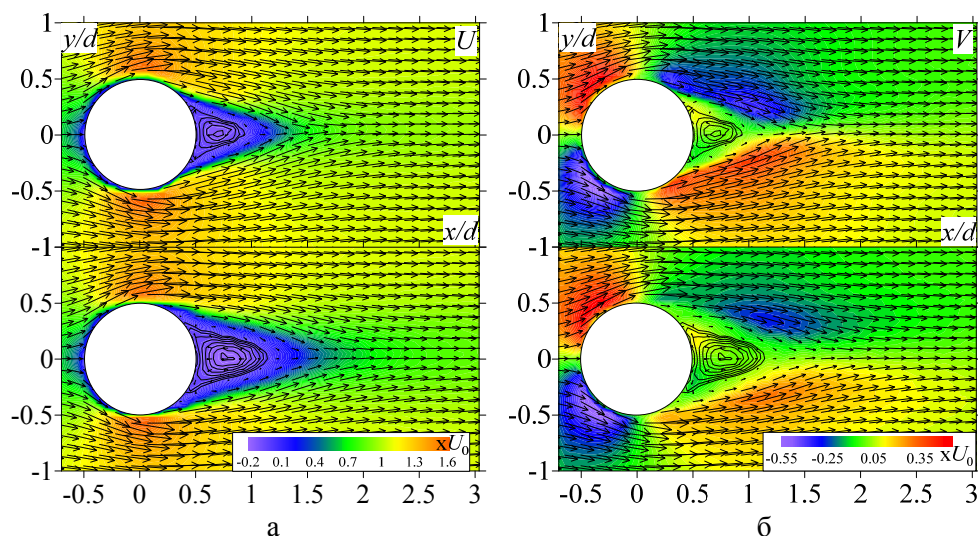


Рис. 2. Поле средней скорости и среднее распределение продольной U (а) и поперечной V (б) компоненты скорости для цилиндра при докавитационном (верхняя пара) и кавитационном (нижняя пара) обтекании цилиндра. Замкнутыми линиями показаны зоны возвратных токов в следе за цилиндром

Fig. 2. The average velocity field and the mean distribution of the longitudinal U (a) and transverse V (b) components of the velocity for the cylinder with the pre-cavitation (upper pair) and cavitation flow past the cylinder (lower pair). Closed lines show the return current zones in the wake of the cylinder

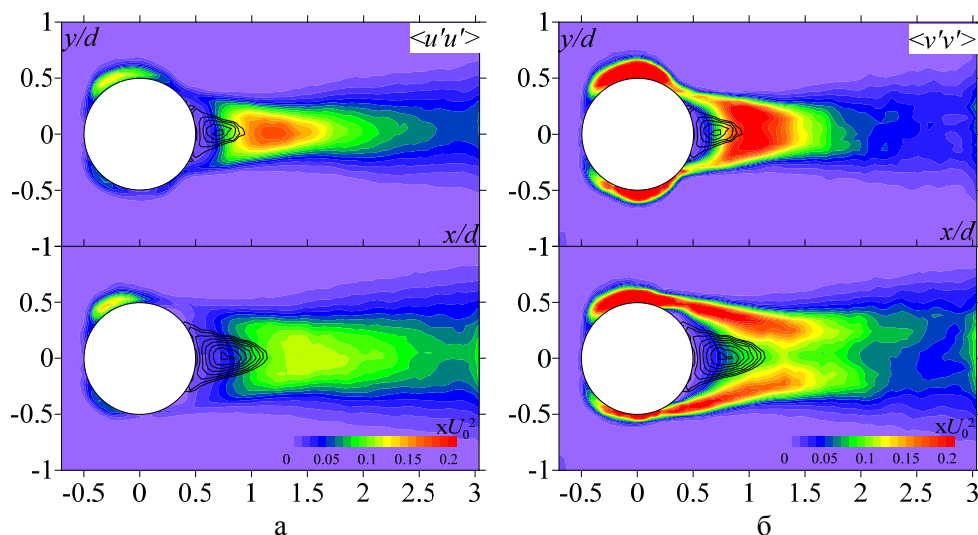


Рис. 3. Среднее распределение кинетической энергии продольных (а) и поперечных (б) пульсаций скорости для цилиндра при докавитационном (верхняя пара) и кавитационном (нижняя пара) обтекании. Замкнутыми линиями показаны зоны возвратных токов в следе за цилиндром

Fig. 3. The average distribution of the kinetic energy of the longitudinal (a) and transverse (b) pulsations of the velocity for the cylinder during the pre-cavitation flow (upper pair) and cavitation flow (lower pair). Closed lines show the return current zones in the wake of the cylinder

Из рис. 2 и 3 можно сделать вывод, что непосредственно за цилиндром сосредоточена область интенсивных турбулентных пульсаций, где формируются противоположно вращающиеся вихри: один по часовой стрелке (в верхней части), другой против часовой стрелки (в нижней части). По вертикали они заметно смещены друг относительно друга. Между этими вихрями жидкость движется в направлении, обратном основному потоку. Значение максимальной скорости обратного тока составило $0,15U_0$ на расстоянии $0,7d$ для докавитационного и $0,21U_0$ на расстоянии $0,78d$ для кавитационного режимов обтекания. Продольные размеры области возвратных токов составили $0,44d$ и $0,6d$, что на 36 % больше. Поперечные размеры выросли на 40 %. Из анализа средних картин течения был обнаружен несимметричный отрыв пограничного слоя, разница рассчитанных углов отрыва составила 7 и 9 градусов для докавитационного и кавитационного обтекания соответственно.

Для анализа фазово-осредненной структуры пульсаций скорости метод POD применен к ансамблям из 2000 полей пульсаций скорости для случаев докавитационного и кавитационного обтекания цилиндра. Рассчитанные собственные значения (представлены в виде спектра, зависимость собственных значений $\epsilon/\epsilon_n = \lambda_n / \sum_{n=1}^N \lambda_n$ от номера моды), собственные функции $\phi_n(\mathbf{x})$ и корреляционные коэффициенты $a_n(t)$. На рис. 4, а показан нормированный на полную кинетическую энергию пульсаций спектр собственных значений POD-мод, демонстрирующий, что первые две главные POD-моды вносят наибольший вклад в интенсивность турбулентных пульсаций в следе цилиндра.

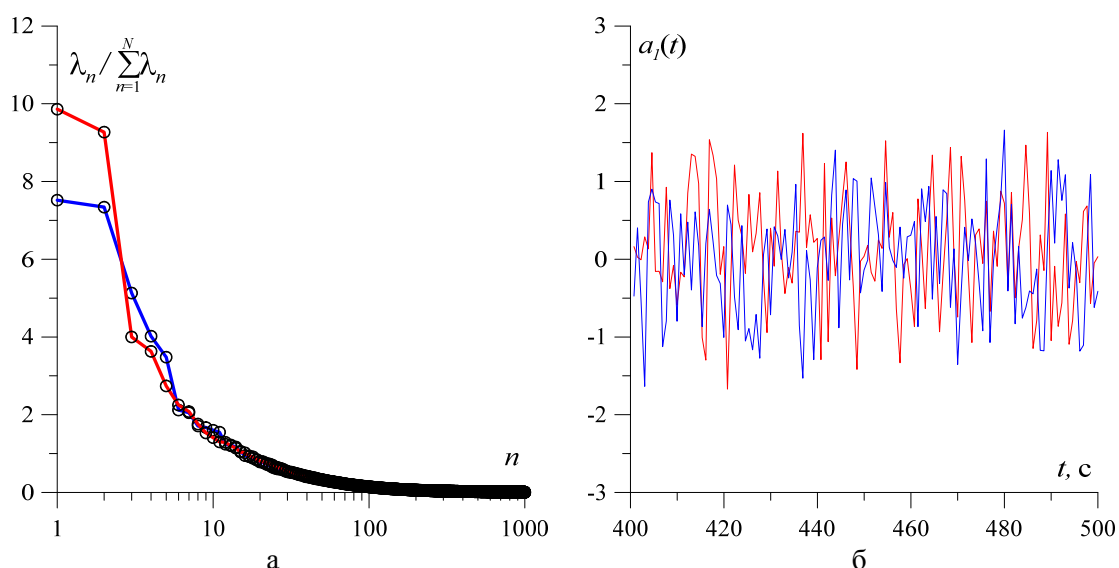


Рис. 4. Спектр собственных значений (а) и корреляционные коэффициенты $a_1(t)$ (б) наиболее энергоемкой моды POD разложения пульсаций скорости. Синим цветом показаны результаты для случая докавитационного обтекания, красным – при кавитационном обтекании цилиндра

Fig. 4. Spectrum of eigenvalues (a) and correlation coefficients $a_1(t)$ (b) of the most energy-intensive mode POD decomposition of velocity pulsations. Blue color shows the results for the case of pre-cavitation flow and red – with cavitation flow around the cylinder

Как можно видеть, при докавитационном обтекании первые две наиболее энергонесущие POD-моды содержат $7,5 + 7,3 = 14,8$ % кинетической энергии пульсаций. В случае кавитационного обтекания кинетическая энергия пульсаций оказывается $9,9 + 9,3 = 19,2$ %, что примерно на 5 % больше. После 10 мод наблюдается заметное изменение угла наклона спектра

(см. рис. 4, *a*). В первых 10 модах, которые с хорошей точностью реконструируют когерентную компоненту пульсаций, кумулятивно содержится около 36 и 38 % кинетической энергии пульсаций соответственно. На рис. 4, *b* показаны корреляционные коэффициенты первой POD-моды для случая кавитационного обтекания, которые демонстрируют выраженное квазипериодичное поведение. Коэффициенты корреляции a_1 и a_2 двух главных мод с полями мгновенной скорости (или временные коэффициенты) не являются независимыми и расположены вокруг кольца [13]. Каждое положение на кольце соответствует определенной фазе в квазипериодичной динамике когерентной структуры потока, состоящей из двух доминирующих мод. На основе POD-коэффициентов может быть определена фаза эволюции крупномасштабных вихревых структур [14].

На рис. 5 показаны пространственные распределения двух наиболее энергоемких собственных мод $\phi_{1,2}(\mathbf{x})$ для режима докавитационного обтекания. Отдельно визуализированы продольная (рис. 5, *a*) и поперечная (рис. 5, *b*) компоненты двух мод. Красный цвет соответствует положительным значениям пульсаций скорости в рассматриваемой области, а синий – отрицательным. Все распределения нормированы и показаны в одной шкале. Можно видеть, что две первые POD-моды, отличающиеся лишь сдвигом по фазе, связаны с крупномасштабными вихревыми структурами (вихрями Кармана), формирующимися сразу в области возвратных токов. Наблюдаются асимметричная картина пульсаций и поперечные колебания зоны рециркуляции. При переходе к кавитационному обтеканию цилиндра возрастает кинетическая энергия и увеличивается масштаб структур (рис. 6).

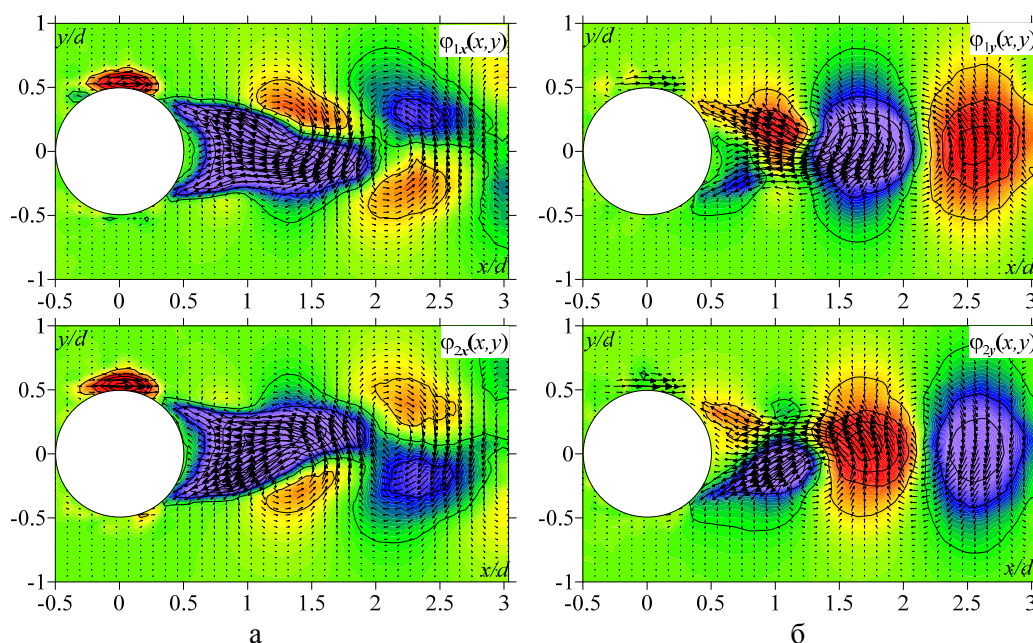


Рис. 5. Пространственные распределения продольной (*a*) и поперечной (*b*) компоненты двух наиболее энергоемких мод POD-разложения пульсаций скорости для случая докавитационного обтекания цилиндра. Значения мод нормированы и показаны в одной шкале

Fig. 5. Spatial distributions of the longitudinal (*a*) and transverse (*b*) components of the two most energy-intensive modes of POD decomposition of velocity pulsations for the case of pre-cavitation flow past a cylinder. The values of the modes are normalized and shown in one scale

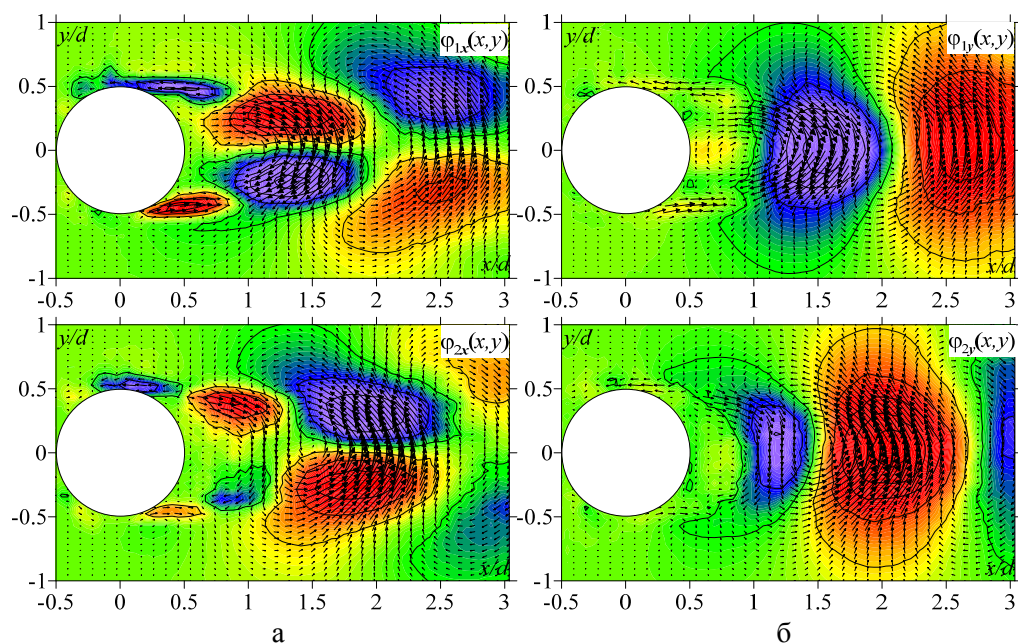


Рис. 6. Пространственные распределения продольной (а) и поперечной (б) компоненты двух наиболее энергоемких мод POD-разложения пульсаций скорости для случая кавитационного обтекания цилиндра. Значения мод нормированы и показаны в одной шкале

Fig. 6. Spatial distributions of the longitudinal (a) and transverse (b) components of the two most energy-intensive modes of POD decomposition of velocity pulsations for the case of cavitation flow past a cylinder. The values of the modes are normalized and shown in one scale

Заключение

Проведено экспериментальное исследование методом PIV характеристик крупномасштабных пульсаций скорости в случае докавитационного и кавитационного обтекания цилиндра при высоком числе Рейнольдса 280 000. Исследуемые режимы обтекания характеризовались наличием несимметричного отрыва пограничного слоя. Разница углов отрыва составила 7 и 9 градусов для докавитационного и кавитационного обтекания соответственно. При переходе к кавитационному режиму происходит увеличение поперечных (на 40 %) и продольных (на 36 %) размеров области возвратных токов. Пространственная форма и кинетическая энергия наблюдаемых крупномасштабных пульсаций в следовой области проанализирована с применением статистического метода POD. Показано, что две первые POD-моды связаны с квазипериодической динамикой вихрей Кармана. В условиях кавитации кинетическая энергия пульсаций двух наиболее энергонесущих мод оказывается на 5 % больше. Помимо увеличения интенсивности, при переходе к кавитационному обтеканию наблюдается заметное увеличение продольных и поперечных размеров крупномасштабных вихревых структур. В работе был сделан вывод, что крупномасштабные вихревые структуры на полях мгновенной скорости могут быть представлены линейной комбинацией двух наиболее энергонесущих POD-мод.

Список литературы

1. **Roshko A.** Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *J. Fluid Mech.*, 1961, vol. 10 (3), p. 345–346.

2. **Farell C., Blessman J.** On critical flow around smooth circular cylinders. *J. Fluid Mech.*, 1983, vol. 136, p. 375–391.
3. **Williamson C. H. K.** The natural and forced formation of spot-like ‘vortex dislocations’ in the transition of a wake. *J. Fluid Mech.*, 1992, vol. 243, p. 393–441.
4. **Bloor M. S.** The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder. *J. Fluid Mech.*, 1964, vol. 19 (2), p. 290–304.
5. **Добросельский К. Г.** Методика исследования поперечного обтекания цилиндра в гидродинамической трубе // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8, № 4. С. 110–117.
6. **Ахметбеков Е. К., Бильский А. В., Ложкин Ю. А., Маркович Д. М., Токарев М. П.** Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислительные методы и программирование. 2007. Т. 7. С. 79–85.
7. **Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А. В.** Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–120.
8. **Добросельский К. Г.** Применение PIV метода для исследования течения вблизи поперечно обтекаемого цилиндра // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89 (3). С. 687–693.
9. **Holmes P., Lumley J., Berkooz G.** Turbulence, Coherent Structures. Dynamical Systems and Symmetry. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.
10. **Meyer K. E., Pedersen J. M., Ozcan O.** A turbulent jet in crossflow analysed with proper orthogonal decomposition. *J. Fluid Mech.*, 2007, vol. 583, p. 199–227.
11. **Alekseenko S. V., Abdurakipov S. S., Hrebtov M. Y., Tokarev M. P., Dulin V. M., Markovich D. M.** Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets: A tomographic PIV study. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2018, vol. 70, p. 363–379.
12. **Mullyadzhyanov R. I., Sandberg R. D., Abdurakipov S. S., George W. K., Hanjalić K.** Propagating helical waves as a building block of round turbulent jets. *Phys. Rev. Fluids*, 2018, vol. 3 (6), p. 062601.
13. **Абдуракипов С. С., Дулин В. М., Маркович Д. М.** Пространственная структура крупномасштабных вихрей в закрученной струе с распадом и прецессией вихревого ядра // Сибирский физический журнал. 2012. Т. 7, № 2. С. 43–47.
14. **Perrin R., Braza M., Cid E., Cazin S., Barthet A., Sevrain A., Thiele F.** Obtaining phase averaged turbulence properties in the near wake of a circular cylinder at high Reynolds number using POD. *Exp. Fluids*, 2007. vol. 43 (2–3), p. 341–355.

References

1. **Roshko A.** Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *J. Fluid Mech.*, 1961, vol. 10 (3), p. 345–346.
2. **Farell C., Blessman J.** On critical flow around smooth circular cylinders. *J. Fluid Mech.*, 1983, vol. 136, p. 375–391.
3. **Williamson C. H. K.** The natural and forced formation of spot-like ‘vortex dislocations’ in the transition of a wake. *J. Fluid Mech.*, 1992, vol. 243, p. 393–441.
4. **Bloor M. S.** The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder. *J. Fluid Mech.*, 1964, vol. 19 (2), p. 290–304.
5. **Dobroselskiy K. G.** Research Methodology of Cross-Flow Cylinder Pipe Hydrodynamical. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2013, vol. 8, no. 4, p. 110–117. (in Russ.)
6. **Akhmetbekov Ye. K., Bilsky A. V., Lozhkin Yu. A. et al.** Software for Experiment Management and Processing of Data Obtained by Digital Flow Visualization Techniques (ActualFlow). *Vychisl. Metody Programm.*, 2007, vol. 7, p. 79–85. (in Russ.)

7. **Tokarev M. P., Markovich D. M., and Bilsky A. V.** Adaptive Algorithms for PIV Image Processing. *Vychisl. Tekhnol.*, 2007, vol. 12 (3), p. 109–131. (in Russ.)
8. **Dobroselskii K G.** Use of the PIV method for investigation of motion near a cylinder in transverse flow. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89 (3), p. 687–693. (in Russ.)
9. **Holmes P., Lumley J., Berkooz G.** Turbulence, Coherent Structures. Dynamical Systems and Symmetry. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.
10. **Meyer K. E., Pedersen J. M., Ozcan O.** A turbulent jet in crossflow analysed with proper orthogonal decomposition. *J. Fluid Mech.*, 2007, vol. 583, p. 199–227.
11. **Alekseenko S. V., Abdurakipov S. S., Hrebtov M. Y., Tokarev M. P., Dulin V. M., Markovich D. M.** Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets: A tomographic PIV study. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2018, vol. 70, p. 363–379.
12. **Mullyadzhanov R. I., Sandberg R. D., Abdurakipov S. S., George W. K., Hanjalić K.** Propagating helical waves as a building block of round turbulent jets. *Phys. Rev. Fluids*, 2018, vol. 3 (6), p. 062601.
13. **Abdurakipov S. S., Dulin V. M., Markovich D. M.** Spatial Structure of Large-Scale Vortices in a Swirling Jet with Breakdown and Precession of the Vortex Core. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2012, vol. 7, no. 2, p. 43–47. (in Russ.)
14. **Perrin R., Braza M., Cid E., Cazin S., Barthet A., Sevrain A., Thiele F.** Obtaining phase averaged turbulence properties in the near wake of a circular cylinder at high Reynolds number using POD. *Exp. Fluids*, 2007. vol. 43 (2–3), p. 341–355.

Материал поступил в редколлегию

*Received
13.06.2019*

Сведения об авторах / Information about the Authors

Абдуракипов Сергей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия)

Sergey S. Abdurakipov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Institute of Thermal Physics SB RAS (1 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
s.s.abdurakipov@gmail.com

Добросельский Константин Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия)

Konstantin G. Dobroselsky, Doctor of Science (Technics), Associate Professor, Institute of Thermal Physics SB RAS (1 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
dobroselsky@mail.ru