

Научная статья
УДК 533.6.013.12

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181878>

КОЭФФИЦИЕНТ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА КОНЕЧНОГО УДЛИНЕНИЯ С ПЛАСТИНАМИ

Ван Ха Ле^{1✉}, Владимир Алексеевич Фролов², Аклилу Йигезу Гермамо³

^{1,2,3}Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.

Королёва, Самара, Россия

¹halevan@mail.ru ✉

²frolov_va_ssau@mail.ru

³germamo@mail.ru

Аннотация. Проведённые результаты математического моделирования в пакетах Ansys Fluent и Flow Simulation течения вокруг системы цилиндра с пластинами в двумерном случае показали, что с их установкой можно существенно снизить коэффициент лобового сопротивления системы «цилиндр-пластины» примерно на 60% по сравнению с изолированным цилиндром. В данной работе представлен результат определения коэффициента лобового сопротивления изолированного цилиндра конечного удлинения и системы цилиндра с пластинами, полученный в эксперименте, проведенным в аэродинамической трубе АДТ-3 Самарского университета. Показана эффективность метода снижения лобового сопротивления цилиндра за счёт установки плоской разделяющей пластины сзади и дефлекторов спереди вблизи его поверхности при числе Рейнольдса $Re=8,4 \cdot 10^4$.

Экспериментальный результат показывает, что уменьшение сопротивления системы цилиндра с пластинами достигает 28% по сравнению с изолированным цилиндром конечного удлинения. Установлено, что эффект снижения сопротивления в трёхмерном обтекании слабее, чем для двумерного случая.

Ключевые слова: цилиндр конечного удлинения с пластинами, аэродинамическая труба, малые дозвуковые скорости, методы снижения сопротивления

Для цитирования: Ле В.Х., Фролов В.А., Гермамо А.Й. Коэффициент лобового сопротивления круглого цилиндра конечного удлинения с пластинами // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181878>

Original article

DRAG COEFFICIENT OF A FINITE LENGTH CIRCULAR CYLINDER WITH PLATES

Van Ha Le¹✉, Vladimir A. Frolov², Aklilu Y. Germamo³

^{1,2,3}Samara National Research University,

Samara, Russia

¹halevan@mail.ru ✉

²frolov_va_ssau@mail.ru

³germamo@mail.ru

Abstract: The problem of determining the drag coefficient of an isolated cylinder in a three-dimensional case has been studied in many works. Theoretical and experimental studies show that flow characteristics (including drag coefficients of cylinder of various

elongations) depend not only on the flow regime (or Reynolds number as in the two-dimensional case), but also on the elongation of the cylinder. It was found that due to the tightening along the flow regime, in the region of Reynolds numbers corresponding to laminar flow, the drag coefficients of a low aspect ratio cylinder are less than those of a large aspect ratio cylinder. In the region of Reynolds numbers corresponding to turbulent flow, the drag coefficient of the cylinder almost does not change and does not depend on the elongation.

Calculations show that the effect of reducing the drag coefficient in the two-dimensional case of a cylinder-plate system can reach up to 60%. It is practically important to conduct an experiment in a wind tunnel in order to find out whether this tendency is maintained for a three-dimensional flow and to what extent the drag reduction effect is realized in this case.

In this work, the authors present the result of determining the drag coefficient of an isolated cylinder of finite elongation and a combination of cylinder with plates, obtained in the wind tunnel ADT-3 of Samara University. The effectiveness of the method for reducing the drag of a cylinder by installing a flat plate at the rear and deflectors at the front near its surface at Reynolds number $Re=8.4 \cdot 10^4$ is shown. The experimental result shows that the drag reduction of system cylinder with plates reaches 28% compared to the isolated finite elongation cylinder. It has been established that the effect of reducing drag in a three-dimensional flow is weaker than for the two-dimensional case.

Keywords: drag reduction, aspect ratio, ADT-3 wind tunnel, cylinder-plate system, drag coefficient, low subsonic speeds

For citation: Le V.H., Frolov V.A., Germamo A.Y. Drag coefficient of a finite length circular cylinder with plates. *Trudy MAI*, 2024, no. 137. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181878>

Введение

Явление снижения лобового сопротивления круглых цилиндров исследовано в разных работах [1-8] (активные и пассивные методы). Для удобообтекаемых тел снижение лобового сопротивление достигается удерживанием ламинарного пограничного слоя (ЛПС) на поверхности тела. Чем протяжённее зона ЛПС на поверхности, тем меньше профильное сопротивление обтекаемого тела. Однако для плохообтекаемых тел (цилиндр, сфера и т.д.), метод реализации снижения сопротивления является иным. Турбулентный пограничный слой (ТПС) имеет бóльшую кинетическую энергию, что позволяет частицам в нижних слоях пограничного слоя двигаться дальше, не отрываясь от поверхности тела. В случае ТПС отрыв на поверхности цилиндра происходит позже, поэтому след за телом имеет меньшую высоту. В результате чего сопротивление давления цилиндра снижается, которое составляет значительную часть от общего сопротивления, поскольку сопротивление трения пренебрежимо мало (менее 1%) [9]. Это основной принцип методов снижения лобового сопротивления плохообтекаемых тел. Такое отличие в реализации метода снижения сопротивления описано в работах [10, 11].

Задача обтекания изолированного цилиндра и цилиндра с пластинами изучена теоретически методом с помощью математического моделирования и экспериментально [1-4]. Как показано на рис. 1, высота области аэродинамического

следа в случае установки пластин вблизи цилиндра (б) меньше, чем в случае изолированного цилиндра (а), в результате чего сила лобового сопротивления у системы цилиндра с пластинами меньше, чем у изолированного цилиндра.

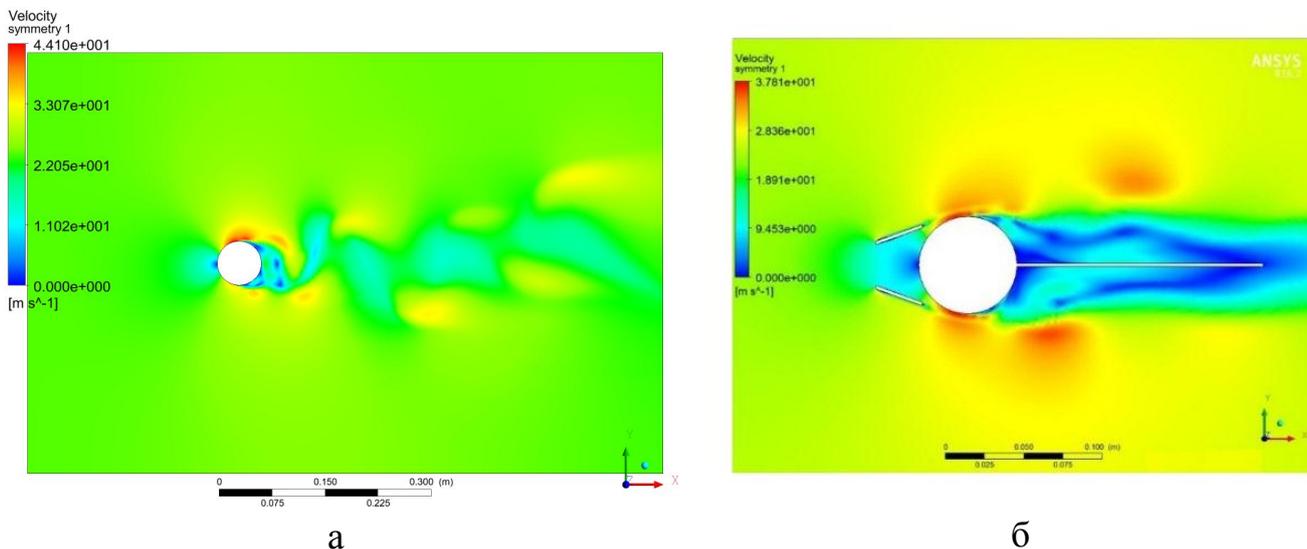


Рис. 1. Поле скоростей для изолированного цилиндра (а) и для системы цилиндра с пластинами (б)

Расчёт показал [1, 4], что эффект снижения коэффициента лобового сопротивления в двумерном случае системы цилиндра с пластинами может достигать 60%. Практически важно проведение эксперимента в АДТ и моделирование течения около конечного цилиндра для того, чтобы узнать, сохраняется ли эта тенденция для трёхмерного течения и насколько эффект снижения сопротивления реализуется в этом случае?

С целью подтверждения достоверности экспериментальных результатов, полученных методом импульсов и теоретических данных, вычисленных применением пакета Flow Simulation в работе [3] для коэффициента сопротивления системы цилиндра бесконечного удлинения с передними пластинами (дефлекторами) в данной работе выполнено дополнительное исследование в вычислительном пакете Ansys Fluent [12], которое показало хорошее согласование расчётных данных в двух

вычислительных пакетах с экспериментальными данными, полученными в АДТ. На основе проведённого исследования и результатах работ [1-4] были выбраны рациональные геометрические характеристики передних дефлекторов и задней разделительной пластины, позволяющие достичь максимального снижения сопротивления системы «цилиндр-пластины».

1. Постановка задачи

Задача определения коэффициент лобового сопротивления изолированного цилиндра в трёхмерном случае была исследована во многих работах экспериментальным путём [8-10], а в работах [9, 10, 13-15], получено, что коэффициенты сопротивления цилиндрических тел различного удлинения зависят не только от числа Рейнольдса как в двумерном случае, но и от удлинения цилиндра. Результаты экспериментов показывают, что коэффициент сопротивления цилиндра увеличивается с ростом его удлинения.

В данной работе представлены результаты эксперимента авторов, сравнение с полученными результатами математического моделирования в Ansys Fluent [1, 2] и с ранее известными экспериментальными результатами, изложенными в статьях [9, 10, 13-20].

Две задачи, которые решаются в данной работе:

- определение коэффициента лобового сопротивления изолированного цилиндра конечного удлинения;
- определение коэффициента лобового сопротивления для системы «цилиндр конечного удлинения-пластины».

2. Экспериментальное оборудование и методика проведения исследований

Эксперименты проводились в АДТ-3 Самарского университета [21]. АДТ представляет собой трубу малых дозвуковых скоростей постоянного действия с замкнутым аэродинамическим контуром и открытой рабочей частью, одним обратным каналом, расположенным в вертикальной плоскости. Схема, технические характеристики и подробное описание трубы Т-3 и измерительного комплекса представлены в работе [21]. Эксперимент проводился при постоянном значении скорости потока $V=25$ м/с и степени турбулентности в рабочей части АДТ-3 примерно равной 0,8%.

Объект испытания цилиндр представляет собой тонкостенную трубу с внешней полированной поверхностью, в торцах которой установлены скругленные заглушки малой кривизны. Размеры цилиндра: диаметр $D=50$ мм, длина $L=450$ мм (ограничена размером рабочей части трубы, ширина рабочей части которой равна 600 мм).

Удлинение цилиндра равно

$$\lambda = \frac{L}{D} = 9 \text{ или } \frac{1}{\lambda} = \frac{D}{L} = 0,111. \quad (1)$$

По классификации [10] в данном случае цилиндр считается телом малого удлинения, поскольку $\lambda < 10$.

Цилиндр во время эксперимента находился в фиксированном положении – поперек потока в АДТ и был укреплен на тензодержавке внутримодельных весов. Задняя разделительная пластина была выполнена из оргстекла толщиной 2 мм, длиной 450 мм (что соответствует длине цилиндра) с разными относительными

хордами $\bar{l}=b/D \in [1; 5]$. Передние дефлекторы представляли собой металлические полоски толщиной 2 мм, длиной 450 мм и хордой равной 20 мм ($b/D=0,4$). Дефлекторы крепились с помощью специальных муфт, позволяющих установить верхний и нижний дефлекторы симметрично относительно горизонтальной плоскости симметрии и на заданном меридиональном угле установки относительно цилиндра (рис.2).



Рис. 2. Фото цилиндра с пластинами, установленного в АДТ Т-3

Коэффициент лобового сопротивления C_{xa} вычислялся по формуле

$$C_{xa} = \frac{X_a}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S} \quad (2)$$

где X_a – сила лобового сопротивления, Н; ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; V_∞ – скорость набегающего потока, $\text{м}/\text{с}$; S – характерная площадь, в трёхмерном случае $S=L \cdot D$, м^2 .

3. Основные результаты исследований

3.1. Определение коэффициента сопротивления изолированного конечного цилиндра

Условия проведения эксперимента соответствовали температуре воздуха $T=295$ К и атмосферному давлению $p=752$ мм рт. ст. Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру цилиндра равно

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1,205 [\text{кг}/\text{м}^3] \cdot 25 [\text{м}/\text{с}] \cdot 0,05 [\text{м}]}{1,81 \cdot 10^{-5} [\text{Па} \cdot \text{с}]} = 8,4 \cdot 10^4 \quad (3)$$

В эксперименте проводилась сначала продувка только державки, что дало значение силы сопротивления $X_{\text{державка}}=0,2$ Н. Продувка изолированного цилиндра с державкой определила значение силы лобового сопротивления $X=7,75$ Н. Таким образом продольная сила при поперечном обтекании цилиндра соответствовала $X_{\text{цилиндр}}=7,55$ Н. Коэффициент лобового сопротивления (2) имеет значение

$$C_{xa} = \frac{X}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} = \frac{X}{qLD} = \frac{7,55 [H]}{395 [Па] \cdot 0,0225 [м^2]} \approx 0,850 \quad (4)$$

На рис. 3 показано сравнение результата данного физического эксперимента с результатами вычислительного эксперимента и данными других авторов.

Перегудова (см. работу [10]), а фиолетовая сплошная линия — это аппроксимация всех результатов, включая экспериментальные и расчётные данные, полученная по методу наименьших квадратов авторами данной работы. Данная зависимость $C_{xa}\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ хорошо аппроксимируется формулой:

$$C_{xa}\left(\frac{1}{\lambda}\right) = 0,60 + \frac{0,60}{0,60 \cdot \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 + 20,96 \cdot \left(\frac{1}{\lambda}\right) + 1,0}. \quad (5)$$

Рассмотрим некоторые асимптотики данной функции аппроксимации:

- при $1/\lambda \rightarrow 0$ или $\lambda \rightarrow \infty$, что соответствует обтеканию цилиндра бесконечного удлинения, в котором отсутствуют эффекты отрыва потока на двух торцах цилиндра, поэтому течение можно считать двумерным, согласно [1, 3, 9-11, 13, 16-20] $C_{xa} \approx 1,2$;
- при $1/\lambda = 0,2$, согласно [15] $C_{xa} \approx 0,71$;
- при $1/\lambda = 1,25$ и $1/\lambda = 2,25$, согласно [9] $C_{xa} \approx 0,61$.

Таким образом, полученная аппроксимационная функция (5) хорошо описывает изменение коэффициента сопротивления в диапазоне обратных удлинений $1/\lambda \in [0; 2,5]$.

Можно также отметить хорошее согласование результатов эксперимента, полученного тензометрическим методом $C_{xa} \approx 0,85$ и расчёта в Ansys Fluent $C_{xa} \approx 0,8$, полученных авторами данной работы для изолированного цилиндра с удлинением равным 9,0 ($1/\lambda \approx 0,111$, красный эллипс на рис. 3) с величиной коэффициента лобового сопротивления, полученного в эксперименте $C_{xa} \approx 0,8$ [13, 16, 20], что говорит о высокой достоверности, представленных данных на рис. 3.

3.2. Оценка метода снижения сопротивления за счёт установки пластин вблизи его поверхности

В работе подтверждается ранее обнаруженный эффект снижения лобового сопротивления бесконечного цилиндра [1-4] применением пассивного метода за счёт установки пластин вблизи поверхности цилиндра конечного удлинения. В эксперименте фиксированы 3 положения передних дефлекторов, соответствующих их меридиональным углам $\theta = \{20^0; 40^0; 60^0\}$. Для каждого значения угла θ изменялись относительные хорды задней пластины $\bar{l} = b/D \in [1; 5]$. Зависимость $C_{xa} = f(\bar{l})$ при симметричном расположении передних дефлекторов с углом $\theta = 40^0$ приведена на рис. 4. Для других углов $\theta = 20^0$ и $\theta = 60^0$ получены аналогичные зависимости.

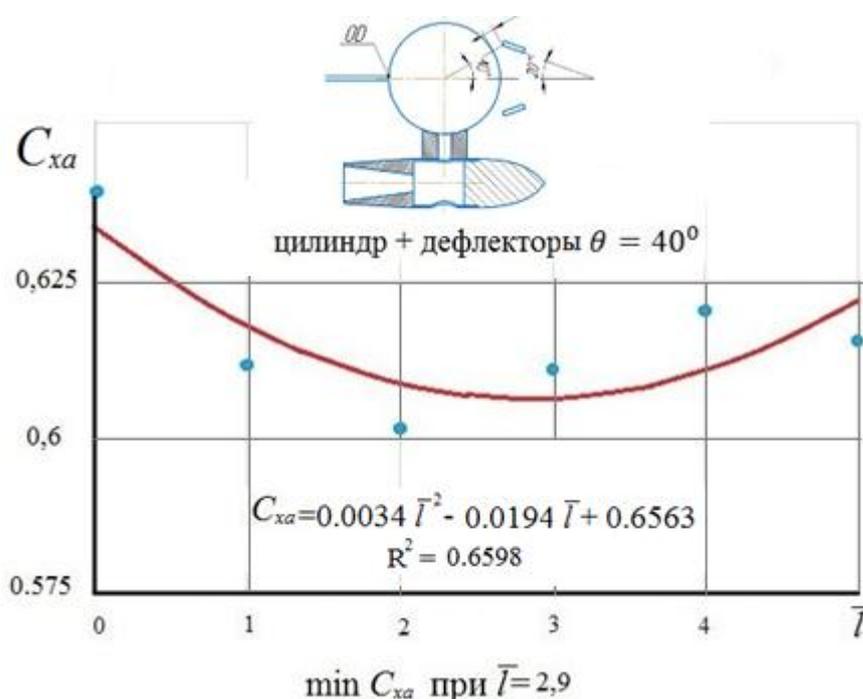


Рис. 4. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от относительной длины задней пластины при угле расположения дефлекторов $\theta = 40^0$

На рис.4 R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации, который показывает степень соответствия трендовой модели исходным данным. Его значение может

лежать в диапазоне от 0 до 1. Чем ближе R^2 к 1,0, тем точнее модель описывает имеющиеся данные [22]. Для всех вариантов расположения дефлекторов, результаты эксперимента аппроксимированы кривыми второго порядка методом наименьших квадратов [23]. Наилучшая относительная хорда пластины примерно равна $\bar{l} \approx 3$.

На рис. 5 показана зависимость значений коэффициента лобового сопротивления от меридиональных углов θ при разных относительных хордах задней пластины. Отмечено, что в трёх случаях, для конкретного значения относительной хорды задней пластины, дефлекторы с углом расположения $\theta = 40^\circ$ дают наименьшее сопротивление.

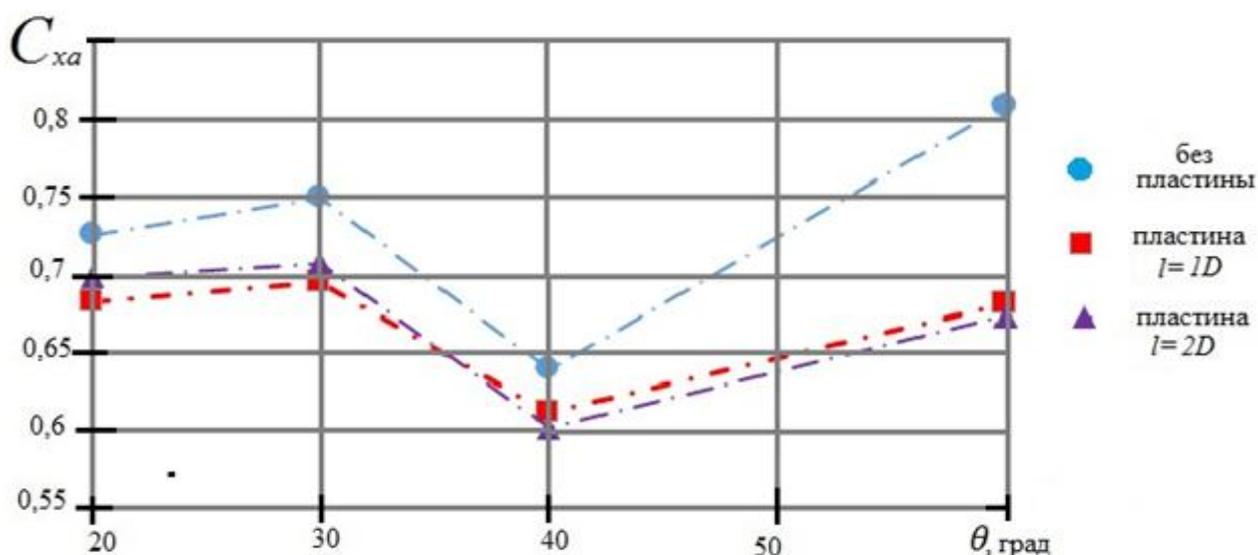


Рис. 5. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от угла расположения дефлекторов и хорды задней разделительной пластины

На рис. 6 проведены зависимости отношений сопротивления цилиндра с пластинами к сопротивлению изолированного цилиндра от относительной хорды задней пластины ($C_{xa0}=0,85$ – сопротивление изолированного цилиндра).

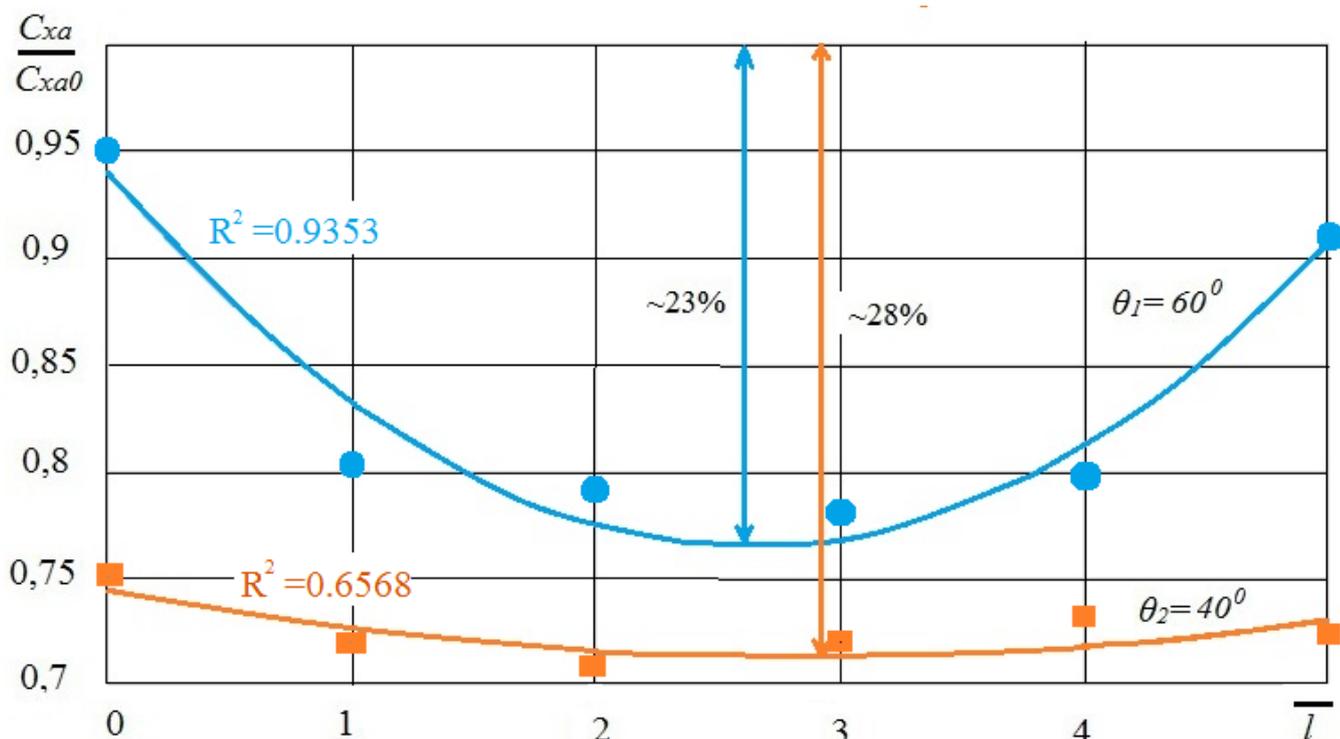


Рис. 6. Зависимости относительного коэффициента сопротивления от безразмерной хорды задней пластины и двух углов установки передних дефлекторов

Установлено, что в трёхмерном случае цилиндр с задней пластиной и передними дефлекторами снижает сопротивление системы примерно на 23% и 28% в зависимости от меридионального угла установки передних дефлекторов, в то время как в двумерном случае снижение составляет 60% [1-3]. Таким образом эффект снижения сопротивления цилиндра конечного удлинения за счёт установки пластин слабее, чем на бесконечном цилиндре.

Выводы

Представлены результаты эксперимента и моделирования в вычислительном пакете Ansys Fluent по определению коэффициента сопротивления изолированного цилиндра конечного удлинения и системы цилиндра с пластинами. Достоверность эксперимента показана сравнением полученных значений коэффициента

сопротивления с расчётными и экспериментальными результатами, а также с ранее известными данными других авторов.

Выявлена зависимость коэффициента лобового сопротивления системы цилиндра с пластинами от их количества, хорд пластин, расположения передних дефлекторов и наличия задней пластины. Подтверждён ранее обнаруженный эффект снижения сопротивления цилиндра за счёт установки плоских пластин вблизи передней поверхности цилиндра. Показано, что наилучшая относительная длина задней пластины примерно равна $\bar{l} \approx 3$, а рациональный угол расположения передних дефлекторов, обеспечивающий максимальное снижение лобового сопротивления равен $\theta = 40^\circ$. Этот вывод можно рекомендовать для практики конструирования и проектирования объектов, находящихся в воздушном потоке и имеющих цилиндрическое сечение.

Список источников

1. Frolov V.A., Le V.На. Drag coefficient of a cylinder with a flat plate behind it // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2023, vol. 64, issue 6, no. 6, pp. 993-999. DOI: [10.1134/S0021894423060081](https://doi.org/10.1134/S0021894423060081)
2. 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>
3. 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)

4. Фролов В.А., Козлова А.С. Способ снижения лобового сопротивления круглого цилиндра при поперечном обтекании за счет установки пластин вблизи тела. Патент № 2731461 РФ, 03.09.2020.
5. 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)
6. 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>
7. Faezeh Eydi, Afsaneh Mojra. A numerical study on the benefits of passive-arc plates on drag and noise reductions of a cylinder in turbulent flow // Physics of Fluids, 2023, vol. 35 (8). DOI: [10.1063/5.0156197](https://doi.org/10.1063/5.0156197)
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. Яковлевский О.В., Семенчиков, Н.В. Аэродинамика плохообтекаемых тел. – М.: МАИ, 1986. – 82 с.
10. Девнин С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций. – Л.: Судостроение, 1983. – 320 с.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
12. ANSYS FLUENT, Theory Guide (Release 16.2). ANSYS, Inc., 2015.

13. Головкин М.А., Грудинин М.В. и др. Коэффициенты аэродинамического сопротивления круговых цилиндров конечного удлинения при малых дозвуковых скоростях // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178468>
14. Башкин В.А., Егоров И.В. и др. Поперечное обтекание кругового цилиндра трансзвуковым ($M_\infty=0.8$) потоком при больших числах Рейнольдса // Ученые записки ЦАГИ. 2012. Т. XLIII. № 5. С. 27-45.
15. Березин М.А., Катюшин В.В. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. – Новосибирск: Олден-полиграфия, 2003. – 130 с.
16. Головкин М.А., Грудинин М.В. и др. Исследование аэродинамического сопротивления круговых цилиндров в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью // Учёные записки ЦАГИ. 2023. Т. LIV. № 3. С. 3-9.
17. Hoerner S.F. Fluid-dynamic drag. Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance, USA, Brick Town, 1965, 455 p.
18. Девнин С.Н. Аэрогидродинамический расчет плохообтекаемых судовых конструкций. – Л.: Судостроение, 1967. - 224 с.
19. Wieselsberger C. Neuere Feststellungen über die Gesetze des flüssigkeits und Luftwiderstands // Physikalische Zeitschrift, 1921, vol. 22, pp. 321–328.
20. Potts Douglas A., Binns Jonathan R., Potts Andrew E., Marcollo Hayden, The Effect of Aspect Ratio on the Drag of Bare Cylinders // Proceedings of the 38th OMAE Conference, OMAE2019-96341, Glasgow, Scotland, 2019. DOI: [10.1115/OMAEE2019-96431](https://doi.org/10.1115/OMAEE2019-96431)
21. Комаров В.А., Тарасов В.В. и др. Вузовская учебно-исследовательская аэродинамическая труба // Полёт. 2006. № 10. С. 23-40.

22.Бахрушин В.Е. Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей // Системные технологии. 2011. № 2 (73). С. 9-14.

23.Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1962. – 349 с.

References

1. Frolov V.A., Le V.Kh. Drag coefficient of a cylinder with a flat plate behind it, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2023, vol. 64, issue 6, no. 6, pp. 993-999.

DOI: [10.1134/S0021894423060081](https://doi.org/10.1134/S0021894423060081)

2. Le V.Kh., Frolov V.A. *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178469>

3. 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)

4. Frolov V.A., Kozlova A.C. *Patent № 2731461 RF*, 03.09.2020.

5. 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)

6. Sakornsin R., Popov S.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35943>

7. Faezeh Eydi, Afsaneh Mojra. A numerical study on the benefits of passive-arc plates on drag and noise reductions of a cylinder in turbulent flow, *Physics of Fluids*, 2023, vol. 35 (8). DOI: [10.1063/5.0156197](https://doi.org/10.1063/5.0156197)

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. Yakovlevskii O.V., Semenchikov, N.V. *Aerodinamika plokhoobtekaemykh tel* (Aerodynamics of bluff bodies), Moscow, MAI, 1986, 82 p.
10. Devnin S.I. *Aerogidromekhanika plokhoobtekaemykh konstruksii* (Aerodynamics of bluff structures), Leningrad, Sudostroenie, 1983, 320 p.
11. Shlikhting G. *Teoriya pogramichnogo sloya* (Theory of the boundary layer), Moscow, Nauka, 1974, 712 p.
12. ANSYS FLUENT, Theory Guide (Release 16.2). ANSYS, Inc., 2015.
13. Golovkin M.A., Grudin M.V. et al. *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178468>
14. Bashkin V.A., Egorov I.V. et al. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2012, vol. XLIII, no. 5, pp. 27-45.
15. Berezin M.A, Katyushin V.V. *Atlas aerodinamicheskikh kharakteristik stroitel'nykh konstruksii* (Atlas of aerodynamic characteristics of building structures), Novosibirsk, Olden-poligrafiya, 2003, 130 p.
16. Golovkin, M.A., Grudin M.V. et al. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2023, vol. LIV, no. 3, pp. 3-9.
17. Hoerner S.F. *Fluid-dynamic drag. Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance*, USA, Brick Town, 1965, 455 p.
18. Devnin S.N. *Aerogidrodinamicheskii raschet plokhoobtekaemykh sudovykh konstruksii* (Aerohydrodynamic calculation of bluff ship structures), Leningrad, Sudostroenie, 1967, 224 p.
19. Wieselsberger C. Neuere Feststellungen über die Gesetze des flüssigkeits und Luftwiderstands, *Physikalische Zeitschrift*, 1921, vol. 22, pp. 321–328.

20. Potts Douglas A., Binns Jonathan R., Potts Andrew E., Marcollo Hayden, The Effect of Aspect Ratio on the Drag of Bare Cylinders, *Proceedings of the 38th OMAE Conference*, OMAE2019-96341, Glasgow, Scotland, 2019. DOI: [10.1115/OMAEE2019-96341](https://doi.org/10.1115/OMAEE2019-96341)
21. Komarov V.A., Tarasov V.V. et al. *Polet*, 2006, no. 10, pp. 23-40.
22. Bakhrushin V.E. *Sistemnye tekhnologii*, 2011, no. 2 (73), pp. 9-14.
23. Linnik Yu.V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nablyudenii* (The least squares method and the foundations of the mathematical and statistical theory of observation processing), Moscow, Fizmatgiz, 1962, 349 p.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024

Одобрена после рецензирования 30.07.2024

Принята к публикации 28.08.2024

The article was submitted on 03.06.2024; approved after reviewing on 30.07.2024; accepted for publication on 28.08.2024