

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_{∞} – скорость набегающего потока, d – диаметр цилиндра, ν – 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 ω – 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: $c_{y0} = 0,883$, $c_{x0} = 0,603$ ($\theta = 0,8$); $c_{y0} = 8,07$, $c_{x0} = 0,412$ ($\theta = 3,6$).

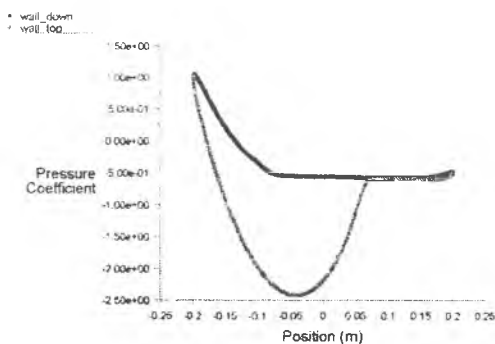


Рис. 1. Распределение коэффициента давления по поверхности вращающегося цилиндра при $\theta = 0,8$

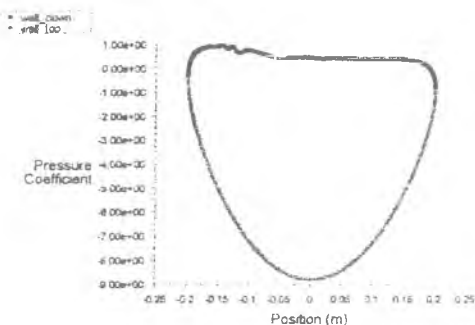


Рис. 2. Распределение коэффициента давления по поверхности вращающегося цилиндра при $\theta = 3,6$

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.

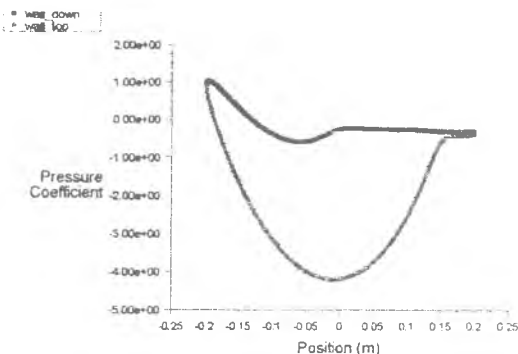


Рис. 3. Распределение коэффициента давления по поверхности вращающегося цилиндра при $\theta = 0,9$

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: $c_{y\alpha} = 0,8$, $c_{x\alpha} = 0,4$ ($\theta = 0,8$); $c_{y\alpha} = 11$, $c_{x\alpha} = 1,3$ ($\theta = 3,6$).

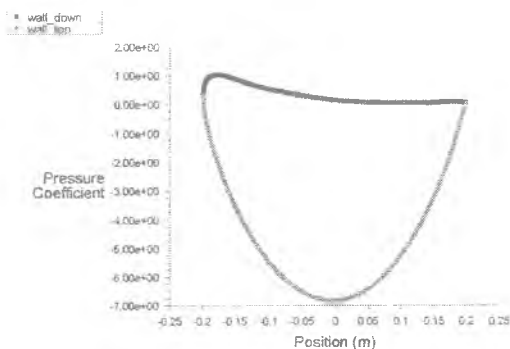


Рис. 4. Распределение коэффициента давления по поверхности вращающегося цилиндра при $\theta = 1,8$

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.