

УДК 621.311.24

Верификация программного пакета ANSYS Fluent при исследовании аэродинамических характеристик ветроколеса Савониуса

Глазков В.С.*, Игнаткин Ю.М.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: gvs29@ya.ru*

***e-mail: k102@mai.ru*

Аннотация

В работе представлены результаты расчетов аэродинамических характеристик ротора Савониуса S-типа, выполненные методом численного моделирования гидродинамических процессов (Computational Fluid Dynamics – CFD) в программном пакете ANSYS Fluent. Применен решатель 6DOF и смоделирована задача о раскручивании ветроколеса от состояния покоя до выхода на рабочие обороты под действием набегающего потока различной скорости. Проведено сравнение полученных значений коэффициентов статического и динамического момента, значений КПД ветроколеса и показано удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными на различных режимах работы ветряка. Получены результаты расчетов поперечной силы, возникающей при вращении ветроколеса S-типа в диапазоне скоростей набегающего потока $V=6..7,5$ м/с, необходимые для дальнейшего прочностного анализа в случае установки ветряка на несущие

конструкции тихоходных летательных аппаратов в качестве аварийного источника энергии.

Ключевые слова: ротор Савониуса, метод CFD, аэродинамические характеристики, верификация.

1. Введение

Энергия ветра сегодня является уже сформированной, конкурентоспособной и экологически чистой технологией, широко используемой во многих странах мира [7]. В настоящее время в авиационной технике, в частности в пассажирских лайнерах, в качестве аварийных источников энергии используются ветрогенераторы пропеллерного типа, которые, в случае нештатной ситуации помещаются за борт самолета и под действием набегающего с большой скоростью потока вырабатывают энергию, достаточную для бесперебойной работы основных бортовых систем. На тихоходных летательных аппаратах – дирижаблях и аэростатах применение ветрогенераторов пропеллерного типа затруднено из-за небольших скоростей набегающего потока и негативного влияния близости экрана на их эффективность.

Поэтому особое внимание сейчас уделяется развитию и исследованиям наиболее востребованных на практике ветроэнергетических установок малой мощности с вертикальной осью вращения, которые, в отличие от установок пропеллерного типа, имеют простую и легкую трансмиссию, основные агрегаты которой располагаются компактно, что значительно упрощает их монтаж и обслуживание на дирижаблях и аэростатах, а так же способны запускаться и

работать вблизи экрана при любых направлениях ветра без каких-либо специальных механических устройств, ориентирующих ротор «на ветер» [1].

Наиболее простым в изготовлении, эксплуатации и обслуживании является ветроэнергетическая установка с ротором Савониуса, представляющим собой конструкцию с лопастями, имеющими форму цилиндрических поверхностей (рис. 1), при виде сверху напоминающую латинскую букву «S». На сегодняшний момент ротор Савониуса недостаточно широко изучен, и задача проведения исследований для получения наивыгоднейших аэродинамических характеристик является актуальной.



Рис. 1. Ветроколесо Савониуса, изготовленное из подручных средств.

Известны результаты экспериментов, проведенных с различными конфигурациями ротора Савониуса в аэродинамических трубах [5], [6], [14], [15], [16], [17], [19], [20], однако решение задачи оптимизации параметров ротора экспериментальным методом трудоемко и может занять большое количество времени. Кроме того, модельный эксперимент часто не позволяет обеспечить полное подобие натуре, что снижает физическую точность полученных результатов.

В связи с развитием вычислительных мощностей современных компьютеров, всё большую популярность получают методы вычислительной аэродинамики - CFD, основанные на численном решении дифференциальных уравнений Навье - Стокса

различными способами [10]. Эти методы реализованы, в частности, в программном пакете Ansys Fluent [12], который будет использован в работе в качестве инструмента для расчета аэродинамических характеристик ветряков.

2. Постановка задачи

Ротор Савониуса имеет сложную с аэродинамической точки зрения конфигурацию, состоящую из профилей имеющих большую кривизну при относительно малой толщине. При моделировании обтекания ротора необходимо учитывать нестационарность процессов, вызванных эффектами динамического срыва потока с лопастей, их влияние на характер течения в спутном следе.

Для проведения верификации программного пакета Ansys Fluent рассматривается ротор Савониуса, имеющий геометрические характеристики, которые использовались при проведении эксперимента в аэродинамической трубе в работе [19]. В эксперименте исследовался ротор Савониуса с установленными торцевыми шайбами, диаметр которых значительно превышал диаметр ротора, что позволяет пренебречь концевыми эффектами на лопастях и решать задачу с ротором Савониуса бесконечно большого размаха в двумерной постановке.

2.1. Математический аппарат

При описании аэродинамических процессов, возникающих при обтекании ротора Савониуса используются уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости, записанные в дифференциальной форме. Прямое численное решение (*Direct Numerical Simulation – DNS*) полных уравнений движения требует применения мелких сеток, что негативно сказывается на времени расчета и

значительно увеличивает затраты вычислительных ресурсов. Поэтому в настоящей работе для исключения локальных мелкомасштабных параметров потока применен способ осреднения по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (*Reynolds Averaged Navier–Stokes equations – RANS*), замкнутых с помощью двухпараметрической модели турбулентности «*k-ε Realizable*» [2], [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \end{array} \right. \quad (2.1.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], \end{array} \right. \quad (2.1.2)$$

где x_i , $i=1,2$ - декартовы координаты (x, y); t - время; u_i, u_j - декартовы составляющие вектора скорости (u); p - давление; ρ - плотность; $\nu_{\text{eff}} = \nu + \nu_t$ - эффективный коэффициент кинематической вязкости; ν, ν_t - молекулярный и турбулентный коэффициенты кинематической вязкости [8].

Используемая модель турбулентности, как отмечено в [4], более точно предсказывает распределение диссипации плоских и круглых струй, что обеспечивает лучшее описание вращающихся потоков, пограничных слоев, подверженных сильным градиентам давления, отрывных течений и рециркуляционных потоков.

На основе предварительных исследований, проведенных на вращающихся цилиндрах и плоских пластинках, было установлено, что данная модель турбулентности в сравнении с другими показала наиболее близкие к эксперименту результаты.

2.2. Исходные данные и расчет

В работе [19] представлены результаты эксперимента, проведенного в дозвуковой аэродинамической трубе открытого типа. Получены аэродинамические характеристики исследуемых роторов Савониуса различных конфигураций при числах $Re = 1,2 \times 10^5$ и $Re = 1,5 \times 10^5$, что соответствует скорости невозмущенного потока $V=6$ м/с и $V=7.5$ м/с, рассчитанным по диаметру ротора $D = 0,24$ м.

На общем виде расчетной схемы (см. рис. 2) указаны основные геометрические размеры ветроколеса, а также угол поворота ротора θ , возникающий при набегании невозмущенного потока воздуха со скоростью V .

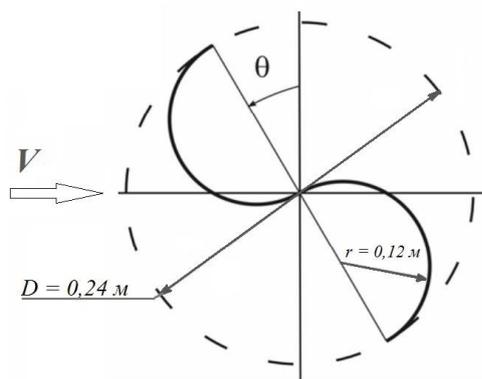


Рис. 2. Общий вид расчетной схемы

Динамические расчетные сетки строились с помощью генератора сеточных моделей Ansys Meshing [11], [13] и имеют комбинированную топологию (см. рис. 3...5). Расчетная область задана прямоугольником с полукруглой частью со стороны набегающего потока (рис. 3).

Боковые границы расчетной области располагаются от модели ротора Савониуса на расстоянии $3D$, задняя на $7D$, передняя на $3D$, где $D = 0,24$ м. Расчетная сетка содержит около 300000 ячеек треугольной и прямоугольной формы.

Для учета влияния пограничного слоя по контуру профилей была создана зона прямоугольных ячеек (см. рис. 4). На границе области *Rotate*, расположенной вокруг модели ротора и имеющей размер $1,25D$ (см. рис. 5), и окружающего расчетного домена *Outer* было применено условие скольжения сеток (*Sliding Mesh*) для моделирования вращения [11].

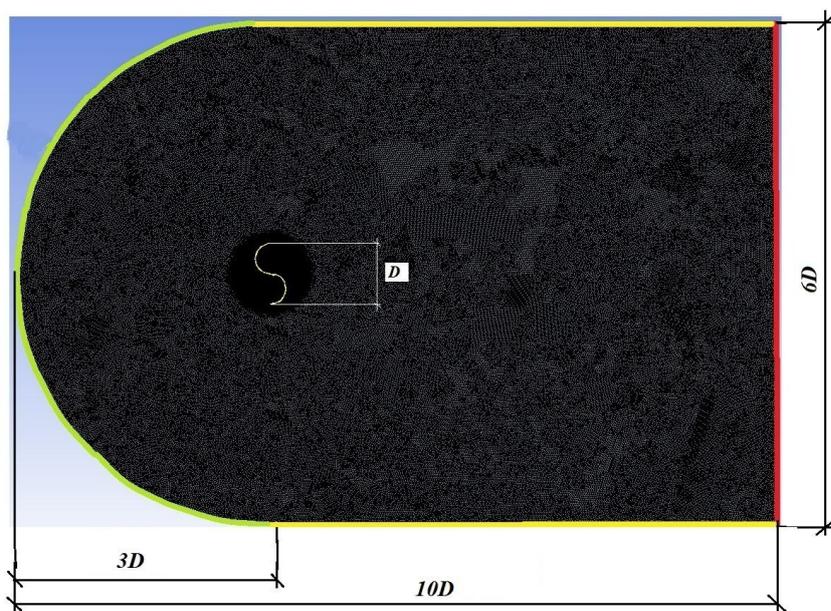


Рис. 3. Расчетный домен

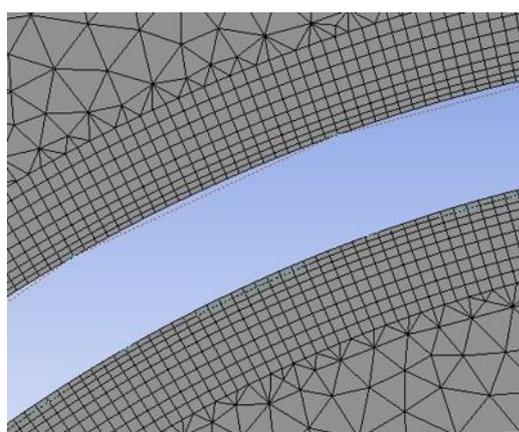


Рис. 4. Применение

комбинированной сетки для учета влияния пограничного слоя.

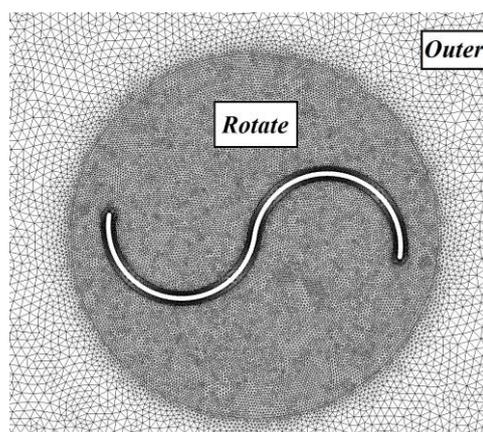


Рис. 5. На границе областей *Rotate* и *Outer*

применено условие скольжения сеток.

Внешние силы и моменты, приложенные к поверхности ротора Савониуса вычислялись численным интегрированием давления и напряжения по поверхностям лопастей при помощи расчетной модели шести степеней свободы 6DOF (*Six Degree of Freedom*). Для расчета углового вращения решатель кода Ansys Fluent и модель 6DOF используют значения сил и моментов, а также функции пользователя UDF (*User Define Functions*), представляющие собой файлы макроса, написанного на языке «C++», которые подсоединяются к расчетному модулю путем подготовки и загрузки динамической библиотеки с помощью внешнего компилятора. Функции пользователя UDF содержат информацию о массовых и инерциальных характеристиках сечения ротора Савониуса, а также инструкции и ограничения по реализации движения сечения в пространстве с заданным числом степеней свободы.

3. Результаты численного эксперимента

На рис. 6, 7 представлены результаты экспериментальных зависимостей мгновенных значений коэффициента крутящего момента ротора C_m от угла его поворота θ (см. рис. 2) за полный оборот ротора. Здесь же нанесены результаты расчетов основных характеристик ротора Савониуса полученные методом CFD для двух значений чисел $Re = 1,2 \times 10^5$ и $Re = 1,5 \times 10^5$, соответствующих условиям эксперимента [19], где

$$C_m = \frac{4T}{\rho V_\infty^2 D^2 H}.$$

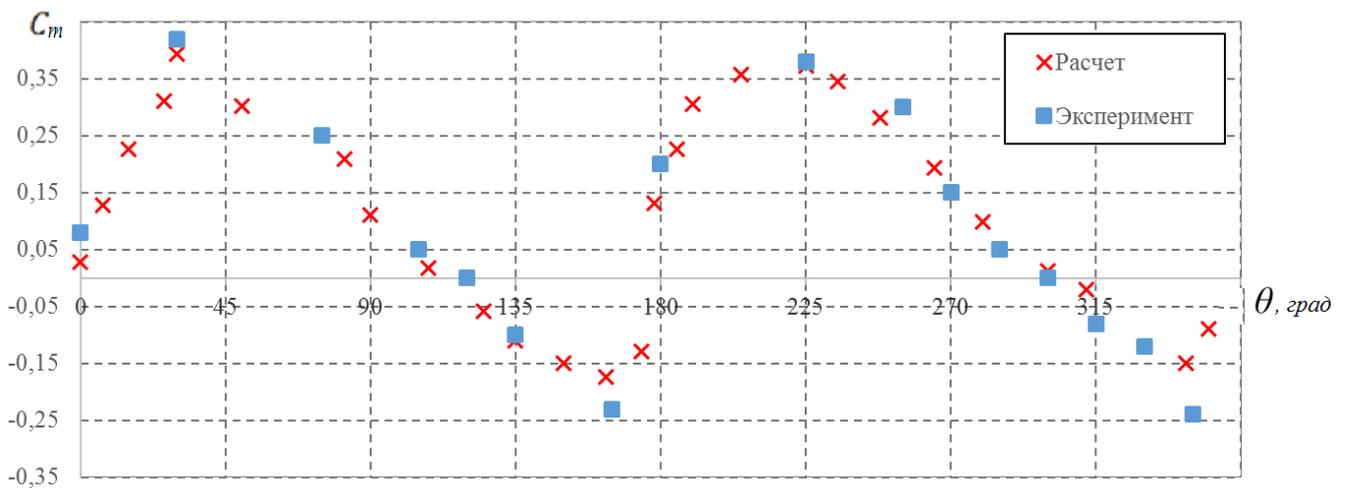


Рис. 6. Изменение коэффициента крутящего момента C_m по углу поворота θ ротора при $Re = 1,2 \times 10^5$

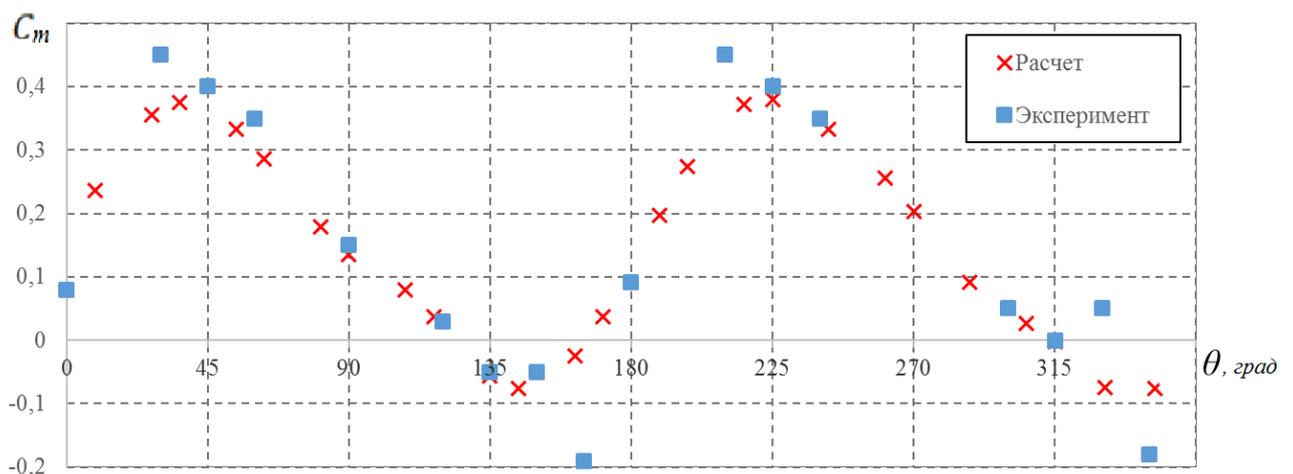


Рис. 7. Изменение коэффициента крутящего момента C_m по углу поворота θ ротора при $Re = 1,5 \times 10^5$

Из представленных зависимостей $C_m = f(\theta)$ следует, что для двух исследуемых значений чисел $Re = 1,2 \times 10^5$ и $Re = 1,5 \times 10^5$ наблюдается удовлетворительное совпадение расчетов с экспериментом [19] изменения мгновенных значений коэффициентов крутящего момента C_m по углу поворота θ ротора.

На рис. 8 также наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных [19] зависимостей осредненных за оборот значений коэффициента мощности C_p в зависимости от различных значений быстроходности λ ветряка, где

$$C_p = \frac{2T\omega}{\rho V_\infty^3 DH}, \quad \lambda = \frac{\omega D}{2V_\infty}.$$

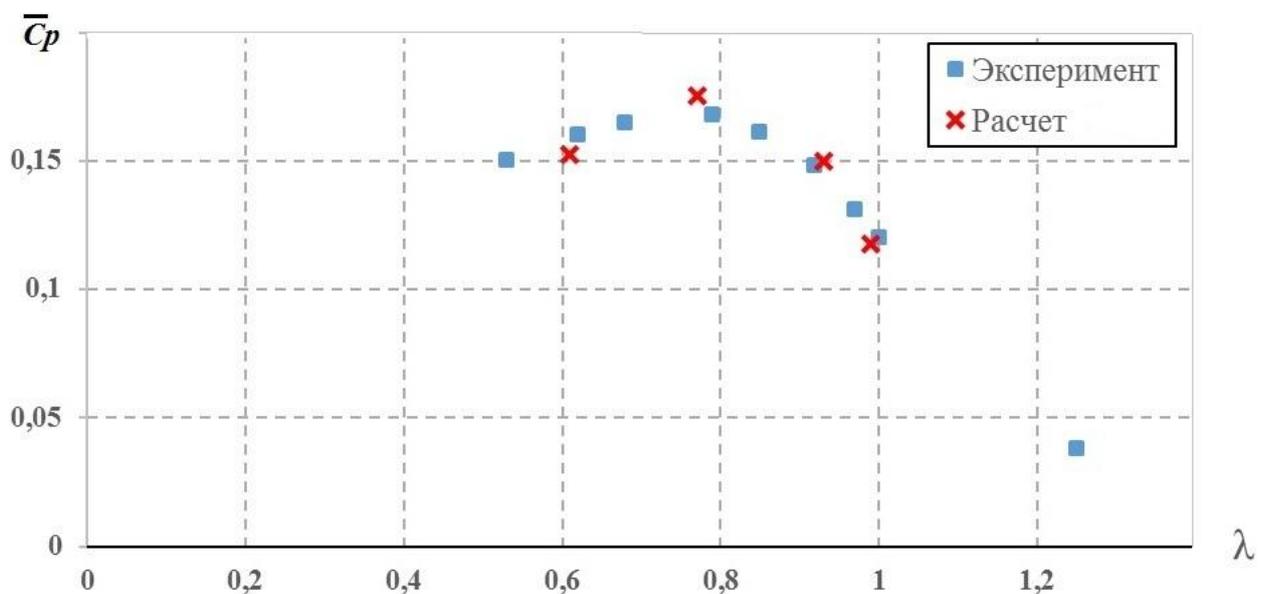


Рис. 8. Зависимость осредненного за оборот коэффициента мощности C_p от коэффициента быстроходности λ ротора Савониуса

На рис. 9, 10 представлены графики зависимостей мгновенных значений величины поперечной силы F_y по времени, возникающей при раскручивании ротора Савониуса от момента старта ($t=0, \omega=0$) до выхода на постоянные обороты ($\omega=const$) и направленной перпендикулярно вектору скорости набегающего потока в поперечной плоскости. Наличие поперечной силы F_y , обусловленной эффектом Магнуса, возникающем при вращении ротора [18], вызывает смещение графика поперечной силы вниз по оси ординат.

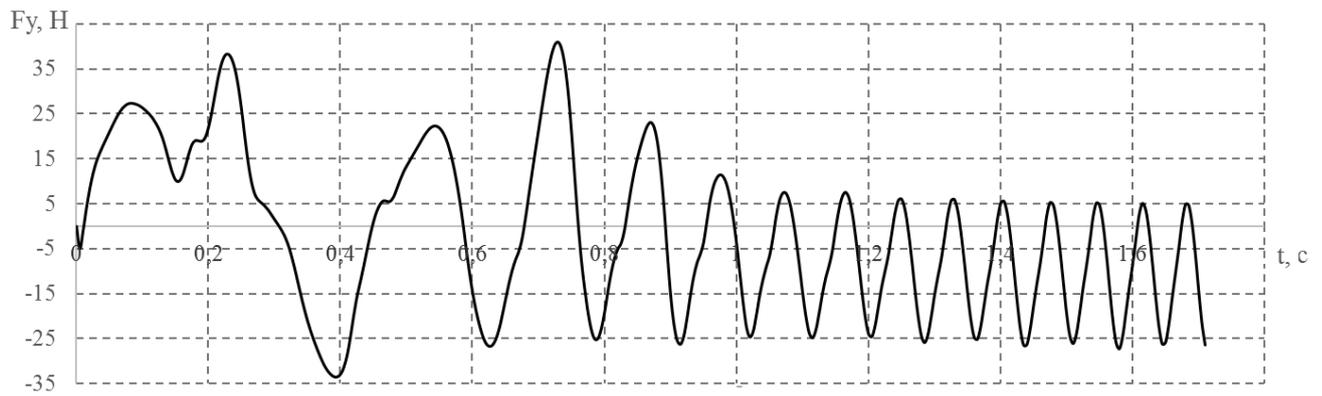


Рис. 9. Пульсация по времени величины поперечной силы F_y при скорости набегающего потока $V = 6$ м/с от момента запуска до выхода на установившееся вращение.

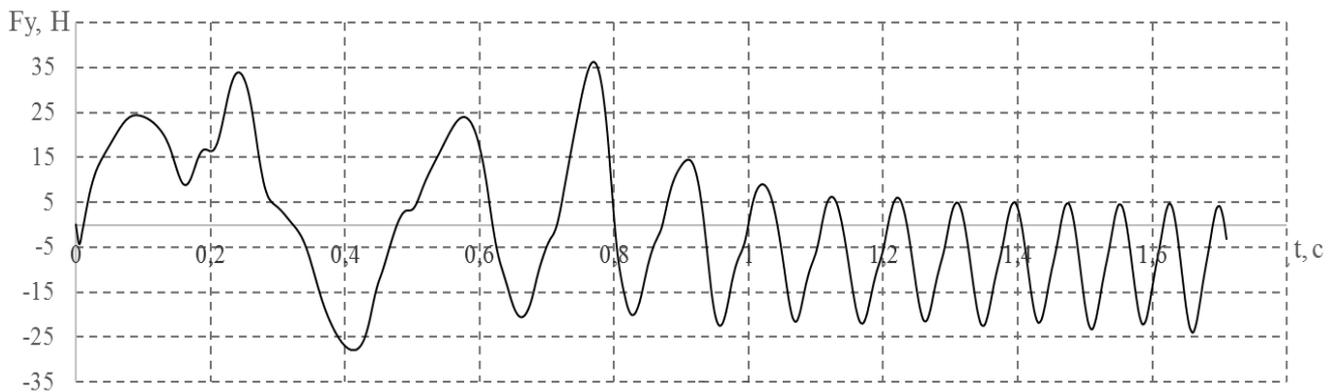


Рис. 10. Пульсация по времени величины поперечной силы F_y при скорости набегающего потока $V = 7.5$ м/с от момента запуска до выхода на установившееся вращение.

На рис. 11 представлены расчетные зависимости, характеризующие изменение частоты вращения ω ротора от времени t с момента старта ($t=0$) до $t=5$ с при скорости набегающего потока $V = 6$ м/с и $V = 7,5$ м/с.

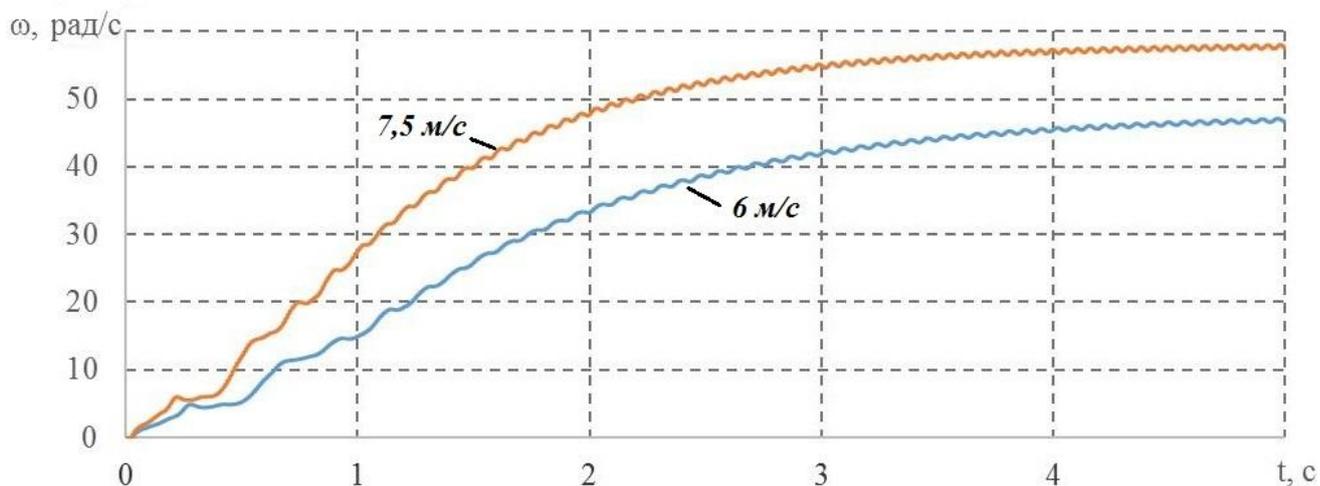


Рис. 11 Изменение частоты вращения ω ротора Савониуса от времени t с момента старта.

При расчете времени выхода ротора Савониуса на установившийся режим не учитывались потери на трение в подшипниках и узлах трансмиссии, которые неизбежно возникают в реальной конструкции. Данные кривые позволяют качественно оценить влияние скорости набегающего потока на время раскручивания ветроколеса.

4. Заключение

Результаты численного эксперимента, проведенного при помощи программного пакета CFD анализа Ansys Fluent, основанного на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замкнутых дифференциальной двухпараметрической моделью турбулентности «*k-e Realizable*», показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, полученными в аэродинамической трубе, что говорит о достоверности применяемого расчетного метода.

Применение скользящих динамических сеток комбинированной топологии позволяет решать задачу обтекания ветроколеса Савониуса с учетом влияния вязкости в нестационарной постановке.

Расчетная модель шести степеней свободы 6DOF управляемая пользовательской функцией UDF позволяет решить задачу раскручивания ротора Савониуса под действием набегающего потока и определить внутренние силы, возникающие при вращении ветроколеса в период от старта до выхода на режим, характеризующийся постоянным по времени значением частоты вращения ротора ω , что является входными данными для прочностного анализа при установке ветряка на несущие конструкции тихоходных летательных аппаратов, таких как дирижабли, в качестве аварийного источника энергии.

Библиографический список

1. Бубенчиков А.А., Сикорский С.П., Терещенко Н.А., Ковалев Г.А., Чечулин В.Д. Целесообразность применения ветроэнергетических установок малой мощности с вертикальной осью вращения в Омском регионе // Молодой ученый. 2016. № 22. Часть 3. С. 22 - 25.
2. Игнаткин Ю.М., Константинов С.Г. Исследование аэродинамических характеристик профиля и законцовок лопасти несущего винта вертолета методами CFD // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=30874>

3. Исследование аэродинамических характеристик несущего винта вертолѐта методом CFD // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=30875>
4. Коркодинов Я.А. Обзор семейства k-е моделей для моделирования турбулентности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. 2013. Т. 15. № 2. С. 5 - 16.
5. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика: учебник. - Харьков: Национальный аэрокосмический университет, 2004. - 519 с.
6. Моди Фернандо. Характеристики ветродвигателя Савониуса // Современное машиностроение. 1989. № 10. С. 139 - 148.
7. Перспективы мировой ветроэнергетики, GWEC, сентябрь 2006. URL: <http://docplayer.ru/30294028-Perspektivy-mirovoy-vetroenergetiki.html>
8. Редчиц Д.А. Численное моделирование нестационарных турбулентных отрывных течений при обтекании ротора Савониуса // Авиационно-космическая техника и технология. 2008. № 5 (52). С. 53 - 57.
9. Сизов Д.А. Развитие и применение метода дискретных вихрей в задачах аэродинамики и динамики ротора Савониуса: Дисс....канд. техн.наук. – Казань: 2013. - 153 с.
10. Ша М., Агульник А.Б., Яковлев А.А. Анализ результатов математического моделирования натекания дозвукового потока на профили лопаток в двухмерной

постановке // Труды МАИ. 2017. № 93. URL:
<http://trudymai.ru/published.php?ID=80297>

11. ANSYS Meshing Users Guide. ANSYS Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, 2013. URL: <http://www.ansys.com>
12. ANSYS FLUENT 6.3. Theory Manual. Fluent Inc. Central Source Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA, 2005. URL: <http://www.Fluent.com>
13. Cottier F., Menet J-L. Etude paramétrique du comportement aérodynamique d'une éolienne lente à axe vertical de type Savonius, Université de Valenciennes, Le Mont Houy, F-59313 Valenciennes, Cedex 9.
14. Blackwell B.F., Sheldahl R.E., Feltz L.V. Wind tunnel performance data for two- and three - bucket Savonius Rotors, Sandia National Laboratories, 1976, SAND76-0131.
15. Chauvin A., Benghrib D. Drag and lift coefficients evolution of a Savonius rotor // Experiments in Fluids, 1989, no. 8, pp. 118 - 120.
16. Fujisawa N. Velocity measurements and numerical calculations of flow fields in and around Savonius rotors // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, no. 59, pp. 39 - 50.
17. Fujisawa N., Ogawa Y., Shirai H. Power augmentation measurement and flow field visualisation for coupled Savonius rotors // Wind Engineering, 1988, no. 12(6), pp. 322 - 331.
18. Jost Seifert. A review of the Magnus effect in aeronautics // Progress in Aerospace Sciences, 2012, vol. 55, pp. 17 - 45.
19. Kamoji M.A., Kedare S.B., Prabhu S.V. Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor // Applied Energy, 2009, vol. 86, pp. 1064 – 1073.

20. Ushiyama I., Nagai H. Optimum design configurations and performances of Savonius rotors // Wind Engineering, 1988, no. 12 (1), pp. 59 - 75.