

## СНИЖЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА ПОСРЕДСТВОМ УСТАНОВКИ ПЛАСТИНЫ

Отрыв потока при поперечном обтекании тел – одно из самых интересных явлений механики жидкости и газа. Исследованиями в данной области занимались многие учёные [1], однако не так много работ посвящено управлению отрывом посредством расположения дополнительного тела вблизи обтекаемого. В данной работе на основе численного моделирования предпринимается попытка восполнить этот пробел, исследуя отрывное поперечное течение около кругового цилиндра с расположенной вблизи пластиной.

Известно [2], что затягивание срыва потока за счёт смещения точки отрыва к задней кромке тела приводит к уменьшению профильного сопротивления. В настоящей работе затягивание отрыва потока осуществляется благодаря расположению двух пластин вблизи цилиндрического тела, что и обеспечивает смещение точки отрыва к задней кромке и, соответственно, уменьшение профильного сопротивления. Также исследуется наиболее выгодное расположение пластины и ширина щели между пластиной и цилиндрическим телом.

Расчёты выполнены в пакете газодинамического анализа FlowSimulation, который представляет собой дополнение программы SolidWorks с интегрированным в среду решателем уравнений Навье-Стокса. Постановка задачи содержит двумерные уравнения Навье-Стокса и уравнение неразрывности, которые имеют вид [3]:

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x, y$  – декартовы координаты;  $u, v$  – компоненты скорости вдоль осей  $Ox, Oy$ ;  $\rho$  – плотность среды;  $p$  – давление;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости.

Исследование положения точки отрыва проводится по оценке распределения касательного напряжения  $\tau_w = \rho \nu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{|y=0}$  на поверхности тела. Согласно [3] в точке отрыва потока касательное напряжение обращается в нуль. На рисунке 1 представлено распределение касательного напряжения по дуге кругового цилиндра от точки

торможения, где  $\bar{S} = x/(2r)$  – относительная координата до точки отрыва,  $r = 20$  мм – радиус кругового цилиндра,  $u_\infty$  – скорость набегающего потока.

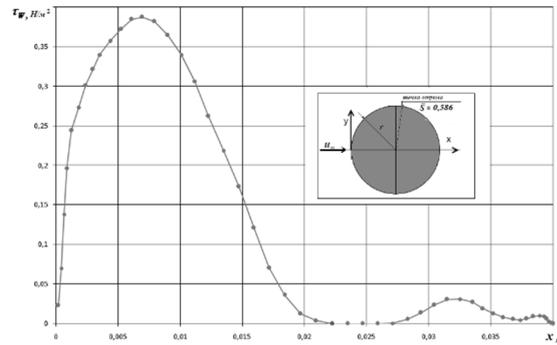


Рисунок 1 – Распределение напряжение трения по дуге цилиндра в зависимости от расстояния вдоль радиуса

Согласно теоретическим данным координата точки отрыва на верхней поверхности кругового цилиндра равна  $\bar{S} = 0,610$  [1]. Численным моделированием получено значение  $\bar{S} = 0,586$ , что составляет относительную погрешность 3,9%.

Как известно, на положение точки отрыва влияет режим течения и число Рейнольдса [2]. В данной работе число Рейнольдса принималось равным  $Re = u_\infty \cdot d / \nu = 10^4$ , где  $d = 2r$  – диаметр цилиндра. Число Рейнольдса соответствует ламинарному течению набегающего потока воздуха.

Для определения силы лобового сопротивления применялся метод импульсов, основанный на теореме импульсов, согласно которой изменение количества движения равно импульсу силы, действующему на обтекаемое тело [3]. Согласно этому методу изменение количества движения, связанное с изменением скорости, необходимо рассматривать на расстояниях позади тела, где статическое давление по сечению аэродинамического следа становится равным статическому давлению невозмущенного потока [3]. Коэффициент профильного сопротивления по методу импульсов равен

$$C_{xa} = d \cdot \rho \int_{y=-\infty}^{+\infty} u_1 (u_\infty - u_1) dy, \quad (2)$$

где  $u_1$  – скорость в сечении следа.

На рисунке 2 представлено распределение скоростей в сечениях позади кругового цилиндра. Сечения в следе выбирались параллельными оси ординат и отстоящими друг от друга на расстоянии равное диаметру цилиндра  $d$ . Отношение  $x/d$  показывает относительное расстояние от тела до выбранного сечения.

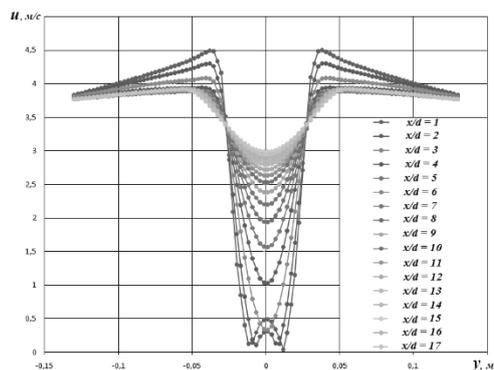


Рисунок 2 – Профиля скоростей в следе за круговым цилиндром для различных относительных расстояний за ним

Согласно экспериментальным данным [4] коэффициент лобового сопротивления для изолированного кругового цилиндра при числе Рейнольдса  $Re = 10^4$  равен  $C_{xa} \approx 1,097$ . В численном расчёте получено значение  $C_{xa} \approx 0,987$ , что составляет относительную погрешность приблизительно равную 10%.

Используя метод импульсов (2), можно найти коэффициент лобового сопротивления не только для отдельного тела, но и для системы тел. В вычислительном эксперименте исследовалась комбинация двух симметрично расположенных пластин и цилиндра. Схема исследованных положений пластин, расположенных перед круговым цилиндром показана на рисунке 3.

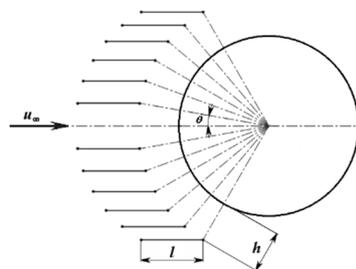


Рисунок 3 – Варианты расположения двух пластин вблизи кругового цилиндра

Положение пластин изменялось по меридиональному углу  $\theta$  от  $10^\circ$  до  $60^\circ$ . Хорда пластин  $l$  принималась постоянной и равной 10% от диаметра цилиндра  $d$ , толщина пластин равнялась 0,01 мм. Между пластинами и цилиндром имела место щель, ширина которой определялась как минимальное расстояние от задней кромки пластин до поверхности цилиндра. Относительная ширина щели  $\bar{h} = h/d$  варьировалась в интервале от 1% до 5%.

Как показало численное моделирование, наименьшее значение коэффициента лобового сопротивления  $C_{xa}$ , для системы тел достигается при  $\bar{h} = 5\%$ . Численное моделирование хорошо подтверждает теорию [1, 3], согласно которой лобовое

сопротивление  $C_{xa}$  становится меньше при смещении точки отрыва к задней кромке. На рисунке 4 представлены зависимости коэффициента профильного сопротивления  $C_{xa}$  и относительной координаты точки отрыва  $\bar{S}$  от меридионального угла расположения задней кромки пластины.

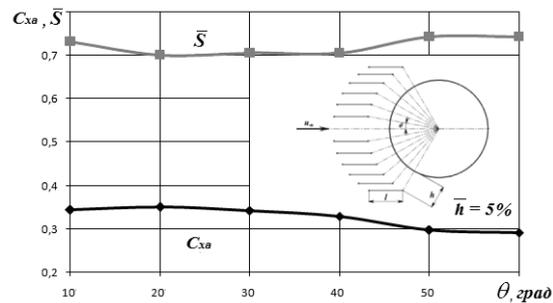


Рисунок 4 – Зависимость относительного положения точек отрыва  $\bar{S}$  на круговом цилиндре и коэффициента лобового сопротивления  $C_{xa}$  для системы тел (цилиндр и две пластины) от меридионального угла расположения задних кромок пластин

Согласно данным расчётам, за счёт симметричного размещения двух пластин перед круговым цилиндром можно достичь снижения коэффициента лобового сопротивления цилиндра с учётом сопротивления самих пластин при ламинарном режиме обтекания приблизительно в три раза по сравнению с коэффициентом сопротивления для изолированного цилиндра без пластин. Такое значительное снижение профильного сопротивления может быть полезным при проектировании газо- и нефтепроводов, пролегающих по дну моря и подверженных подводным течениям, а также в самолётостроении при использовании различных расчалок и подкосов, имеющих круговое поперечное сечение.

#### Библиографический список

1. Чжен, П. Отрывные течения [Текст] / П. Чжен – М.: Мир – 1972. – 298 с.
2. Девнин, С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций [Текст] / С.И. Девнин – Л.: Судостроение – 1983. – 320 с.
3. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст]/Г. Шлихтинг – М.: Наука – 1974. – 218 с.
4. Katz, J. Low-speed aerodynamics [Text]/J. Katz, A. Plotkin – McGraw-Hill Book Co., 1991.