

СЕКЦИЯ № 3. АЭРОДИНАМИКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Председатели: к.т.н., доцент Фролов В.А.
к.т.н., профессор, Шахов В.Г.*

УДК 533.6.013.12

Ле Ван Ха

ЭФФЕКТ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРА КОНЕЧНОГО УДЛИНЕНИЯ ЗА СЧЁТ УСТАНОВКИ ПЛОСКИХ ПЛАСТИН

Согласно [1, 2] установка плоских пластин может существенно снизить коэффициент лобового сопротивления системы «цилиндр-пластины» до 60% по сравнению с изолированным цилиндром. Представляет интерес экспериментальная проверка эффективности этого метода снижения лобового сопротивления в случае цилиндра с конечным удлинением.

В данной работе представлены результаты эксперимента и сравнение с полученными значениями математического моделирования в Ansys Fluent [3] и с ранее известными экспериментальными результатами других авторов [4-8]. По полученным значениям коэффициента лобового сопротивления выявлены зависимости этого коэффициента от количества пластин, хорды пластин и их расположения.

Две задачи, которые решаются в данной работе:

- определить коэффициент лобового сопротивления для изолированного цилиндра (для доказательства достоверности результата эксперимента в физическом эксперименте);
- получить коэффициент лобового сопротивления для системы «цилиндр-пластины» (для оценки эффекта снижения сопротивления по сравнению с двумерным случаем).

Все эксперименты проводились в аэродинамической трубе АДТ-3 Самарского университета. АДТ Т-3 [9] изготовлена в МКБ "Радуга" (г. Дубна). АДТ Т-3 является трубой малых дозвуковых скоростей постоянного действия с замкнутым аэродинамическим контуром с открытой рабочей частью и одним обратным каналом, расположенным в вертикальной плоскости. Схема трубы Т-3 представлена в [9]. Эксперимент проводился при постоянной скорости потока $V=25$ м/с. Степень турбулентности в рабочей части АДТ-3 примерно равна 0,8%.

Модель изготовлена из металлической трубы цилиндрического сечения с диаметром 50 мм и длиной 450 мм. Задняя разделительная пластина представляет собой одну из набора пластиковых пластин толщиной 2 мм и размахом 450 мм (что соответствует длине цилиндра) с разными относительными хордами $\bar{l}=b/D \in [1; 5]$. Передние дефлекторы представляют собой металлические полоски толщиной 2 мм, размахом 450 мм и хордой равной 20 мм. Задние пластины жёстко закреплены на цилиндре через 4 отверстия, выполненные на поверхности трубы. Система «цилиндр-пластины» подключена к сенсорной головке тензовесов с помощью втулки конусообразного вида, охватывающая головку тензовесов, которая имеет тоже конусообразный вид. Схема установки плоских пластин вокруг цилиндра показана на рис.1.

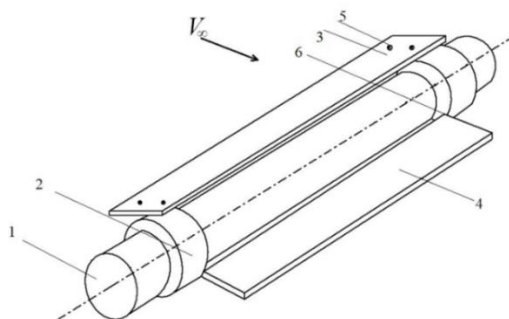


Рис. 1. Схема цилиндра с пластинами: 1 – цилиндр, 2 – муфты, 3 – передний дефлектор, 4 – задняя пластина, 5 – крепление дефлектора, 6 – отверстие для закрепления задней пластины

Удлинение цилиндра равнялось

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

Коэффициент лобового сопротивления C_{xa} вычислялся по формуле

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

где X_a – сила лобового сопротивления, H ; q_{∞} – скоростной напор набегающего потока, $Па$; S – характерная площадь, в трёхмерном случае $S=L \cdot D$, m^2 .

Во время проведения эксперимента температура воздуха $T=295$ К и атмосферное давление $p=752$ мм рт. ст (≈ 1 атм). Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру цилиндра равно

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

где ρ – плотность среды (воздуха), $кг/м^3$; μ – динамический коэффициент вязкости, $Па \cdot с$. В этом случае коэффициент лобового сопротивления по формуле (2) равен

$$C_{xa0} = \frac{X}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} = \frac{X}{qLD} = \frac{7,55 [H]}{395 [Па] \cdot 0,0225 [м^2]} \approx 0,850 \quad (4)$$

На рис. 2 показано сравнение результата данного эксперимента с результатами вычислительного эксперимента и данными других авторов. На рис. 2 штриховая чёрная линия – аппроксимация экспериментальных результатов для цилиндров разных удлинений в виде двух линий, проведённая в работах Головкина [4, 5], штриховая красная линия – это аппроксимация экспериментальных результатов Перегудова [6], а фиолетовая сплошная линия – это аппроксимация всех полученных результатов, полученная по методу наименьших квадратов автором.

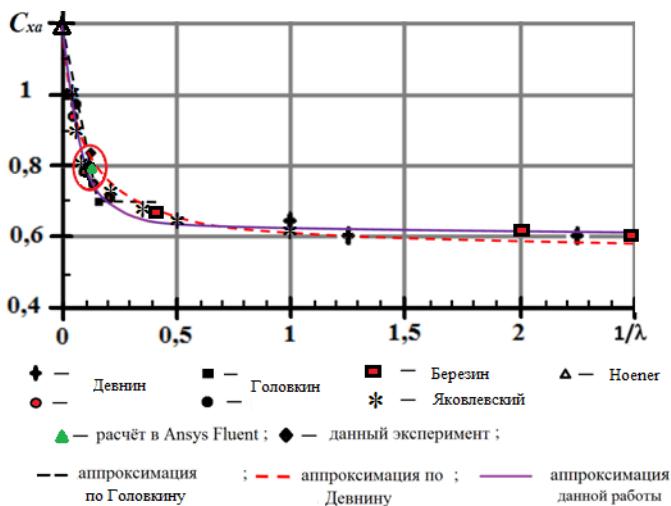


Рис. 2. Сравнение коэффициента лобового сопротивления цилиндра при докритическом обтекании от обратного удлинения $1/\lambda$

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 функции аппроксимации (5):

- 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, течение можно считать двумерным, согласно [1, 2, 4-8] $C_{xa} \approx 1,2$;

- при $1/\lambda = 0,2$, согласно [7] $C_{xa} \approx 0,71$;

- при $1/\lambda = 1,25$ и $1/\lambda = 2,25$, согласно [8] $C_{xa} \approx 0,61$.

Функция аппроксимации (5) хорошо описывает зависимость коэффициент сопротивления от обратного удлинения не только в исследованном диапазоне удлинений ($1/\lambda \in [0; 0,2]$), но и обеспечивает правильные значения для значений $1/\lambda = 0$ и $1/\lambda = 2,5$. Согласно (5) получается, что при $\frac{1}{\lambda} = 0,111$, $C_{xa} \approx 0,80$, что очень хорошо

согласуется с результатом работ [5] и [6], а также с расчётом автора в Ansys Fluent. На рис. 2 область хорошего согласования ограничена красной эллиптической областью. Это подтверждает достоверность полученных результатов.

На рис. 3 проведены зависимости отношений сопротивления цилиндра с передними дефлекторами и задней разделительной пластиной к сопротивлению цилиндра только с дефлекторами от относительной длины задней пластины ($C_{xa0}=0,85$ – сопротивление цилиндра только с передними дефлекторами).

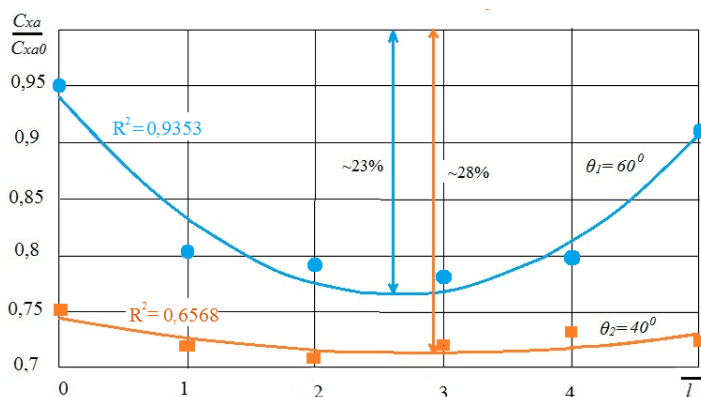


Рис. 3. Зависимость отношений коэффициентов сопротивлений от относительной хорды задней пластины

Установлено, что в трёхмерном случае цилиндр с пластинами и дефлекторами снижает сопротивление системы примерно на 23% и 28%, в то время как в двумерном случае снижение составляет 60% [1, 2]. Таким образом эффект снижения сопротивления для конечного цилиндра слабее, чем на бесконечном цилиндре.

Заключение

Итак, в работе была проведена функция аппроксимации, выражающая зависимость коэффициента лобового сопротивления цилиндра от его удлинения $C_{xa}(\frac{1}{\lambda})$, которая хорошо описывает коэффициент сопротивления в диапазоне обратных удлинений $1/\lambda \in [0; 2,5]$. Эффект снижения сопротивления цилиндра за счёт

установки плоских пластин в случае трёхмерного течения был подтверждён экспериментальными данными. Полученные результаты можно рекомендовать для практики конструирования и проектирования объектов, находящихся в воздушном потоке и имеющих цилиндрическое сечение.

Библиографический список

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

2. Frolov, V.A., Kozlova, A.S. Reducing cylinder drag by adding a plate // AIP Conference Proceeding, U.S.A (1893). 2017. № 030074. DOI: <http://doi.org/10.1063/1.5007532>.

3. ANSYS FLUENT, Theory Guide (Release 16.2). ANSYS, Inc., 2015.

4. Головкин М.А., Грудинин М.В. и др. Коэффициенты аэродинамического сопротивления круговых цилиндров конечного удлинения при малых дозвуковых скоростях // Тр. МАИ. 2024. № 134.

5. 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.

6. Девнин, С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций – Л.: Судостроение, 1983. – 320 с.

7. Березин, М.А, Катюшин В.В. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. – Новосибирск: ООО Олден-полиграфия, 2003. – 130 с.

8. Яковлевский, О.В., Семенчиков, Н.В. Аэродинамика плохообтекаемых тел: Учебное пособие. – М.: МАИ, 1986. – 82 с.

9. Комаров, В.А., Тарасов В.В., и др. Вузовская учебно-исследовательская аэродинамическая труба // Общероссийский научно-технический журнал «Полёт». 2006. № 10. С. 23–40.