

Научная статья  
УДК 533.6.013.12

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178469>

## **О ВЛИЯНИИ ДЕФЛЕКТОРОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА, НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ «ЦИЛИНДР-ПЛАСТИНЫ»**

**Ван Ха Ле<sup>1✉</sup>, Владимир Алексеевич Фролов<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

<sup>1</sup>[halevan@mail.ru](mailto:halevan@mail.ru) ✉

<sup>2</sup>[frolov\\_va\\_ssau@mail.ru](mailto:frolov_va_ssau@mail.ru)

***Аннотация.*** В статье показана эффективность метода снижения лобового сопротивления цилиндра с установкой плоской пластины сзади и deflectоров спереди вблизи его поверхности при числе Рейнольдса  $Re=10^5$ . Результаты моделирования выполнены с помощью вычислительного пакета ANSYS Fluent. Установлено, что коэффициент сопротивления комбинации цилиндра с одним плоским deflectором и с установкой дополнительной разделительной задней пластины, может существенно снизить коэффициент лобового сопротивления до минимального значения 0,45. Приведённые данные можно рекомендовать для аэродинамического проектирования тел с цилиндрическим поперечным сечением с целью снижения их лобового сопротивления.

**Ключевые слова:** пассивный метод снижения сопротивления, система цилиндр-пластины, коэффициент лобового сопротивления, число Рейнольдса

**Для цитирования:** Ле В.Х., Фролов В.А. О влиянии дефлекторов, расположенных вблизи поверхности цилиндра, на сопротивление системы «цилиндр-пластины» // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178469>

Original article

## THE INFLUENCE DEFLECTORS LOCATED NEAR CYLINDER ON DRAG OF COMBINATION «CYLINDER-PLATES»

Van Ha Le<sup>1</sup>✉, Vladimir A. Frolov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Samara National Research University,  
Samara, Russia

<sup>1</sup>[halevan@mail.ru](mailto:halevan@mail.ru) ✉

<sup>2</sup>[frolov\\_va\\_ssau@mail.ru](mailto:frolov_va_ssau@mail.ru)

**Abstract:** The study of the flow around the circular cylinder is one of the most up-to-date fluid and gas mechanics problems due to its wide application in industry. Here are some examples: wind turbines, towers, high-rise buildings, offshore structures, industrial chimneys and bridge hanger cables. Drag reduction of the cylindrical objects in aviation has been of great interest of many scientists for a long time. Various active and passive methods were applied earlier for the cylinder drag reduction. Active methods are being characterized by their effectiveness and by the fact that they require energy supply from the outside. Passive methods are based on adding extra bodies near the cylinder or geometry changing the cylinder surface, thus, unlike the active methods they do not

require energy supply. The basic principle of these methods consists in moving the separation point back downstream, since later separation of the flow leads to the drag force reduction.

This work studies a passive drag reducing method through installing flat plates near the cylinder. The modeling problem was restricted by the two-dimensional case. Velocity and pressure fields near the cylinder, as well as drag coefficient dependencies on the number and relative lengths of deflectors were obtained with the ANSYS Fluent software. The authors found that the drag coefficient of the cylinder combination with one flat deflector and fixation of the back partitioning plate, situated in the horizontal plane of symmetry may reduce significantly the drag coefficient down to minimum value of 0.45.

The data presented can be recommended for the aerodynamic design of the bodies with cylindrical cross section for the drag reduction.

**Keywords:** passive and active drag reduction, cylinder-plate system, drag coefficient, Reynolds number

**For citation:** Le V.H., Frolov V.A. The influence deflectors located near cylinder on drag of combination «cylinder-plates». *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178469>

## Введение

Задача снижения лобового сопротивления тел является одной из главных задач аэродинамики. В статье рассматривается вопрос снижения лобового сопротивления цилиндрических тел. Для таких целей в настоящее время применяют активные и пассивные методы. К активным методам относятся: отсос газа с

поверхности [1], вдув газа [2, 3], изменение температуры стенки [4] и прочее [5, 6]. Пассивные методы в отличие от активных методов, не требуют подвода энергии, они, в свою очередь делятся на установку дополнительных тел вблизи основного тела [7-9] и изменение геометрии поверхности тела [6].

Данная работа посвящена изучению снижения лобового сопротивления цилиндра с пластинами, расположенными вблизи его поверхности при числе Рейнольдса  $Re=10^5$ . Моделирование выполнялось в вычислительном пакете Ansys Fluent [10].

### Постановка задачи

Рассматривается двумерный случай течения воздуха около комбинации системы цилиндр-пластины. Решаются осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) для описания турбулентных течений с применением разных моделей турбулентности [11, 12]. В данной работе применялась часто используемая модель  $k-\omega$  SST, которая хорошо описана в работе Ментера [12]. Система уравнений RANS [11] решалась при следующих граничных условиях и настройках:

- условие прилипания на всех поверхностях цилиндра и пластин  $u|_{wall} = v|_{wall} = 0$ ;
- условия невозмущённого потока на бесконечности:  $u \rightarrow U_\infty$ ,  $v \rightarrow 0$ ,  $p \rightarrow p_\infty$  при  $x^2+y^2 \rightarrow \infty$ .

В пакете Ansys Fluent для данной задачи использовались следующие настройки:

- расчётная область задавалась прямоугольником с достаточно большими размерами ребёр:  $15D$  – впереди цилиндра;  $30D$  – сзади цилиндра;  $10D$  – сверху и снизу цилиндра. Такие размеры расчётной области применялись в работах [13, 14] по моделированию обтекания цилиндров;
- типы граничных условий выбирались следующие: на входе – *velocity\_inlet*, на выходе – *pressure\_outlet*, на верхней и нижней границах – условие симметрии *symmetry*;
- использовалась гибридная сетка, которая вблизи поверхности цилиндра была структурированная, в соответствии со значением числа Рейнольдса  $Re=10^5$ . Размер первой ячейки составлял 0,1 мм ( $y^+=10$ ). Вдали от поверхности использовалась не структурированная сетка. Гибридная сетка строилась в редакторе ANSYS MESHING с использованием стандартных инструментов Sizing и Inflation. Общее количество ячеек – 250 000;
- для обеспечения числа Рейнольдса  $Re=10^5$  в настройках задачи принимались следующие геометрические и кинематические параметры: диаметр цилиндра  $D=0,0625$  м, скорость потока  $U_\infty=24$  м/с, температура воздуха  $T=293$  К;
- для определения среднего значения коэффициента лобового сопротивления решалась задача обтекания системы тел в стационарной постановке. Замена нестационарной постановки задачи на стационарную применено на основании сравнения результатов моделирование течения около изолированного тела в стационарной и нестационарной постановках, которое выполнено в работах [15, 16]. Для комбинаций цилиндра с пластинами для подтверждения использования стационарной постановки задачи выполнялось сравнение результатов

контрольных расчётов той же комбинации в нестационарной постановке. В стационарной задаче, все результаты в статье относятся к осреднению по последним 100 итерациям.

### Обтекание цилиндра с задней пластиной

Рассматривается комбинация цилиндра и пластины, установленной за цилиндром в горизонтальной плоскости симметрии (рис. 1). Передняя кромка пластины касается поверхности цилиндра, другими словами между пластиной и поверхностью цилиндра отсутствует щель. Относительная толщина пластины принята  $\bar{c} = c/D = 2/62,5 \approx 3\%$ . Исследовались следующие относительные длины задней разделительной пластины  $\bar{l} = l/D \in [0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 7,0; 10,0]$ .

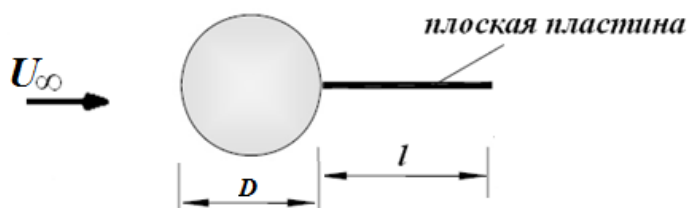


Рис. 1 – Схема комбинации цилиндр-пластина

Результат моделирования задачи в стационарной постановке показан на рис. 2 для линий тока при различных относительных длинах пластины. Заметим, что картинка течения меняется в зависимости от относительной длины задней пластины  $\bar{l}$ . При малых значениях  $\bar{l} = 0,5$  и  $\bar{l} = 1,0$  от поверхности цилиндра наблюдается периодическое отбрасывание вихрей в виде дорожек Кармана (рис. 2 а, б), а при больших значениях  $\bar{l} = 5,0$  и  $\bar{l} = 10$  поток почти симметрично разделён (рис. 2 в,

г), течение стационарное. Этот вывод хорошо согласуется с результатом, полученным в работе [17].

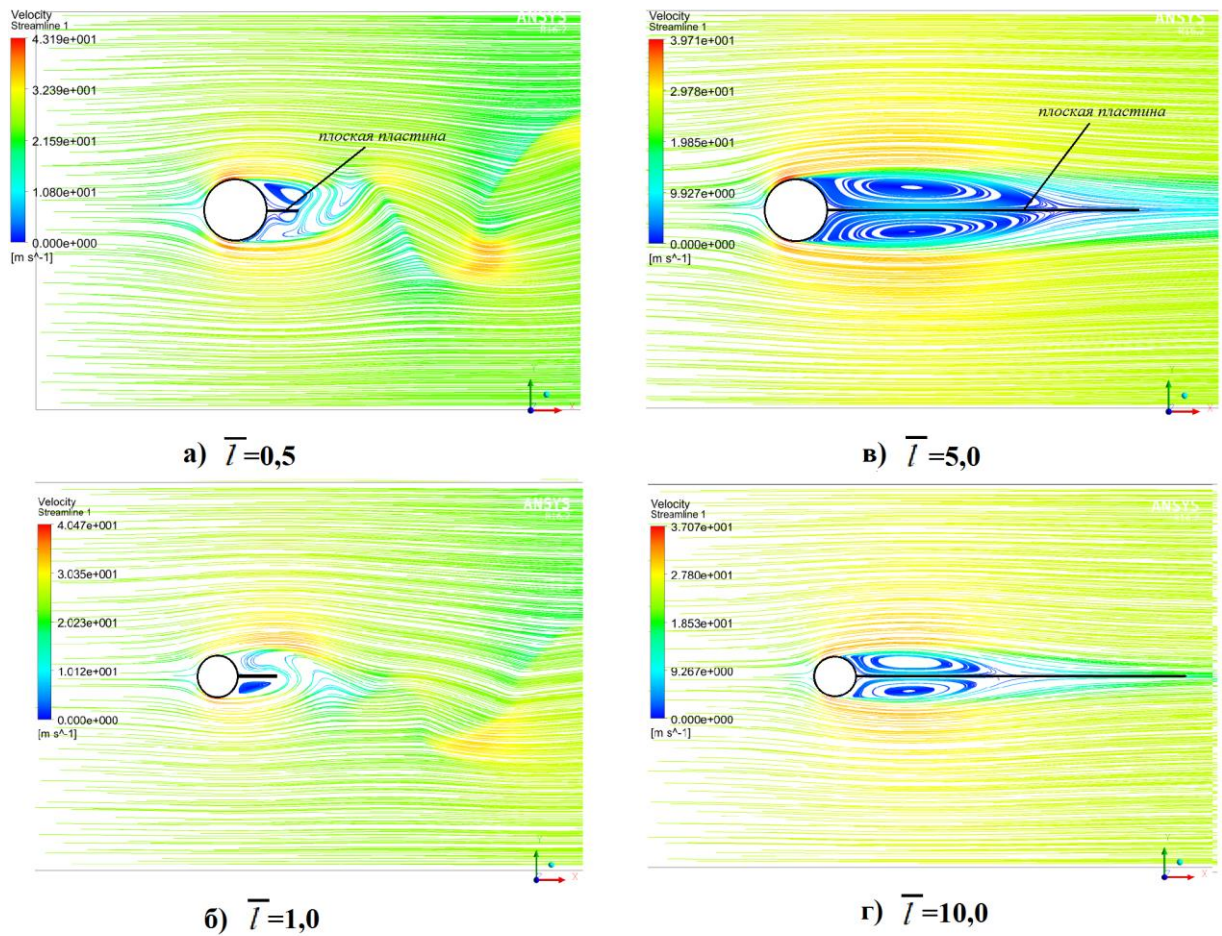


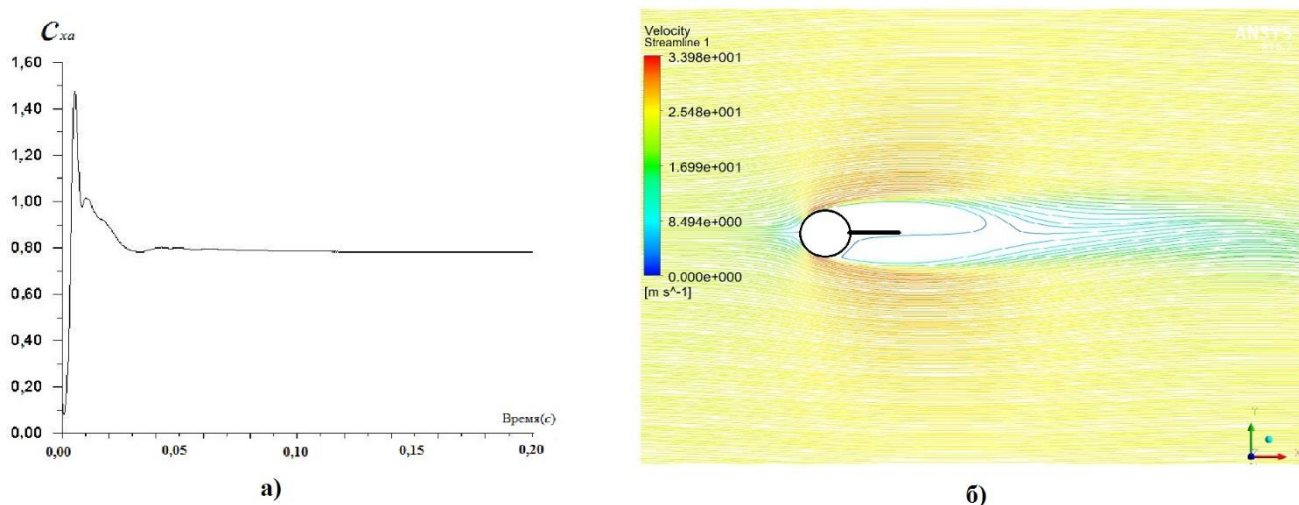
Рис.2 – Линии тока вблизи цилиндра с пластиной, расположенной сзади

Картины линий тока (рис. 2 а, б) говорят о нестационарном процессе обтекания, поэтому для проверки справедливости рассмотрения стационарного подхода, для малых значений  $\bar{l} < 1,5$  были проведены дополнительные расчёты для нестационарной постановки задачи. Выберем характерное время – это время, за которое жидкая частица движется от входа до выхода рабочей области. Это время определяется размером расчётной области и скоростью частицы

$$t_{\text{хар}} = \frac{45 \cdot D}{U_{\infty}} = \frac{45 \cdot 0,0625}{24} = 0,12 \text{ с.}$$



Шаг по времени нужно выбрать на 2-3 порядка меньше чем характерное время, чтобы учитывать все образующие за цилиндром вихри. В данной работе выбраны: шаг по времени  $\Delta t=0,0002$  с; суммарное количество шагов по времени 1000; максимальное количество итераций на каждом временном шаге 1000. Результат моделирования для нестационарной задачи для момента времени  $t=0,2$  с показан на рис. 3.



а) зависимость коэффициента лобового сопротивления по времени; б) поле скорости для момента времени  $t=0,2$  с

Рис.3 – Нестационарное решение для комбинации цилиндра и задней пластины  $\bar{l} = 1,0$

Проанализировано расположение точки отрыва на поверхности цилиндра, которое определялось по формуле Ньютона для касательного напряжения

$$\tau_w = \mu(\partial v_s / \partial n),$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $v_s$  – касательная составляющая скорости на поверхности цилиндра;  $n$  – нормаль к поверхности тела. Критерием отрыва будем считать равенство нулю касательного напряжения в точке отрыва  $\tau_w=0$  [18]. Положение точки отрыва потока на поверхности цилиндра определялось



через распределение касательного напряжения  $\tau_w$  на его поверхности, полученное в программе Ansys.

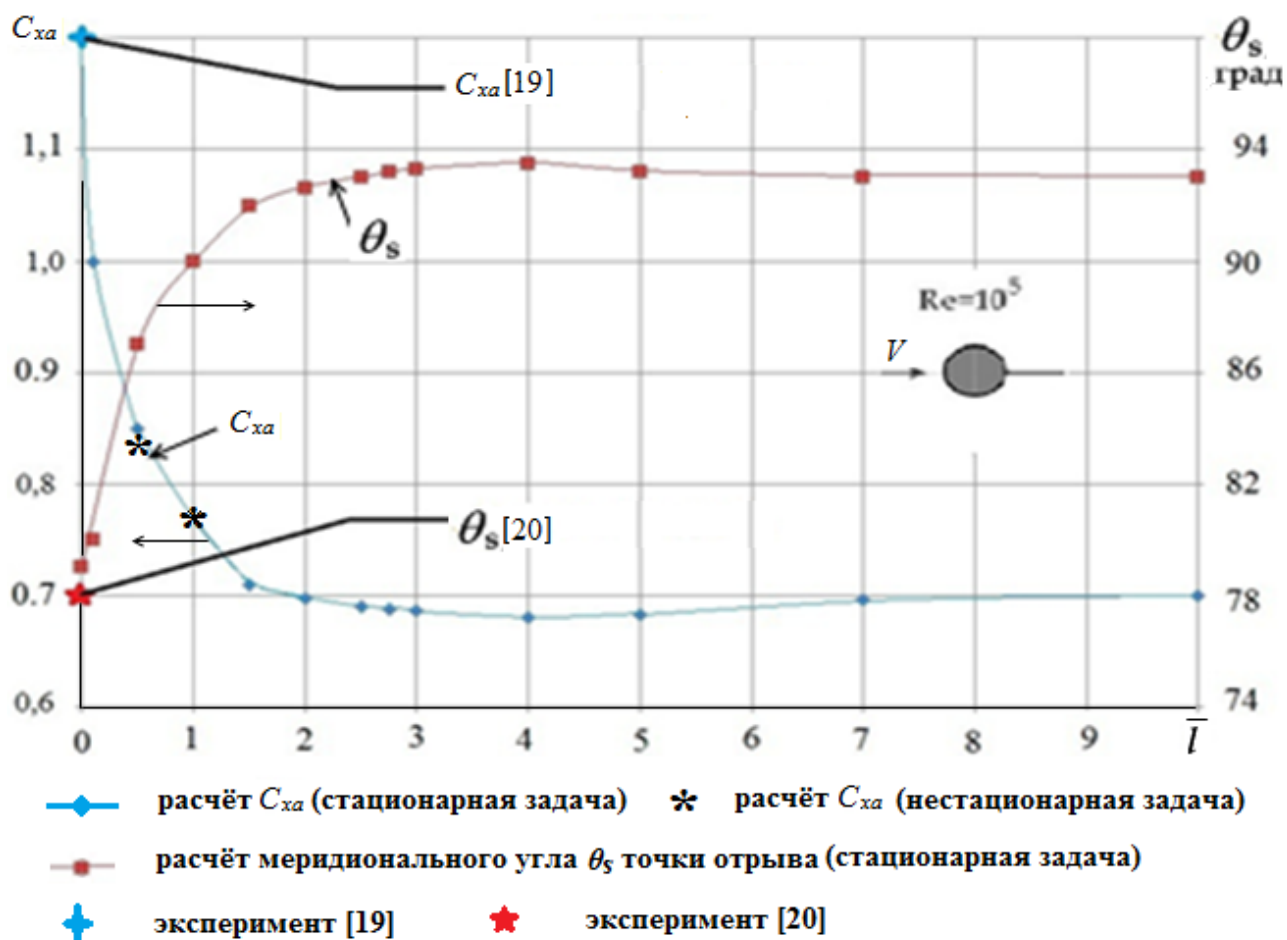


Рис. 4 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления и меридионального угла точки отрыва от безразмерной длины пластины

На рис. 4 показано изменение меридионального угла точки отрыва  $\theta_s$  и коэффициента лобового сопротивления  $C_{xa}$ , которые являются решениями стационарной и нестационарной задач, от безразмерной длины задней разделительной пластины. На рис. 4 так же приведены для сравнения точки экспериментальных данных изолированного цилиндра ( $\bar{l} = 0$ ) [19, 20]. Можно отметить, что для изолированного цилиндра результаты расчёта и эксперимента хорошо согласуются. Из рис. 4 следует, что результаты, полученные в

нестационарной задаче, вполне совпадают с данными стационарной задачи. Установлено, что с увеличением длины пластины точка отрыва  $\theta_s$  смещается назад по потоку, а коэффициент лобового сопротивления  $C_{xa}$  уменьшается. С последующим увеличением длины пластины, картина течения почти не меняется, а коэффициент лобового сопротивления и координата точки отрыва сохраняют постоянное значение. Снижение сопротивления связано с уменьшением интенсивности вихрей, образующихся в следе за цилиндром. Минимум коэффициента лобового сопротивления  $C_{xa}=0,683$  достигается при  $\bar{l}\approx 4$ , что соответствует снижению лобового сопротивления на 42% по сравнению с изолированным цилиндром [19].

### Обтекание цилиндра с задней пластиной и передними дефлекторами

Рассматривалась задача обтекания системы цилиндр с задней разделительной пластиной и передними дефлекторами (рис. 5). Использовалась модель со следующими относительными геометрическими размерами: хорда дефлекторов  $\bar{b}=0,5$ ; толщина  $\bar{c} = 3\%$ ; щель между дефлекторами и поверхностью цилиндра  $\bar{h}=0,1$ ; длина задней разделительной пластины для всех вариантов расчёта  $\bar{l}=3$ .

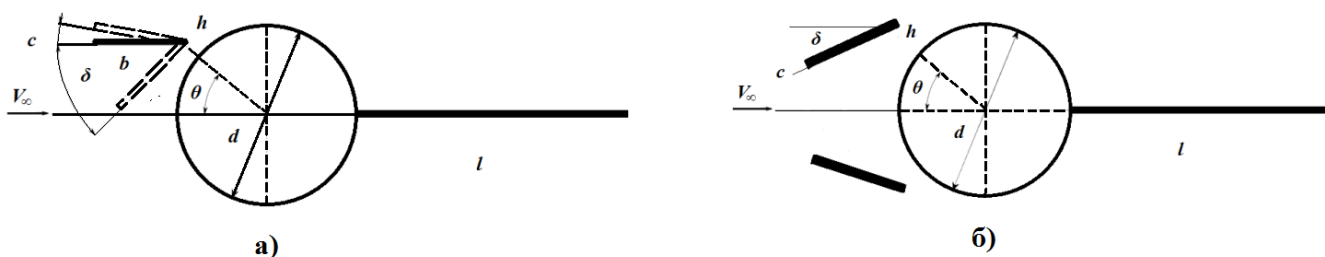
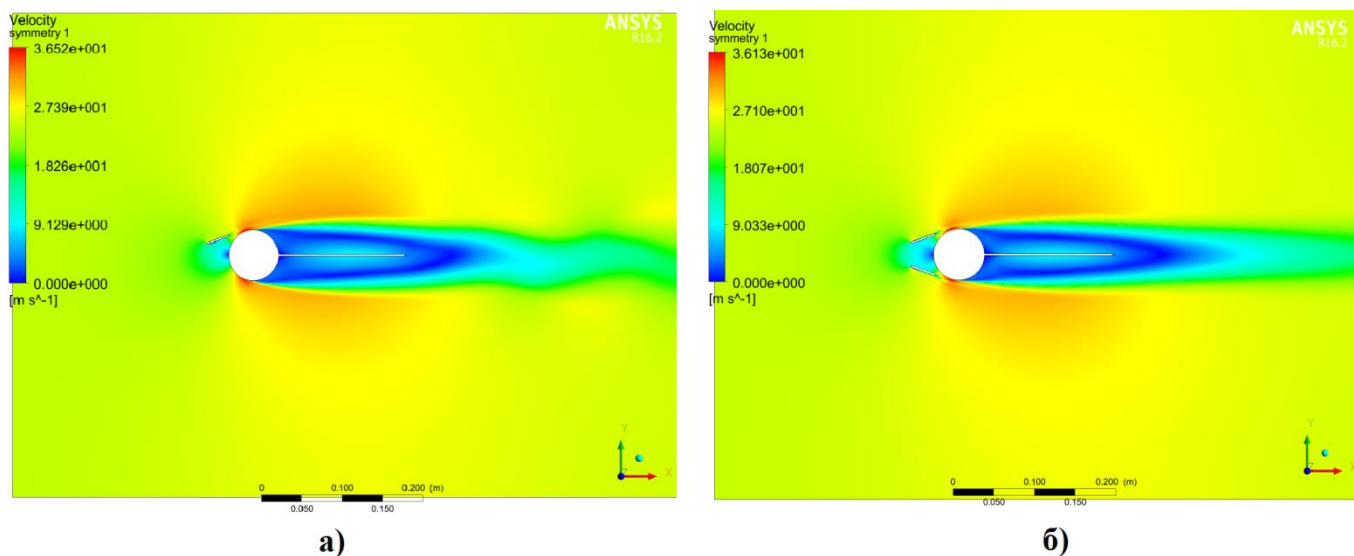


Рис. 5 – Схема системы цилиндр с задней пластиной и одним (а) и двумя (б) дефлекторами спереди

Расположение дефлекторов определялись углом установки  $\delta$  и меридиональным углом задней кромки  $\theta=40^0$  (рис. 5). Все безразмерные величины отнесены к диаметру цилиндра. Результат моделирования представлен на рис. 6 для поля скорости в двух случаях: цилиндра с задней пластиной и одним (а) и двумя (б) дефлекторами спереди.

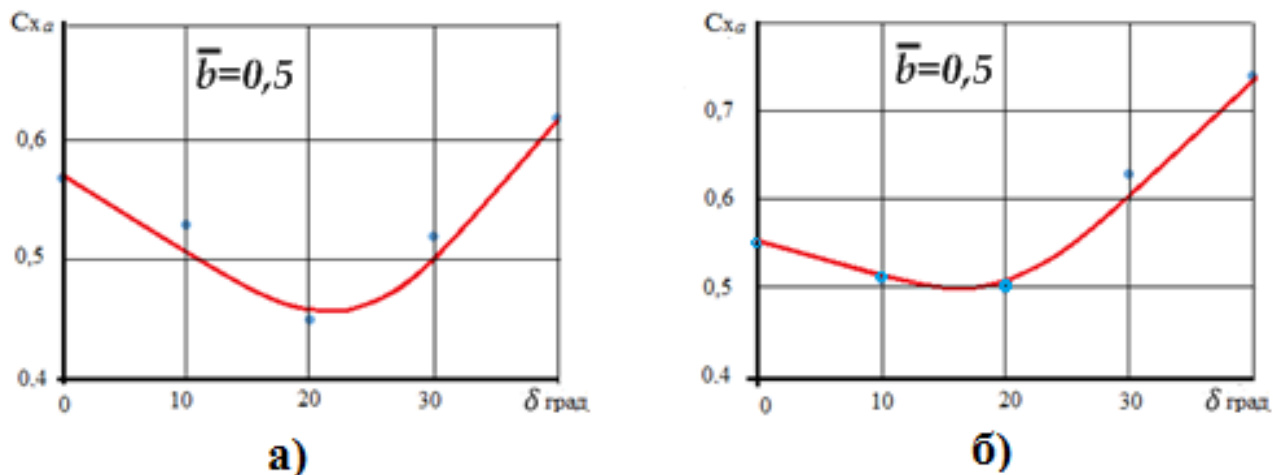


а) с задней пластиной и одним дефлектором; б) с задней пластиной и двумя дефлекторами спереди

Рис. 6 – Поле скорости вблизи системы цилиндра с пластинами

Из рис. 6 видно, что с добавлением дефлекторов, происходит процесс перераспределения скорости вблизи поверхности цилиндра, который в свою очередь приводит к сдвигу точки отрыва назад по течению, в результате чего снижается лобовое сопротивление системы. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от угла установки передних дефлекторов показана на рис. 7. Для случая одного дефлектора минимальный коэффициент лобового сопротивления комбинации цилиндр-дефлектор равен 0,45 при  $\delta=20^0$  (рис. 7, а), а для случая с двумя дефлекторами – 0,50 (рис. 7 б). Небольшое возрастание коэффициента сопротивления на величину 0,05 связано с добавлением собственного

сопротивления второго дефлектора. Результат моделирования при разных относительных хордах дефлекторов ( $\bar{b}=0,05; 0,1; 0,25; 0,5$ ) показан на рис.8 и рис. 9.



а) один дефлектор; б) два дефлектора

Рис. 7 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления от угла установки дефлекторов

Из рис. 9 следует, что с увеличением хорды эффект конфузора возрастает и лобовое сопротивление цилиндра снижается, однако, при дальнейшем увеличении хорды растёт лобовое сопротивление самих дефлекторов, что приводит к возрастанию сопротивления всей системы, поэтому существует рациональное значение  $\bar{b}=0,25$ , при котором минимальный коэффициент сопротивления равен  $C_{xa}=0,48$ .

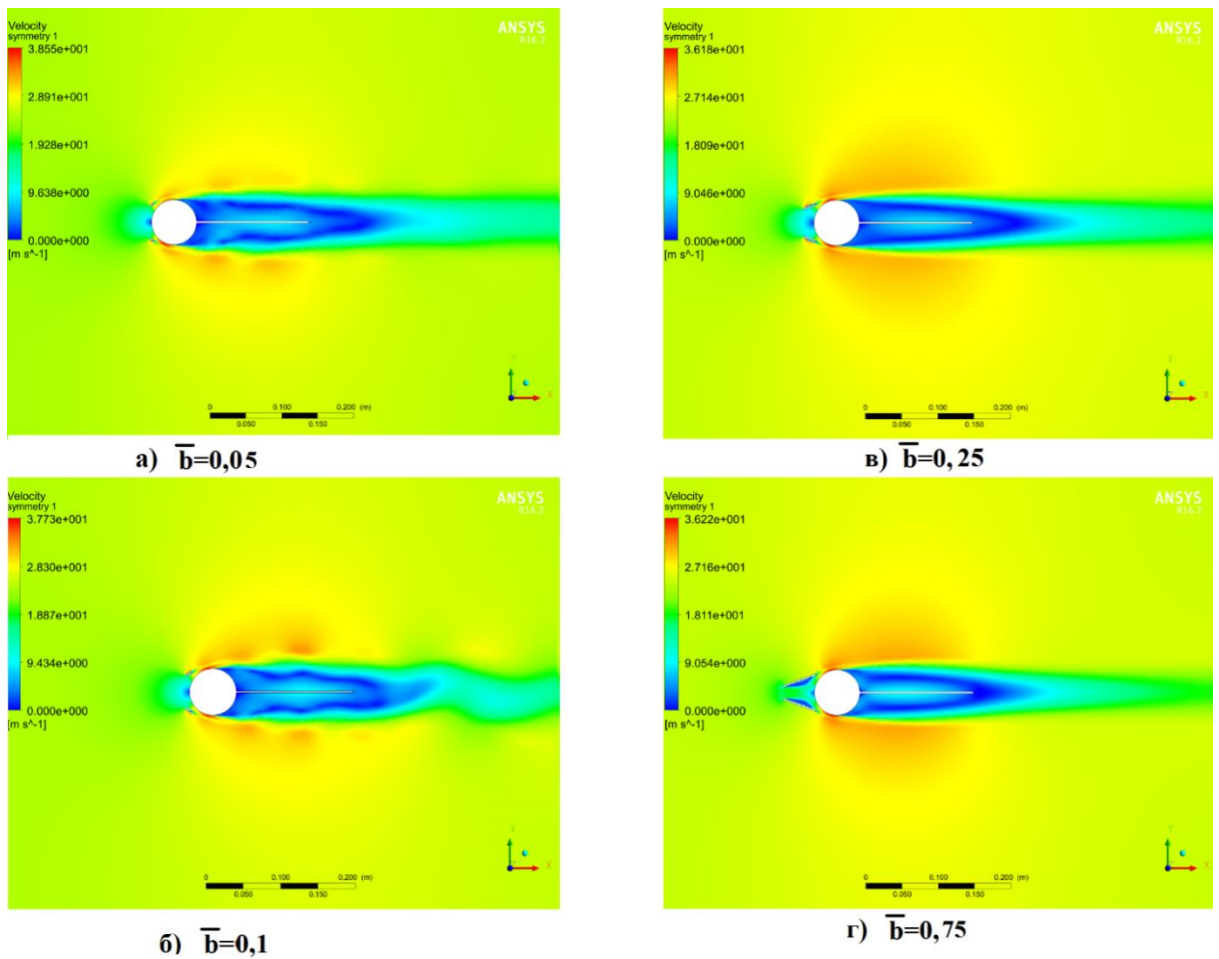


Рис. 8 – Поле скорости при разных хордах передних дефлекторов

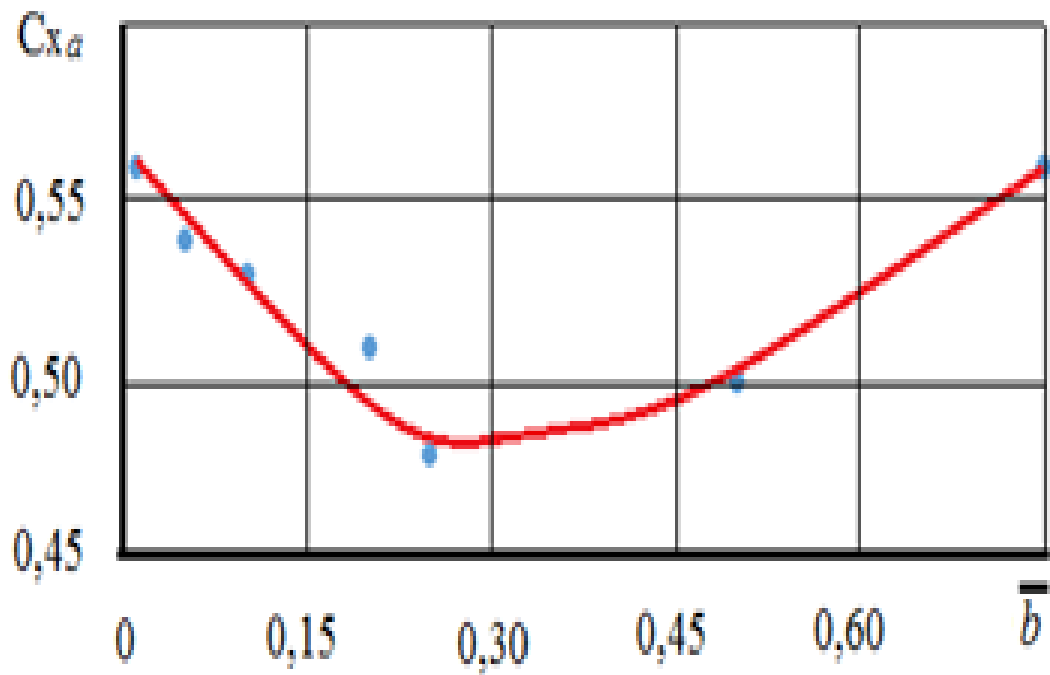


Рис.9 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления от хорды дефлекторов при  $\theta = 40^\circ$ ,  $\delta = 20^\circ$

## Выводы

Показано, что коэффициент лобового сопротивления системы цилиндра с задней разделительной пластиной при числе  $Re=10^5$  имеет минимальное значение  $C_{xa} = 0,683$  при относительной длине пластины  $\bar{l} \approx 4$ . Выявлена закономерность между количеством, хордой дефлекторов, их расположением и коэффициентом лобового сопротивления системы «цилиндр-задняя пластина» с передними дефлекторами.

Установлено, что коэффициент сопротивления комбинации цилиндра с одним плоским дефлектором, установленным спереди с углом установки  $\delta=20^\circ$  и хордой  $\bar{b}=0,5$  при наличии дополнительной задней разделительной пластины, расположенной в плоскости симметрии может достигать минимального значения  $C_{xa}=0,45$ , что является наименьшим значением, чем для случая использования только передних дефлекторов [21].

## Список источников

1. Догваль А.В. Применение отсоса потока для управления сходом крупномасштабных вихрей при отрыве пограничного слоя // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 4 (278). С. 60-65.
2. Корнилов В.И. Управление турбулентным пограничным слоем путём вдува воздуха за счёт ресурсов внешнего потока // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 4. С. 429-443.

3. Абрамова К.А., Судаков В.Г. Оптимизация управления течением с помощью тангенциального выдува на трансзвуковом профиле крыла // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=104133>
4. Захаренков М.Н. Учёт зависимости вязкости от температуры в задачах обтекания цилиндра несжимаемой средой // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. № 4. С. 563-590.
5. Гайфуллин А.М., Хайруллин К.Г. Управление бафтингом с помощью движущейся поверхности // Прикладная математика и техническая физика. 2020. Т. 61. № 6 (364). С. 91-99. DOI: [10.15372/PMTF20200612](https://doi.org/10.15372/PMTF20200612)
6. Choi H., Jeon W.P., Kim J. Control of flow over a bluff body // Annual Review of Fluid Mechanics, 2008, vol. 40, pp. 113–139. DOI: [10.1146/annurev.fluid.39.050905.110149](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.39.050905.110149)
7. Сакорнсин Р., Попов С.А. Улучшение аэродинамических характеристик комбинированного крыла путем добавления треугольного выступа // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35943>
8. Скорынина, А.О., Ерохин П.В., Артамонова Л.Г. Определение влияния дополнительного органа управления (щитком) на аэродинамические характеристики профиля крыла // Труды МАИ. 2012. № 61. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35658>
9. Apelt C.J., West G.S., Szewczyk A.A. The effects of wake splitter plates on the flow past a circular cylinder in the range  $10^4 < Re < 5 \times 10^4$  // Journal of Fluid Mechanics, 1973, vol. 61 (01), pp. 187–198. DOI: [10.1017/S0022112073000649](https://doi.org/10.1017/S0022112073000649)
10. ANSYS FLUENT, Theory Guide (Release 16.2). ANSYS, Inc., 2015.



11. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. Second Edition. Palm Drive: DCW Industries Inc., 2004, 540 p.
12. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal, 1994, vol. 32, no. 8. pp. 269–289. DOI: [10.2514/3.12149](https://doi.org/10.2514/3.12149)
13. Basohbatnovinzad M., Shams M., Pouryoussefi S.G. et al. Experimental and numerical investigation of flow around an inline square cylinder array at a high Reynolds number // Archive of Applied Mechanics, 2022, vol. 92, pp. 3433–3446. DOI: [10.1007/s00419-022-02284-1](https://doi.org/10.1007/s00419-022-02284-1)
14. Dewanshu D., Ashwin S., Senthilkumar S. POD analysis of the wake behind a circular cylinder with splitter plate // European Journal of Mechanics, – B /Fluids, 2022, vol. 93, pp. 1-12. DOI: [10.1016/j.euromechflu.2021.12.010](https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2021.12.010)
15. Котовский В.Н., Ништ М.И., Федоров Р.М. Математическое моделирование на ЭВМ стационарного и нестационарного обтекания телесных профилей и решеток идеальной несжимаемой жидкостью // Доклады АН СССР. 1980. Т. 252. № 6. С. 1341-1345.
16. Козлова А.С. Сравнение стационарного и нестационарного решений для задач обтекания эллиптических цилиндров в программе FLOW SIMULATION // XXI Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов (Самара, 13-15 июня 2018): сборник трудов. - Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2019. С. 46-49.
17. Anderson E, Szewczyk A. Effects of a splitter plate on the near wake of a circular cylinder in 2 and 3-dimensional flow configurations // Experiments in Fluids, 1997, vol. 23, pp. 161–174. DOI: [10.1016/s0894-1777\(97\)10009-7](https://doi.org/10.1016/s0894-1777(97)10009-7)

18. Чжен П. Отрывные течения. – М.: Мир, 1972. – 298 с.
19. Wieselsberger C. Neuere Feststellungen über die Gesetze des flüssigkeits und Luftwiderstands // *Physikalische Zeitschrift*, 1921, vol. 22, pp. 321–328.
20. Achenbach E. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to  $Re=5 \times 10^6$  // *Journal of Fluid Mechanics*, 1968, vol. 34 (4), pp. 625-639.
21. Frolov V.A., Kozlova A.S. Reducing cylinder drag by adding a plate // *AIP Conference Proceeding*, U.S.A., 2017, vol. 1893 (1), pp. 030074. DOI: [10.1063/1.5007532](https://doi.org/10.1063/1.5007532)

## References

1. Dogval' A.V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2006, vol. 47, no. 4 (278), pp. 60-65.
2. Kornilov V.I. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 429-443.
3. Abramova K.A., Sudakov V.G. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104133>
4. Zakharenkov M.N. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2007, vol. 14, no. 4, pp. 563-590.
5. Gaifullin A.M., Khairullin K.G. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika*, 2020, vol. 61, no. 6 (364), pp. 91-99. DOI: [10.15372/PMTF20200612](https://doi.org/10.15372/PMTF20200612)
6. Choi H., Jeon W.P., Kim J. Control of flow over a bluff body, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, vol. 40, pp. 113–139. DOI: [10.1146/annurev.fluid.39.050905.110149](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.39.050905.110149)
7. Sakornsinsin R., Popov S.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35943>

8. Skorynina, A.O., Erokhin P.V., Artamonova L.G. *Trudy MAI*, 2012, no. 61. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35658>
9. Apelt C.J., West G.S., Szewczyk A.A. The effects of wake splitter plates on the flow past a circular cylinder in the range  $10^4 < Re < 5 \times 10^4$ , *Journal of Fluid Mechanics*, 1973, vol. 61 (01), pp. 187–198. DOI: [10.1017/S0022112073000649](https://doi.org/10.1017/S0022112073000649)
10. ANSYS FLUENT, *Theory Guide (Release 16.2)*. ANSYS, Inc., 2015.
11. Wilcox D.C. *Turbulence modeling for CFD*. Second Edition. Palm Drive: DCW Industries Inc., 2004, 540 p.
12. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8. pp. 269–289. DOI: [10.2514/3.12149](https://doi.org/10.2514/3.12149)
13. Basohbatnovinzad M., Shams M., Pouryoussefi S.G. et al. Experimental and numerical investigation of flow around an inline square cylinder array at a high Reynolds number, *Archive of Applied Mechanics*, 2022, vol. 92, pp. 3433–3446. DOI: [10.1007/s00419-022-02284-1](https://doi.org/10.1007/s00419-022-02284-1)
14. Dewanshu D., Ashwin S., Senthilkumar S. POD analysis of the wake behind a circular cylinder with splitter plate, *European Journal of Mechanics, – B /Fluids*, 2022, vol. 93, pp. 1-12. DOI: [10.1016/j.euromechflu.2021.12.010](https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2021.12.010)
15. Kotovskii V.N., Nisht M.I., Fedorov P.M. *Doklady AN SSSR*, 1980, vol. 252, no. 6, pp. 1341-1345.
16. Kozlova A.S. *XXI Vserossiiskii seminar po upravleniyu dvizheniem i navigatsii letatel'nykh apparatov: sbornik trudov*. Samara, Izd-vo SNTs RAN, 2019, pp. 46-49.

17. Anderson E, Szewczyk A. Effects of a splitter plate on the near wake of a circular cylinder in 2 and 3-dimensional flow configurations, *Experiments in Fluids*, 1997, vol. 23, pp. 161–174. DOI: [10.1016/s0894-1777\(97\)10009-7](https://doi.org/10.1016/s0894-1777(97)10009-7)
18. Chzhen P. *Otryvnye techeniya* (Separated flows), Moscow, Mir, 1972. 298 p.
19. Wieselsberger C. Neuere Feststellungen über die Gesetze des flüssigkeits und Luftwiderstands, *Physikalische Zeitschrift*, 1921, vol. 22, pp. 321–328.
20. Achenbach E. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to  $Re=5 \times 10^6$ , *Journal of Fluid Mechanics*, 1968, vol. 34 (4), pp. 625-639.
21. Frolov V.A., Kozlova A.S. Reducing cylinder drag by adding a plate, *AIP Conference Proceeding*, U.S.A., 2017, vol. 1893 (1), pp. 030074. DOI: [10.1063/1.5007532](https://doi.org/10.1063/1.5007532)

Статья поступила в редакцию 29.11.2023

Одобрена после рецензирования 10.01.2024

Принята к публикации 27.02.2024

The article was submitted on 29.11.2023; approved after reviewing on 10.01.2024; accepted for publication on 27.02.2024