

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ПЛОСКОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ОКОЛОКРИТИЧЕСКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Рассматривается задача обтекания вращающегося плоского кругового цилиндра потоком несжимаемой вязкой жидкости. Известно, что существует область чисел Рейнольдса, в которой происходит скачкообразное падение лобового сопротивления цилиндра (в литературе это явление называется кризисом сопротивления цилиндра). Число Рейнольдса определяется выражением  $Re = \frac{V_{\infty} d}{\nu}$ , где  $V_{\infty}$  – скорость набегающего потока,  $d$  – диаметр цилиндра,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

Число Рейнольдса, при котором наблюдается кризис сопротивления цилиндра, называется критическим числом Рейнольдса  $Re_{кр}$ . При числах Рейнольдса течения меньше чем  $Re_{кр}$ , пограничный слой на поверхности цилиндра является ламинарным. Ниже по потоку вследствие возникновения отрыва в области задней критической точки течение теряет устойчивость и имеется достаточно протяжённая область, где течение имеет турбулентный характер. При числах Рейнольдса течения, превышающих  $Re_{кр}$ , течение имеет турбулентный характер не только в следе за цилиндром, но и непосредственно около поверхности цилиндра.

В работе для расчёта обтекания вращающегося цилиндра при числах Рейнольдса течения, близких к критическому, применяется коммерческий пакет Fluent 6.3.26

Пакет Fluent 6.3.26 предоставляет возможность использования четырёх моделей турбулентности: Spalart-Allmaras, k-ε, k-ω, RSM (с различными пристеночными функциями).

Расчёты показывают, что при расчёте обтекания неподвижного цилиндра в области докритического числа Рейнольдса все основные модели турбулентности (Spalart-Allmaras, k-ε, k-ω) дают достаточно близкие результаты, которые неплохо соответствуют экспериментальным данным. Область докритических чисел Рейнольдса значительно сложнее поддаётся моделированию. По результатам расчёта характеристик течения в области докритических чисел Рейнольдса была выбрана k-ε модель турбулентности.

Расчётная сетка была построена в препроцессоре Gambit и содержала 120000 элементов. Границы области расчёта удалены от поверхности цилиндра на расстояние,

соответствующее 20 диаметрам цилиндра.

В докритическом режиме обтекания неподвижного цилиндра расчет проводился при числе  $Re = 136920$  и получено значение коэффициента лобового сопротивления  $c_{x0} = 0,818395$ . В закритическом режиме обтекания коэффициент лобового сопротивления неподвижного цилиндра, полученный для числа Рейнольдса  $Re = 821523$ , имеет значение  $c_{x0} = 0,354961$  (данные приведены для стационарного режима обтекания цилиндра).

Рассмотрим результаты расчёта обтекания вращающегося цилиндра. Для вращающегося цилиндра использовались те же модели турбулентности, что и для неподвижного цилиндра. Расчёты проводились в нестационарной постановке (до установления по времени). Окружная скорость вращения поверхности цилиндра задавалась с помощью безразмерной величины  $\theta = \frac{\omega d}{2V_\infty}$ , где  $\omega$  – угловая скорость вращения цилиндра.

Для числа Рейнольдса  $Re = 136920$  расчёт обтекания вращающегося цилиндра проводился при  $\theta = 0,8$  и  $\theta = 3,6$ . На рис. 1, 2 представлено распределение коэффициента давления по поверхности вращающегося цилиндра, полученное в результате расчёта. Аэродинамические коэффициенты имеют следующие значения:  $c_{y0} = 0,883$ ,  $c_{x0} = 0,603$  ( $\theta = 0,8$ );  $c_{y0} = 8,07$ ,  $c_{x0} = 0,412$  ( $\theta = 3,6$ ).

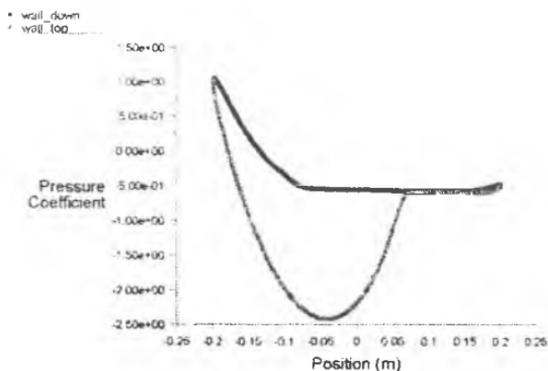


Рис. 1. Распределение коэффициента давления по поверхности вращающегося цилиндра при  $\theta = 0,8$

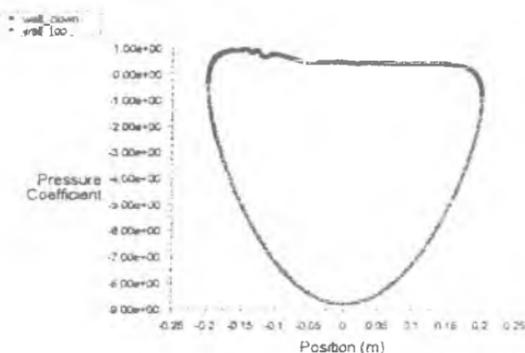


Рис. 2. Распределение коэффициента давления по поверхности вращающегося цилиндра при  $\theta = 3,6$

Для числа Рейнольдса  $Re = 547683$  расчёт обтекания вращающегося цилиндра проводился при  $\theta = 0,9$  и  $\theta = 1,8$ . На рис. 3, 4 представлено распределение коэффициента давления по поверхности вращающегося цилиндра. Аэродинамические коэффициенты имеют следующие значения:  $c_{y\alpha} = 2,333$ ,  $c_{x\alpha} = 0,3$  ( $\theta = 0,9$ );  $c_{y\alpha} = 5,066$ ,  $c_{x\alpha} = 0,188$  ( $\theta = 1,8$ ). Отметим, что для  $\theta = 0,9$  решение имело периодический во времени характер и поэтому представлены некоторые средние данные.

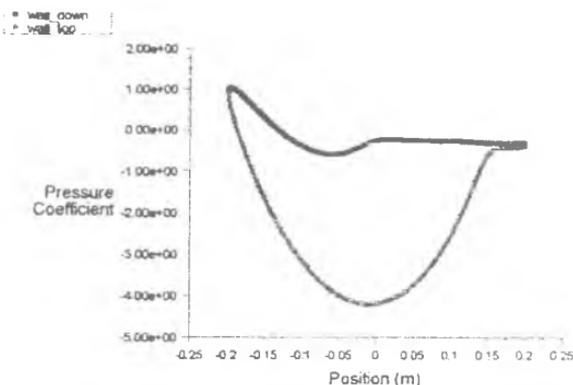


Рис. 3. Распределение коэффициента давления по поверхности вращающегося цилиндра при  $\theta = 0,9$

В [1] приведены экспериментальные результаты обтекания вращающегося цилиндра с концевыми шайбами для докритических значений числа Рейнольдса ( $Re = (0,3 \pm 1,4)10^5$ ). Из данных, представленных в [1], следует, что значения аэродинамических коэффициентов существенно зависят от диаметра концевой шайбы (максимальное отношение диаметра концевой шайбы к диаметру цилиндра не превышало ре-

личины, равной трем). При этом с ростом диаметра концевой шайбы наблюдалось значительное увеличение коэффициента подъемной силы и уменьшение коэффициента лобового сопротивления. При максимальном отношении диаметра концевой шайбы к диаметру цилиндра аэродинамические коэффициенты согласно [1] имели значения:  $c_{y\alpha} = 0,8$ ,  $c_{x\alpha} = 0,4$  ( $\theta = 0,8$ );  $c_{y\alpha} = 11$ ,  $c_{x\alpha} = 1,3$  ( $\theta = 3,6$ ).

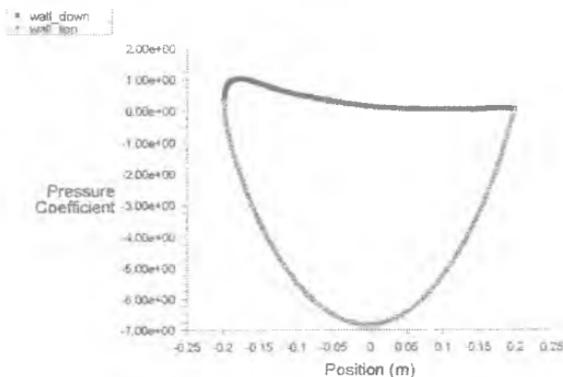


Рис. 4. Распределение коэффициента давления по поверхности вращающегося цилиндра при  $\theta = 1,8$

Из сравнения расчётных и экспериментальных данных следует, что при докритическом числе Рейнольдса  $Re = 136920$  расчётные значения коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными при относительно малой частоте вращения цилиндра ( $\theta = 0,8$ ). При высокой частоте вращения цилиндра ( $\theta = 3,6$ ) рассчитанные значения коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления существенно отличаются от экспериментальных данных. Различие в результатах может объясняться, в частности, неадекватностью выбранной модели турбулентности при большой частоте вращения цилиндра и влиянием размера концевой шайбы.

При закритическом числе Рейнольдса  $Re = 547683$  хорошее согласование между экспериментальным и расчётным значениями коэффициента подъемной силы имеет место для относительно большого значения угловой частоты вращения ( $\theta = 1,8$ ).

#### Библиографический список

1. N.M. Bychkov. Magnus wind turbine. 2. Characteristics of rotating cylinder. Thermophysics and Aeromechanics, 2005, Vol. 12, No. 1.