

Control of separated turbulent stream by high.frequency rotary oscillations at $RE=1,4\times 10^5$

Palkin, Egor V.; Mullyadzhanov, Rustam I.; Hadziabdic, Muhamed; Hanjalic, Kemal

Publication date

2016

Document Version

Final published version

Published in

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering

Citation (APA)

Palkin, E. V., Mullyadzhanov, R. I., Hadziabdic, M., & Hanjalic, K. (2016). Control of separated turbulent stream by high.frequency rotary oscillations at $RE=1,4\times 10^5$. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 327(9), 88-94. <http://izvestiya.tpu.ru/en/archive/article.html?id=348565&journalId=>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/317743243>

Control of separated turbulent stream by high-frequency rotary oscillations at $Re=1.4 \times 10^5$

Article · January 2016

CITATIONS

0

READS

38

4 authors:



Egor Palkin

Instituto Nacional de Pediatría

12 PUBLICATIONS 13 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Rustam Mullyadzhonov

Russian Academy of Sciences

34 PUBLICATIONS 58 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Muhamed Hadžiabdić

International University of Sarajevo

29 PUBLICATIONS 585 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Kemal Hanjalic

Delft University of Technology

365 PUBLICATIONS 6,568 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Heat transfer of impinging jets [View project](#)

УДК 532.517.4

УПРАВЛЕНИЕ ОТРЫВНЫМ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ ПРИ ПОМОЩИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ $Re=1,4 \times 10^5$

Палкин Егор Владимирович¹,
palkinev89@gmail.com

Мулладжанов Рустам Илхамович^{1,2},
rustammul@gmail.com

Мухамед Хаджиабдич³,
muhamed.hadziabdic@gmail.com

Кемал Ханьялич^{1,4},
khanjalic@gmail.com

¹ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

² Институт теплофизики СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.

³ Международный университет Сараево,
Босния и Герцеговина, 71210, г. Сараево, ул. Храснечка цеста, 15.

⁴ Технологический университет Делфта,
Нидерланды, 2628, г. Делфт, ул. Джулианалаан, 136.

Актуальность. Характеристики отрывных турбулентных течений жидкости и газа играют важную роль при проектировании эффективного оборудования гидро- и теплоэлектростанций. В такого рода потоках реализуются режимы течения с вредоносными квазипериодическими осцилляциями величины скорости и давления высокой амплитуды за телом обтекания. Таким образом, знания о способах управления турбулентными потоками могут не только снизить износ рабочих частей оборудования, но и предотвратить их разрушение. Кроме того, для исследования возникающих оптимизационных задач с параметрами, меняющимися в широком диапазоне, необходимы валидированные модели турбулентности, которые существенно экономят вычислительное время по сравнению с использованием метода крупных вихрей и прямого численного моделирования.

Цель работы: на примере модельной задачи обтекания бесконечного цилиндра применить перспективную технику контроля потока при помощи вращательных колебаний стенки цилиндра вокруг своей оси. Исследования проведены при практически реализуемых высоких числах Рейнольдса, $Re=1,4 \times 10^5$ при использовании валидированных численных методов для того, чтобы продемонстрировать возможность существенного понижения коэффициента лобового сопротивления и флуктуаций подъемной силы, действующей на цилиндр.

Методы. Используется вычислительный код T-FlowS, основанный на методе конечных объемов и неструктурированных расчетных сетках, и метод нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с замыканием Рейнольдсовых напряжений второго порядка.

Результаты. Показаны возможности управления потоком – уменьшение ширины следа за цилиндром, подавление рециркуляционной зоны, увеличение частоты срыва вихрей, снижение сопротивления и флуктуаций подъемной силы. Показано, что при определенных параметрах колебания цилиндра коэффициент сопротивления может быть уменьшен на 78 % по сравнению с невозмущенным потоком.

Ключевые слова:

Турбулентность, обтекание цилиндра, управление, URANS, снижение сопротивления.

Введение

При проектировании оборудования гидро- и теплоэлектростанций возникают задачи описания и оптимизации характеристик отрывных турбулентных течений. В большинстве задач обтекания затопленных тел потоком жидкости или газа реализуется нестационарный квазипериодический режим течения, при котором с противоположных кромок тела срываются крупномасштабные вихри. Попеременный срыв вихрей приводит к существенным осцилляциям силы, действующей на тело обтека-

ния, что, в свою очередь, может вызвать резонанс в конструкции и повредить ее целостность [1–3]. Подобные проблемы возникают при проектировании оборудования гидро- и теплоэлектростанций. Таким образом, развитие различных техник контроля в задачах обтекания является важной проблемой как с физической точки зрения, так и с экономической.

В литературе исследуются различные способы подавления описанного нестационарного режима – так называемой вихревой дорожки Кармана. На

примере задачи обтекания цилиндра однородным потоком рассмотрены следующие техники: установка дополнительной пластины в области следа [4], вдув/отсос на поверхности цилиндра [5–9], вращение или вращательные колебания цилиндра вокруг своей оси [10–13], нагрев поверхности тела [14, 15], установка дополнительного малого цилиндра рядом с поверхностью [16–18], применение силы Лоренца [19], модификация свойств поверхности цилиндра [20–24].

В данной работе исследуется эффект влияния вращательных колебаний на характеристики процесса обтекания цилиндра диаметром D в однородном потоке несжимаемой жидкости скорости U_∞ . Рассматривается достаточно высокое число Рейнольдса: $Re=U_\infty D/\nu=1,4 \times 10^5$, представляющее практический интерес, где ν – кинематическая вязкость, которая соответствует докритическому режиму обтекания с отрывом ламинарного пограничного слоя, вблизи к явлению кризиса сопротивления ($Re \approx 2,0 \times 10^5$), где коэффициент сопротивления естественно понижается.

В работе [10] авторы изучали аналогичную задачу при более умеренном числе Рейнольдса: $Re=1,5 \times 10^4$, и показали, что коэффициент сопротивления может быть понижен на 80 %, если стенка цилиндра осуществляет высокочастотное вращательное движение вокруг оси симметрии следующего вида:

$$U_\theta|_{wall} = \frac{\Omega D}{2} \sin(2\pi ft),$$

где U_θ – тангенциальная скорость; Ω – амплитуда колебаний; f – частота; t – время. Физическая причина значительного снижения сопротивления состоит в изменении профиля скорости в следе, который реорганизуется и становится более узким (рис. 1). В работе [25] авторы качественно подтвердили результаты [10] с помощью двумерных нестационарных расчетов в интервале чисел Рейнольдса $150 \leq Re \leq 1,5 \times 10^4$, подтвердив, что эффект снижения сопротивления увеличивается вместе с числом Рейнольдса. Относительно грубые трехмерные расчеты методом крупных вихрей (LES), выполненные в работе [26] при $Re=1,5 \times 10^4$, также подтверждают результаты из работы [10], хотя и со снижением сопротивления на 57 % вместо оптимистичных 80 %, полученных в эксперименте из-за неточного метода для определения коэффициента сопротивления.

В текущей работе мы используем предварительно валидированный метод нестационарных осреднений по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с моделью замыкания второго порядка, описанный в работе [27] (URANS RSM JH), чтобы исследовать влияние вращательных колебаний на силу сопротивления и подъемную силу в широком диапазоне параметров вращения в задаче обтекания цилиндра натекающим потоком. Эта модель была ранее верифицирована против данных LES на том же самом случае без вращения [28] и эксперимен-

тальных данных [29]. Данная работа представляет практический интерес, так как в отличие от большинства предыдущих исследований контроля при помощи вращательных колебаний турбулентного обтекания цилиндра, проводимых при низких скоростях потока, выполнена при относительно высоком числе Рейнольдса $Re=1,4 \times 10^5$.

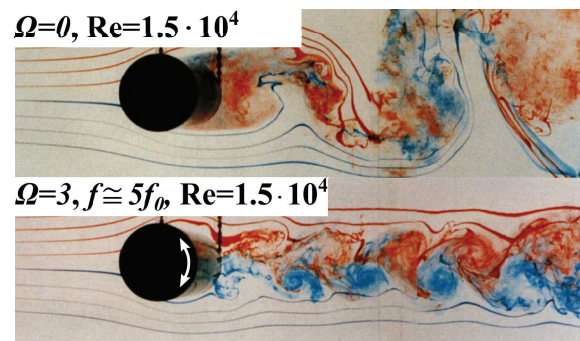


Рис. 1. Визуализация потока без и с вращательными колебаниями из эксперимента [10]. Частота f_0 соответствует естественной (невозмущенной) частоте срыва вихрей

Fig. 1. Visualization of the flow with and without rotary oscillations from the experiment [10]. Frequency f_0 corresponds to the natural (unforced) vortex shedding frequency

Описание вычислительных деталей

Расчеты проведены при помощи вычислительного кода T-FlowS, основанного на методе конечных объемов и неструктурированных расчетных сетках. Конвективное и диффузионное слагаемое в уравнении импульса дискретизовано при помощи разностной схемы TVD и центрально-разностной схемы второго порядка аппроксимации соответственно. Интегрирование по времени произведено с помощью трехшаговой неявной схемы. Поля скорости и давления связаны при помощи процедуры SIMPLE. Сетка состоит из $2,3 \times 10^6$ гексагональных ячеек. Вычислительная область представляет собой параллелепипед длиной $25D$ в продольном направлении (по потоку) и $20D$ – в поперечном, в то время как вдоль цилиндрической оси симметрии – $2D$ (рис. 2). Центр цилиндра расположен на расстоянии $10D$ от входной границы с заданной скоростью U_∞ и нулевым уровнем турбулентности. На верхней и нижней границах области поставлено условие проскальзывания, на выходе – конвективное граничное условие и условие прилипания на стенке цилиндра. Периодические граничные условия наложены вдоль оси цилиндра.

Обсуждение результатов

Основными параметрами данной задачи являются коэффициенты сопротивления и подъемной силы:

$$C_D = 2F_x / (\rho U_\infty^2 S), \quad C_L = 2F_y / (\rho U_\infty^2 S),$$

где ρ – плотность жидкости; S – площадь стенки цилиндра, рассчитанная на единицу длины. Ком-

поненты силы F_x и F_y , действующие на тело, включают силу давления и вязкое трение. Для случая $\Omega=0$ осредненное по времени значение $C_D=1,27$ (1,24 – в экспериментах [29]).

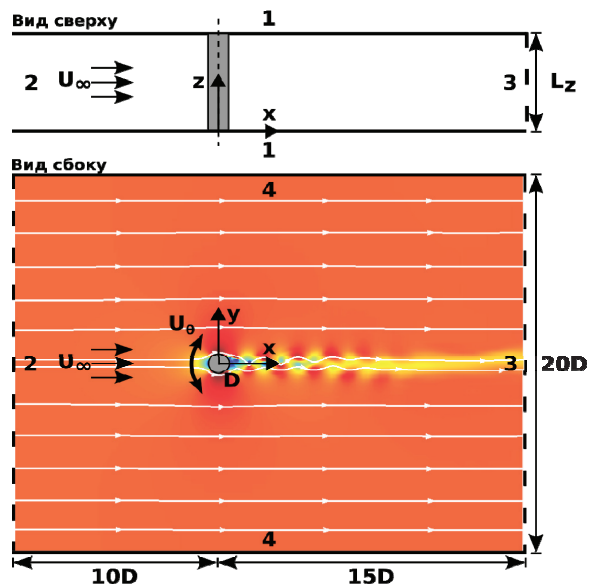


Рис. 2. Вычислительная область. Цифры от 1 до 4 соответствуют периодическому, входному, конвективному выходному граничному условию и условию проскальзывания, соответственно

Fig. 2. Computational domain. Numbers from 1 to 4 correspond to periodic, inflow, convective outflow and slip boundary conditions

В данной работе были рассмотрены две характерные частоты возмущения: $f=f_0$ и $f=2,5f_0$. Первый режим не показал существенного уменьшения сил, действующих на цилиндр, в то время как режим с $f=2,5f_0$ показал существенное снижение C_D и амплитуды колебания C_L . Все случаи были рассчитаны с безразмерной амплитудой $\Omega=1, 2$ и 3 (значение $\Omega D/U_\infty$). Таблица показывает осредненное

по времени значение C_D для различных Ω и f . Оптимальным среди рассмотренных параметров является режим с $\Omega=2$ и $f=2,5f_0$, при этом значение коэффициента сопротивления ($C_D=0,28$) снижается на 78 % по сравнению с невращающимся случаем ($C_D=1,27$).

Таблица. Осредненный по времени коэффициент C_D при $Re=1,4 \times 10^5$ для различных Ω и f

Table. Time-averaged drag force coefficient C_D at $Re=1,4 \times 10^5$ for various Ω and f

$f \backslash \Omega$	1	2	3
$1,0 f_0$	1,30	1,21	1,33
$2,5 f_0$	0,56	0,28	0,42

Пример поведения коэффициента сопротивления и подъемной силы во времени показан на рис. 3 для различных Ω при $f=2,5f_0$. При относительно низком $\Omega=1$ сигнал C_L имеет схожий вид со случаем $\Omega=0$. При более высоких Ω сигнал становится $2,5f_0$ -периодическим. Важным является не только среднее значение C_D , но также и амплитуда осцилляций. Оптимальный среди рассмотренных режимов с $\Omega=2$ и $f=2,5f_0$ обладает наименьшими средними значениями и амплитудами осцилляций C_D и C_L .

На рис. 4 отражены линии тока, продольное поле скорости и поле завихренности для различных режимов. Как было упомянуто ранее, высокочастотное воздействие реорганизует вихревую структуру следа, снижая толщину торможения импульса, что ведет к существенному уменьшению C_D . Дальнейшая работа будет посвящена расширению карты параметров Ω - f .

Заключение

Использование колебательных вращений цилиндра вокруг своей оси при обтекании его однородным потоком жидкости при $Re=1,4 \times 10^5$ позволяет понизить коэффициент сопротивления на

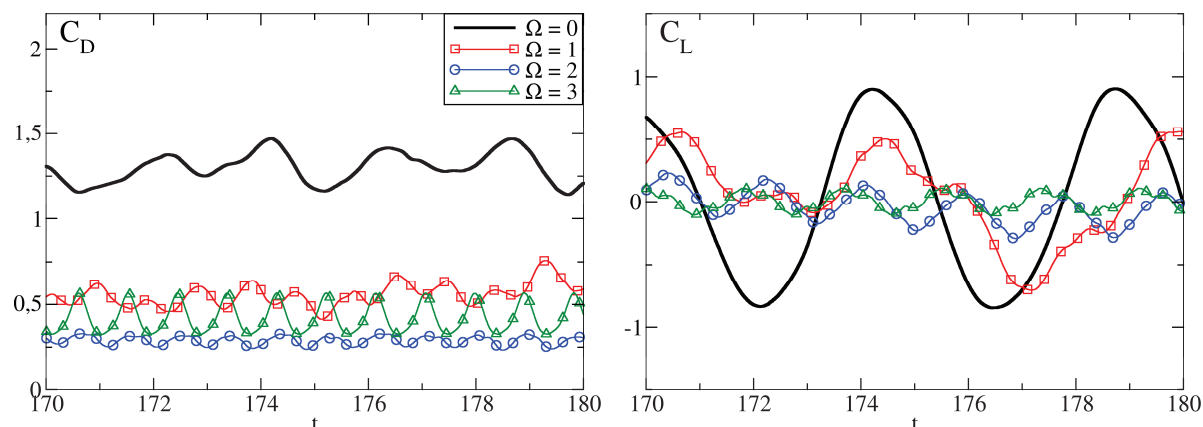


Рис. 3. Коэффициенты лобового сопротивления (слева) и подъемной силы (справа) для расчетов с $f=2,5 f_0$ и различными Ω

Fig. 3. Drag (left) and lift (right) coefficients for simulations with $f=2,5 f_0$ and various Ω

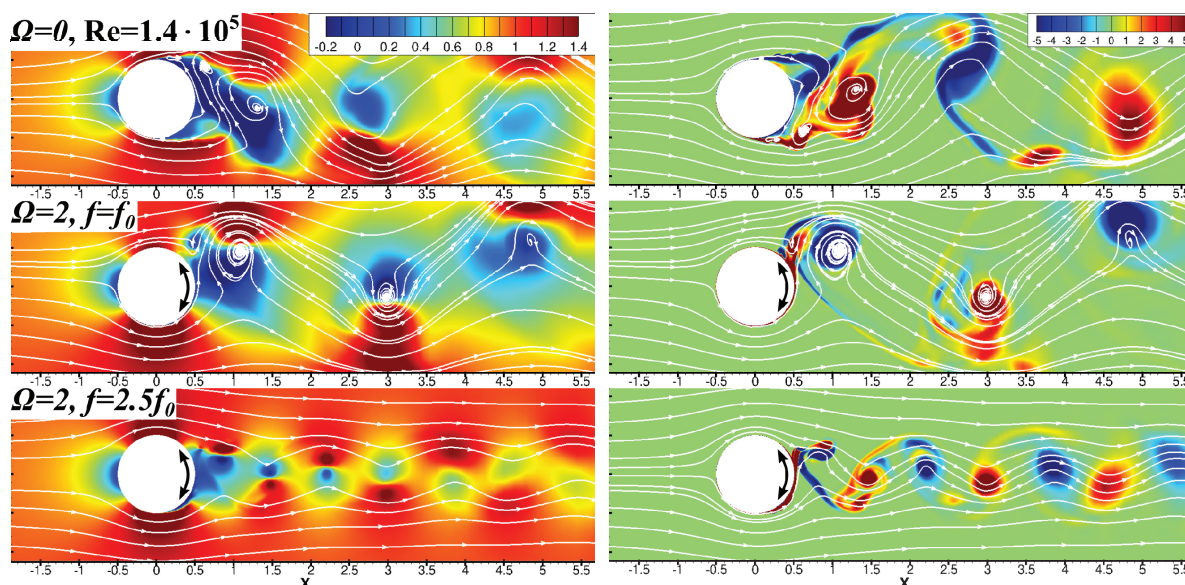


Рис. 4. Продольная скорость (слева) и z-завихренность (справа) для расчетов с различными Ω и f

Fig. 4. Axial velocity (left) and z-vorticity (right) for simulations with various Ω and f

78 % и уменьшить флуктуацию подъемной силы, что подтверждает возможность управления характеристиками рассматриваемого турбулентного течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ гранта № 14-29-00203. Авторы благодарны Сибирскому суперкомпьютерному центру за предоставленные вычислительные ресурсы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чжен П. Отрывные течения. Т. 1. / Пер. с англ. – М.: Изд-во «Мир», 1972. – 300 с.
2. Корнилов В.И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // Теплофизика и аэромеханика.. – 2005. – Т. 12. – № 2. – С. 183–208.
3. Williamson C.H.K. Vortex dynamics in the cylinder wake // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1996. – V. 28. – P. 477–539.
4. Roshko A. On the wake and drag of bluff bodies // Journal of the Aeronautical Sciences. – 1955. – V. 22. – P. 124–132.
5. Delaunay Y., Kaiktsis L. Control of circular cylinder wakes using base mass transpiration // Physics of Fluids. – 2001. – V. 13. – P. 3285–3302.
6. Wood C.J. Visualization of an incompressible wake with base bleed // Journal of Fluid Mechanics. – 1967. – V. 29. – P. 259–272.
7. Dong S., Triantafyllou G.S., Karniadakis G.E. Elimination of vortex streets in bluff-body flows // Physical Review Letters. – 2008. – V. 100. – № 204501. – P. 1–4.
8. Shtendel T., Seifert A. Three-dimensional aspects of cylinder drag reduction by suction and oscillatory blowing // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2014. – V. 45. – P. 109–127.
9. Liu Y.G., Feng L.H. Suppression of lift fluctuations on a circular cylinder by inducing the symmetric vortex shedding mode // Journal of Fluids and Structures. – 2015. – V. 54. – P. 743–759.
10. Tokumaru P.T., Dimotakis P.E. Rotary oscillation control of a cylinder wake // Journal of Fluid Mechanics. – 1991. – V. 224. – P. 77–90.
11. Tokumaru P.T., Dimotakis P.E. The lift of a cylinder executing rotary motions in a uniform flow // Journal of Fluid Mechanics. – 1993. – V. 255. – P. 1–10.
12. Mittal S., Kumar B. Flow past a rotating cylinder // Journal of Fluid Mechanics. – 2003. – V. 476. – P. 303–334.
13. Flinois T.L., Colonius T. Optimal control of circular cylinder wakes using long control horizons // Physics of Fluids. – 2015. – V. 27. – № 8. – P. 087105.
14. Lecordier J.C., Hamma L., Paranthoen P. The control of vortex shedding behind heated circular cylinders at low Reynolds numbers // Experiments in Fluids. – 1991. – V. 10. – P. 224–229.
15. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Жукова Ю.В. Численное моделирование нестационарного теплообмена при турбулентном обтекании кругового цилиндра. Часть 1. Методическое исследование // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12. – № 1. – С. 27–39.
16. Strykowski P.J., Sreenivasan K.R. On the formation and suppression of vortex 'shedding' at low Reynolds numbers // Journal of Fluid Mechanics. – 1990. – V. 218. – P. 71–107.
17. Mittal S., Raghuvanshi A. Control of vortex shedding behind circular cylinder for flows at low Reynolds numbers // International Journal of Numerical Methods in Fluids. – 2001. – V. 35. – P. 421–447.
18. Yildirim I., Rindt C.C.M., Steenhoven A.A. Vortex dynamics in a wire-disturbed cylinder wake // Physics of Fluids. – 2010. – V. 22. – № 094101. – P. 1–15.
19. Chen Z., Aubry N. Active control of cylinder wake // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations. – 2005. – V. 10. – P. 205–216.
20. Rothstein J.P. Slip on superhydrophobic surfaces // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2010. – V. 42. – P. 89–109.
21. You D., Moin P. Effects of hydrophobic surfaces on the drag and lift of a circular cylinder // Physics of Fluids. – 2007. – V. 19. – № 081701. – P. 1–4.

22. Legendre D., Lauga E., Magnaudet J. Influence of slip on the dynamics of two-dimensional wakes // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2009. – V. 633. – P. 437–447.
23. Mastrokalos M.E., Papadopoulos C.I., Kaiktsis L. Optimal stabilization of a flow past a partially hydrophobic circular cylinder // *Computers and Fluids*. – 2015. – V. 107. – P. 256–271.
24. Jie H., Liu Y.Z. Large eddy simulation of turbulent flow over a cactus-analogue grooved cylinder // *Journal of Visualization*. – 2016. – V. 19 (1). – P. 61–78.
25. Shiels D., Leonard A. Investigation of a drag reduction on a circular cylinder in rotary oscillation // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2001. – V. 431. – P. 297–322.
26. Du L., Dalton C. LES calculation for uniform flow past a rotationally oscillating cylinder // *Journal of Fluids and Structures*. – 2013. – V. 42. – P. 40–54.
27. Jakirlić S., Hanjalić K. A new approach to modelling near-wall turbulence energy and stress dissipation // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2002. – V. 459. – P. 139–166.
28. Scrutinizing URANS models in shedding flows: the case of the cylinder in cross flow / E. Palkin, R. Mullyadzhyanov, M. Hadziabdić, K. Hanjalić // *Turbulence, Heat and Mass Transfer: Труды VIII международного симпозиума*. – Сараево, Босния и Герцеговина. 2015. – P. 1–15.
29. Cantwell B., Coles D. An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder // *Journal of Fluid Mechanics* – 1983. – V. 136. – P. 321–374.

Поступила 02.09.2016 г.

Информация об авторах

Палкин Е.В., аспирант физического факультета Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Мулляджанов Р.И., кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института теплофизики СО РАН; научный сотрудник Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Хаджиабдиш М., доктор наук, профессор Международного университета Сараево.

Ханъялич К., доктор наук, профессор Технологического университета Делфта, профессор Новосибирского национального исследовательского государственного университета, лаборатория моделирования энергетических процессов.

UDC 532.517.4

CONTROL OF SEPARATED TURBULENT STREAM BY HIGH-FREQUENCY ROTARY OSCILLATIONS AT $Re=1,4 \times 10^5$

Egor V. Palkin¹,
palkinev89@gmail.com

Rustam I. Mullyadzhanov^{1,2},
rustammul@gmail.com

Muhamed Hadziabdic³,
muhamed.hadziabdic@gmail.com

Kemal Hanjalic^{1,4},
khanjalic@gmail.com

¹ Novosibirsk State University,
2, Pirogova street, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Institute of Thermophysics,
1, Lavrentyeva street, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ International University of Sarajevo,
15, Hrasnicka cesta, 71210, Sarajevo, Bosnia and Hercegovina.

⁴ Delft University of Technology,
136, Julianalaan, Delft, 2628, the Netherlands

Relevance. Characteristics of separated turbulent streams are of great importance when designing effective hydro- and thermal power plants equipment. In such streams the flow regimes with harmful quasi-periodic high-amplitude oscillations of velocity and pressure behind the body are implemented. Thus, the knowledge on the ways of controlling turbulent streams can not only reduce the wear of working parts of equipment but prevent their destruction. Besides, to study the occurring optimization problems with the parameters, which change in a wide range, one needs the validated turbulence models which save significantly the computing time compared to Large-eddy simulations and direct numerical simulations.

The aim of the research is to apply a promising method to control the flow using the rotary oscillations of cylinder around the axis of symmetry. The authors have carried out the investigations using high Reynolds numbers $Re=1,4 \times 10^5$, and the validated numerical methods, to demonstrate the capabilities of the chosen control strategy to decrease the drag coefficient and fluctuating lift force effecting the cylinder.

Methods. The authors used T-FlowS code which is based on finite-volume method and unstructured grids and solve unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes equations with second-moments closure.

Results. The paper demonstrates the possibility to control the flow – decrease of trace width behind the cylinder, suppression of recirculating zone, increase of vortex shedding frequency, reduction of drag and lift forces. It is shown that at certain oscillating parameters of cylinder the resistance factor may be decreased by 78 % in comparison with non-rotating case.

Key words:

Turbulence, flow around cylinder, control, URANS, drag reduction.

The research was financially supported by the RSF grant no. 14–29–00203. The authors appreciate Siberian supercomputer center for computational resources.

REFERENCES

1. Chang P.K. *Separation of flow*. Hungary, Elsevier, 1970. 771 p.
2. Kornilov V.I. Problemy snizheniya turbulentnogo treniya aktivnyimi i passivnymi metodami (obzor) [Reduction of turbulent friction by active and passive methods (review)]. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2005, vol. 12, no 2. pp. 175–196.
3. Williamson C.H.K. Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1996, vol. 28, pp. 477–539.
4. Roshko A. On the wake and drag of bluff bodies. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1955, vol. 22, pp. 124–132.
5. Delaunay Y., Kaiktsis L. Control of circular cylinder wakes using base mass transpiration. *Physics of Fluids*, 2001, vol. 13, pp. 3285–3302.
6. Wood C.J. Visualization of an incompressible wake with base bleed. *Journal of Fluid Mechanics*, 1967, vol. 29, pp. 259–272.
7. Dong S., Triantafyllou G.S., Karniadakis G.E. Elimination of vortex streets in bluff-body flows. *Physical Review Letters*, 2008, vol. 100, no. 204501, pp. 1–4.
8. Shtendel T., Seifert A. Three-dimensional aspects of cylinder drag reduction by suction and oscillatory blowing. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2014, vol. 45, pp. 109–127.
9. Liu Y.G., Feng L.H. Suppression of lift fluctuations on a circular cylinder by inducing the symmetric vortex shedding mode. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, vol. 54, pp. 743–759.
10. Tokumar P.T., Dimotakis P.E. Rotary oscillation control of a cylinder wake. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, vol. 224, pp. 77–90.

11. Tokumar P.T., Dimotakis P.E. The lift of a cylinder executing rotary motions in a uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, vol. 255, pp. 1–10.
12. Mittal S., Kumar B. Flow past a rotating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, vol. 476, pp. 303–334.
13. Flinois T.L., Colonius T. Optimal control of circular cylinder wakes using long control horizons. *Physics of Fluids*, 2015, vol. 27, no. 8, pp. 087105.
14. Lecordier J.C., Hamma L., Paranthoen P. The control of vortex shedding behind heated circular cylinders at low Reynolds numbers. *Experiments in Fluids*, 1991, vol. 10, pp. 224–229.
15. Isaev S.A., Baranov P.A., Kudryavtsev N.A., Zhukova Yr.V. Chislennoe modelirovanie nestatsionarnogo teploobmena pri turbulentnom obtekanii krugovogo tsilindra. Ch. 1. Metodicheskoe issledovanie [Numerical simulation of unsteady heat exchange at a turbulent flow around a circular cylinder. P. 1. Methodical study]. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2005, vol. 12, pp. 27–38.
16. Strykowski P.J., Sreenivasan K.R. On the formation and suppression of vortex 'shedding' at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, vol. 218, pp. 71–107.
17. Mittal S., Raghuvanshi A. Control of vortex shedding behind circular cylinder for flows at low Reynolds numbers. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 2001, vol. 35, pp. 421–447.
18. Yildirim I., Rindt C.C.M., Steenhoven A.A. Vortex dynamics in a wire-disturbed cylinder wake. *Physics of Fluids*, 2010, vol. 22, no. 094101, pp. 1–15.
19. Chen Z., Aubry N. Active control of cylinder wake. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations*, 2005, vol. 10, pp. 205–216.
20. Rothstein J.P. Slip on superhydrophobic surfaces. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010, vol. 42, pp. 89–109.
21. You D., Moin P. Effects of hydrophobic surfaces on the drag and lift of a circular cylinder. *Physics of Fluids*, 2007, vol. 19, no. 081701, pp. 1–4.
22. Legendre D., Lauga E., Magnaudet J. Influence of slip on the dynamics of two-dimensional wakes. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, vol. 633, pp. 437–447.
23. Mastrokalos M.E., Papadopoulos C.I., Kaiktsis L. Optimal stabilization of a flow past a partially hydrophobic circular cylinder. *Computers and Fluids*, 2015, vol. 107, pp. 256–271.
24. Jie H., Liu Y.Z. Large eddy simulation of turbulent flow over a cactus-analogue grooved cylinder. *Journal of Visualization*, 2016, vol. 19 (1), pp. 61–78.
25. Shiels D., Leonard A. Investigation of a drag reduction on a circular cylinder in rotary oscillation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, vol. 431, pp. 297–322.
26. Du L., Dalton C. LES calculation for uniform flow past a rotationally oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, vol. 42, pp. 40–54.
27. Jakirlić S., Hanjalić K. A new approach to modelling near-wall turbulence energy and stress dissipation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, vol. 459, pp. 139–166.
28. Palkin E., Mullyadzhhanov R., Hadziabdić M., Hanjalić K. Scrutinizing URANS models in shedding flows: the case of the cylinder in cross flow. *Proc. 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2015. pp. 1–15.
29. Cantwell B., Coles D. An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, vol. 136, pp. 321–374.

Received 02 September 2016.

Information about the authors

Egor V. Palkin, postgraduate, Novosibirsk State University.

Rustam I. Mullyadzhhanov, Cand. Sc., research scientist, Institute of Thermophysics; research scientist, Novosibirsk State University.

Muhamed Hadziabdic, Dr. Sc., associate professor, International University of Sarajevo.

Kemal Hanjalic, PhD professor, Delft University of Technology; professor, Novosibirsk State University.