

УДК 532.526

Д.А. РЕДЧИЦ

*Институт транспортных систем и технологий НАНУ, Украина***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ОБТЕКАНИИ РОТОРА САВОНИУСА**

Сформулирована постановка задачи динамики и аэродинамики роторов вертикально-осевых ветроустановок. Разработано программно-методическое обеспечение для расчета аэродинамических и энергетических характеристик ветроустановок на базе нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS) несжимаемой жидкости. При моделировании турбулентности используется однопараметрическая дифференциальная модель турбулентности SALSA. Решение системы исходных уравнений получено с помощью неявного конечно-объемного численного алгоритма, который базируется на методе искусственной сжимаемости и многоблочных вычислительных технологиях. Выполнен анализ поля течения вокруг ротора Савониуса. Выделены основные стадии формирования вихревой структуры при вращении ротора. Установлено влияние числа Рейнольдса и коэффициента быстроходности на энергетические характеристики ротора Савониуса.

Ключевые слова: ротор Савониуса, ветроагрегат, уравнения Навье-Стокса, модель турбулентности, отрыв потока.

Введение

Ведущую роль в работе ветроэнергетической установки (ВЭУ) играют нестационарные аэродинамические процессы. От продуманности компоновки, оптимизации форм ротора, аэродинамических качеств вращающихся поверхностей зависит конечная эффективность самой ВЭУ.

В то же время, ротор ВЭУ, как и ротор вертолета, пропеллер самолета, газовые турбины, является одним из самых трудных в плане аэродинамического расчета и проектирования. В общем случае при моделировании обтекания ВЭУ необходим учет трехмерных процессов, нестационарности поля течения, вязких эффектов, включая турбулентность и ее крупномасштабную часть.

Известные методики определения аэродинамических и энергетических характеристик ротора ВЭУ основаны на экспериментальных данных [1], импульсной [2] и вихревой теориях [3], численном решении уравнения потенциала [4]. Они используют определенные допущения при постановке задачи (квазистационарность потока, отсутствие учета вязко-невязкого взаимодействия и т.д.). Главными трудностями в расчете нестационарных процессов при обтекании роторов вертикально-осевых (ВО) ВЭУ являются эффекты динамического срыва потока. До настоящего времени ни одна из известных упрощенных моделей не давала возможности адекватно рассчитать аэродинамические характеристики роторов в случае динамического срыва потока.

При конструировании ветроагрегатов необхо-

димо учитывать влияния многих физических процессов (отрыв потока, взаимодействие лопастей, течение в следе и вблизи гондолы ветроагрегата), которые происходят при вращении ВЭУ. Экспериментальные методы исследований зачастую оперируют ограниченными объемами данных. Кроме того, натурные эксперименты не всегда возможны, как по техническим, так и экономическим соображениям.

Развитие численных методов и вычислительной техники позволило применить сложные математические модели для исследования нестационарных процессов при обтекании роторов ВЭУ. Качество получаемых результатов определяется уровнем выбранной модели механики сплошной среды, свойствами численного метода, возможностями разработанного программно-методического обеспечения.

Одним из наиболее эффективных путей моделирования обтекания ротора ВО ВЭУ является применение численных методов решения нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса.

1. Постановка задачи

В работе рассматривается ортогональный двухлопастный ротор Савониуса, лопасти которого имеют длину, многократно превышающую хорду (рис. 1). В таком случае можно пренебречь концевыми эффектами на лопастях и воспользоваться гипотезой о плоскопараллельной структуре течений. Таким образом, задача обтекания ВО ВЭУ допускает двумерную постановку в плоскости, перпендику-

лярной оси вращения ротора. Поскольку для максимальных скоростей ветра и значений коэффициента быстроходности локальные числа Маха низкие ($M < 0,3$), поле течения принято несжимаемым.

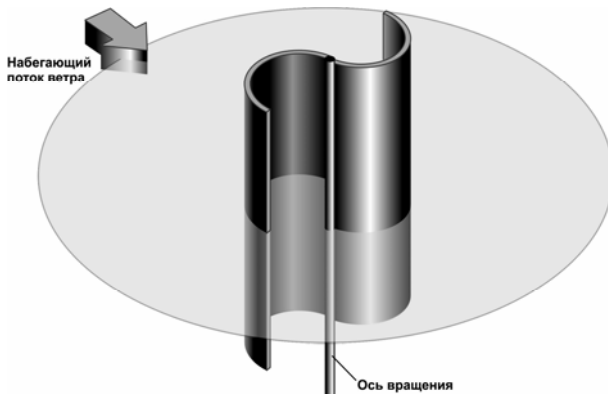


Рис. 1. Расчетная схема для ротора Савониуса

Процессы аэродинамики ветроагрегата описываются осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса несжимаемой жидкости:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], \end{cases} \quad (1)$$

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

При моделировании турбулентности используется однопараметрическая дифференциальная модель турбулентности Spalart-Allmaras, адаптированная к тензору скоростей деформаций (SALSA) [5].

2. Численный алгоритм

Система исходных уравнений (1) – (2), замкнутая дифференциальной моделью турбулентности, записывалась относительно произвольной криволинейной системы координат. Согласование полей давления и скорости осуществлялось с помощью метода искусственной сжимаемости, модифицированного для расчета нестационарных задач [6]. Для создания дискретного аналога исходных уравнений вокруг ротора ВО ВЭУ в качестве базовых использовались регулярные сетки. В неодносвязных областях применялись многоблочные вычислительные технологии, в которых размерность отдельных пере-

секающихся сеток (блоков) не связана между собой. Такой подход позволил выработать единую методологию расчета течений вязкой жидкости вокруг роторов ВО ВЭУ сложной геометрической формы.

Система исходных уравнений интегрировалась численно с использованием метода контрольного объема. Для конвективных потоков использовалась противопоточная аппроксимация, основанная на схеме P. Roe [7] третьего порядка точности. В моделях турбулентности для аппроксимации конвективных слагаемых применялась схема TVD с ограничителем потоков ISNAS [8] третьего порядка. Производные в вязких членах аппроксимировались центрально-разностной схемой второго порядка.

Алгоритм решения уравнений базируется на трехслойной неявной схеме с подытерациями по псевдвремени второго порядка точности по физическому времени.

3. Обсуждение результатов

Проведена верификация и тестирование разработанного алгоритма и комплекса программ на задачах о течении в каверне, задаче Блазиуса, обтекании неподвижного и вращающегося цилиндров, неподвижного и колеблющегося профилей [9 – 14].

3.1. Условия физического и вычислительного экспериментов

В работе [15] выполнено экспериментальное изучение двухлопастного ротора Савониуса в низкоскоростной аэродинамической трубе с целью определения аэродинамических и энергетических характеристик.

Скорость невозмущенного потока составляла $U_\infty = 7$ м/с и $U_\infty = 14$ м/с, что соответствует числам Рейнольдса, рассчитанным по диаметру ротора $Re = 4,32 \times 10^5$ и $Re = 8,64 \times 10^5$.

Лопастей ротора в своем сечении имеют полуокружности с радиусом $r = 0,25$ м (рис. 2) [15]. Радиус вращения R измерялся от оси вращения до внешней грани лопастей.

3.2. Неподвижный ротор Савониуса

Ротор Савониуса фиксировался при различных углах относительно потока с шагом $\Delta\theta = 10^\circ$. Полученные данные представлены в виде изменения осредненного по времени коэффициента крутящего момента от углового положения ротора Савониуса (рис. 3). Начальное угловое положение ротора соответствует рис. 2. Увеличение углового положения направлено по часовой стрелке.

Для большинства угловых положений двухлопастного ротора Савониуса осредненный по времени коэффициент крутящего момента положительный, а для углов $55^\circ < \theta < 80^\circ$ – отрицательный (рис. 3). С тем, чтобы обеспечить самозапуск ротора Савониуса из любого начального положения, крутящий момент должен превосходить сумму момента приложенной нагрузки и момента трения системы. Исходя из этих соображений, минимальная величина коэффициента крутящего момента должна определяться размерами ротора Савониуса, необходимыми для самозапуска.

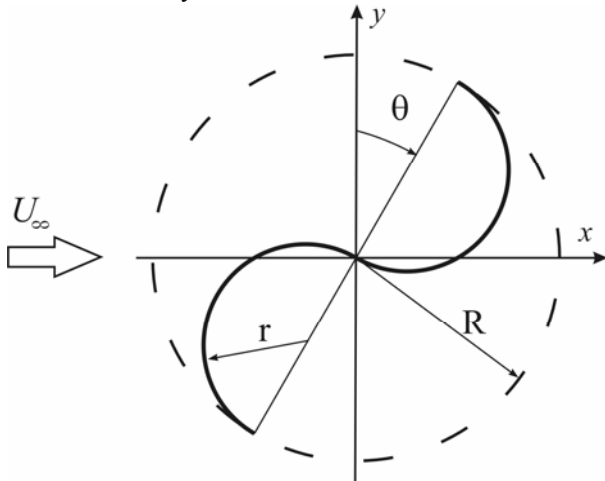


Рис. 2. Схема двухлопастного ротора Савониуса

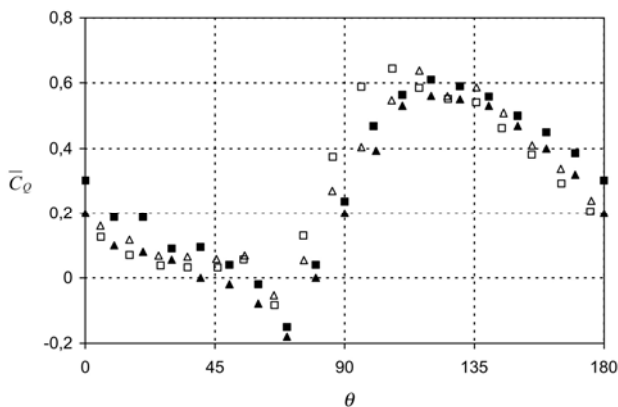


Рис. 3. Изменение осредненного по времени коэффициента крутящего момента \bar{C}_Q для различных угловых положений θ ротора Савониуса Δ, \square – эксперимент ($Re = 4,32 \times 10^5$, $Re = 8,64 \times 10^5$) [15]; $\blacktriangle, \blacksquare$ – настоящая работа ($Re = 4,32 \times 10^5$, $Re = 8,64 \times 10^5$)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что двухлопастный ротор Савониуса лучше не использовать в качестве стартовой системы, потому

что он обладает отрицательными значениями осредненного коэффициента крутящего момента. Эта проблема может быть решена путем использования комбинации установленных двух роторов Савониуса, смещенных на угол 90° относительно друг друга.

Число Рейнольдса оказывает влияние на коэффициенты крутящего момента (рис. 3). Смещение кривой коэффициента крутящего момента является следствием задержки отрыва потока на лопастях с ростом числа Рейнольдса от $4,32 \times 10^5$ до $8,64 \times 10^5$, что приводит к небольшому улучшению аэродинамических свойств ротора.

3.3. Подвижный ротор Савониуса

Анализ поля течения и энергетических характеристик ротора Савониуса выполнены при фиксированном коэффициенте быстроходности.

При взаимодействии с набегающим потоком ветра ротор Савониуса генерирует сложное поле течения с большими рециркуляционными зонами. Вращение роторов Савониуса при коэффициенте быстроходности ($\lambda = 1,4$) характеризуется квазистационарным режимом течения. Периодичность в структуре течения вокруг ротора наблюдается через 180° . При этом можно выделить четыре характерные стадии. Визуализация обтекания выполнена с помощью контуров завихренности.

Стадия 1. Ротор Савониуса вращается с угловой скоростью $\omega = 2,8$. За начальное положение выбирается угол, когда лопасть 1 обращена по потоку $\theta = 0^\circ$ (рис. 4, а). В этот момент времени на конце первой лопасти формируется вихрь **a**. Его вращение направлено по часовой стрелке. В области, охватываемой лопастью, расположен вихрь **b**, который постепенно смещается в направлении конца лопасти 1. Вихрь **c**, зародившийся на внешней поверхности первой лопасти, отесняется потоком во внутреннюю область, охватываемую второй лопастью. На ее конце происходит формирование тонкого вытянутого вихря **e**. На внешней поверхности второй лопасти, которая обращена навстречу потоку, происходит образование вихря **f**. В следе ветроагрегата находятся вихри **g** и **k**, которые сорвались с лопастей 2 и 1, когда они были в этом угловом положении. Их интенсивность резко падает по мере удаления от ветроагрегата.

Стадия 2. При повороте ротора на 45° вихрь **a** оторвался от лопасти 1 (рис. 4, б). Вихрь **b** взаимодействует с концом этой лопасти и вихрем **a**, увеличивая его интенсивность. Вихрь **c** смещается в

центральную область второй лопасти. Интенсивность вихря **e**, который является следствием взаимодействия набегающего потока и вращающейся лопасти, усиливается. Продолжая свой рост, вихрь **f** прижимается набегающим потоком к внешней поверхности второй лопасти. Интенсивность вихря **g** уменьшается, по мере того как он сносится вниз по потоку.

Стадия 3. Угловое положение ротора $\theta = 90^\circ$ (рис. 4, в) характеризуется дальнейшим смещением вихря **a** вниз по потоку. Вихрь **b** теряет свою интенсивность и диссипирует на наветренной стороне лопасти 1. Вихрь **c** вращается по часовой стрелке и постепенно перемещается к центру внутренней области, охватываемой лопастью 2. Вихрь **g**, теряя часть своей поступательной и вращательной скорости, медленно переносится основным течением вниз по потоку.

Стадия 4. При повороте ротора Савониуса на угол $\theta = 135^\circ$ (рис. 4, г) вихри **a** и **g** сносятся потоком и формируют след от лопастей, которые находились в верхнем (с точки зрения рисунка) положении. Вихрь **c** отбрасывается центробежной силой к центру второй лопасти. Разрушение большого вихря **e** приводит к образованию каскада более мелких вихрей. Вихрь **f** начинает распадаться на систему отдельных вихрей, которые не покидают внутреннее пространство ротора, а остаются как бы «связанные» с лопастью ротора. На конце первой лопасти продолжает формироваться вихрь **n**, который в дальнейшем пройдет те же стадии, что и вихрь **e**. Зарождение вихря **m** обусловлено началом движения второй лопасти по потоку.

Угловое положение ротора 180° (рис. 4, д) эквивалентно положению ротора при 0° . При этом можно выделить периодичность в генерации вихрей по завершению полного цикла стадий: **a** \rightarrow **m**, **b** \rightarrow **c**, **c** \rightarrow **f**, **e** \rightarrow **n**, **g** \rightarrow **a**, **k** \rightarrow **g**.

Изменения осредненных за один оборот коэффициентов мощности двухлопастного ротора Савониуса при различных коэффициентах быстроходности приведены на рис. 5.

Максимумы осредненных коэффициентов крутящего момента ($\bar{C}_Q = 0,40$) двухлопастного ротора Савониуса соответствует коэффициенту быстроходности $\lambda = 0,4$.

Максимумы значений коэффициентов мощности лежат в диапазоне $\bar{C}_P = 0,23 - 0,24$ в области значений коэффициента быстроходности $\lambda = 0,8$ для двухлопастного ротора Савониуса.

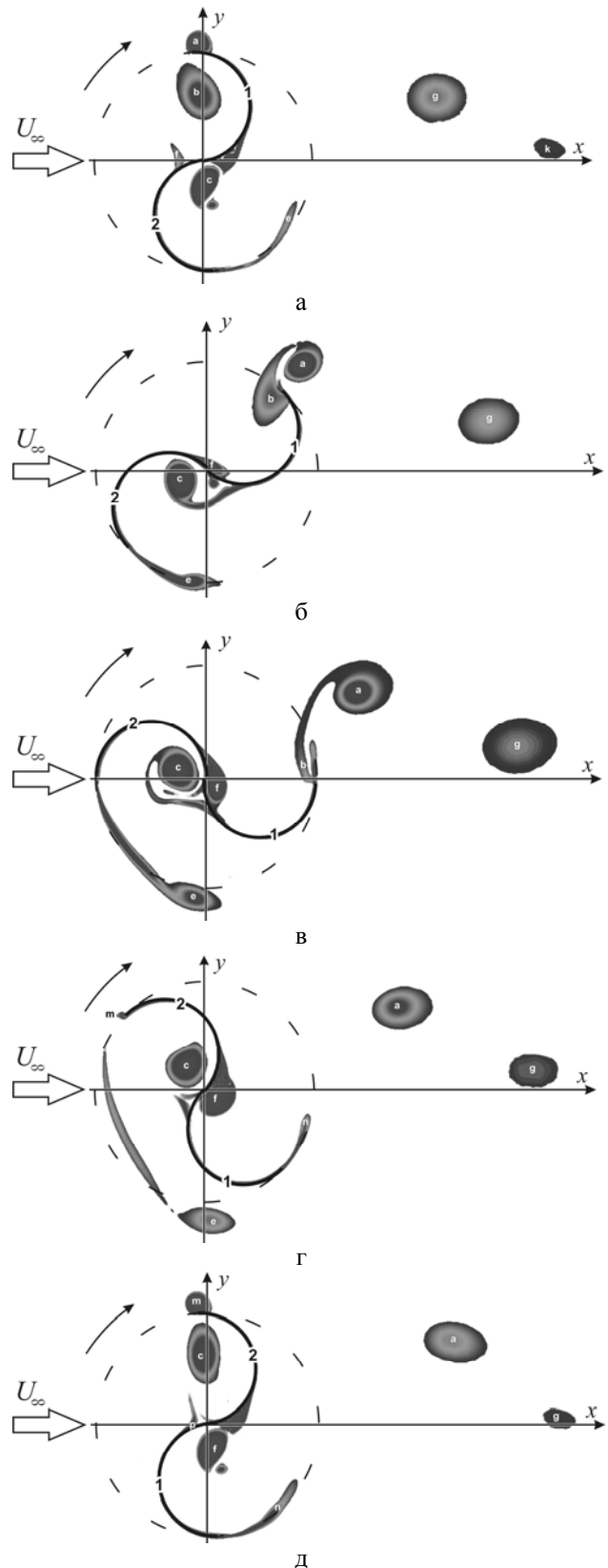


Рис. 4. Контуры завихренности возле подвижного ($\lambda = 1,4$) двухлопастного ротора Савониуса:

a – $\theta = 0^\circ$; **б** – $\theta = 45^\circ$; **в** – $\theta = 90^\circ$;

г – $\theta = 135^\circ$; **д** – $\theta = 180^\circ$

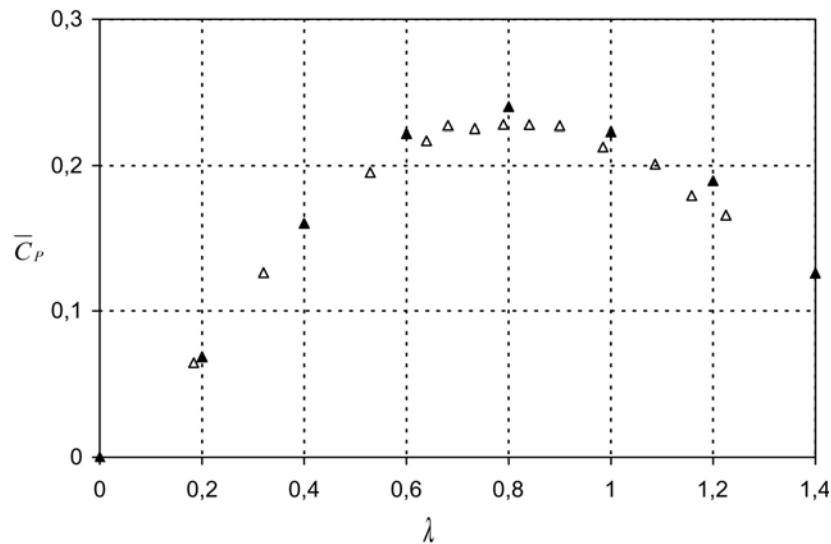


Рис. 5. Зависимость осредненного за один оборот коэффициента мощности \bar{C}_p от коэффициента быстроходности λ двухлопастного ротора Савониуса:

△, □ – эксперимент [15] ($Re = 4,32 \times 10^5$, $Re = 8,64 \times 10^5$);

▲, ■ – настоящая работа ($Re = 4,32 \times 10^5$, $Re = 8,64 \times 10^5$)

Заклучение

В результате проведенных исследований аэродинамики вертикально-осевых ветроэнергетических установок на основе уравнений Навье-Стокса выполнен анализ структуры и закономерностей развития нестационарных турбулентных несжимаемых течений при обтекании ротора Савониуса.

Установлено, что для большинства угловых положений неподвижного двухлопастного ротора Савониуса осредненный по времени коэффициент статического крутящего момента положительный, а для углов $55^\circ < \theta < 80^\circ$ – отрицательный. Увеличение числа Рейнольдса приводит к небольшому улучшению аэродинамических свойств ротора.

Выделены основные стадии формирования вихревой структуры при вращении ротора Савониуса. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными данными.

Литература

1. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – 919 с.
2. Templin R.J. Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine / R.J. Templin // NRC of Canada. Rep. LTR-160. –1974. – P. 185.
3. Strickland J.H. A vortex model of the Darrieus turbine: an analytical and experimental study / J.H. Strickland // Sandia laboratories report SAND79-7058. – 1980. – P. 253.

4. Проїсс Р.Д. Аэродинамика винта в нестационарном потенциальном потоке и ее приложение к расчету крыльчатых ветряков / Р.Д. Проїсс, Э.О. Сусью, Л. Морино // Ракетная техника и космонавтика. – 1980. – № 5. – С. 44-53.

5. Rung T. Restatement of the Spalart-Allmaras eddy-viscosity model in strain-adaptive formulation / T. Rung, U. Bunge, M. Schatz, F. Thiele // AIAA Journal. – 2003. – Vol. 4, № 7. – P. 1396-1399.

6. Rogers S.E. An upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations / S.E. Rogers, D. Kwak // AIAA Journal. –1990. – Vol. 28, № 2. – P. 253-262.

7. Roe P.L. Approximate riemann schemes / P.L. Roe // J.of Comp.Physics. – 1981. – Vol. 43. – P. 357-372.

8. Zijlema M. On the construction of third-order accurate TVD scheme using Leonard's normalized variable diagram with application to turbulent flows in general domains / M.Zijlema // Delft University of Technology: Technical Report DUT-TWI-94-104. – 1994. – 25 p.

9. Редчиц Д.А. Алгоритм численного решения двумерных течений несжимаемой жидкости на основе уравнений Навье-Стокса и его верификация / Д.А.Редчиц // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Механіка. – 2004. – Вип.8. Т. 1, № 6. – С. 67-75.

10. Приходько А.А. Численное моделирование нестационарного течения в следе за цилиндром на основе уравнений Навье-Стокса / А.А. Приходько, Д.А. Редчиц // Прикладная гидромеханика. – 2005. – Т. 7, № 1. – С. 56–71.

11. Приходько А.А. Численное моделирование эффекта Магнуса на основе уравнений Навье-Стокса / А.А. Приходько, Д.А. Редчиц // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Механіка. – 2005. – Т.1, № 7. – С. 40-60.

12. Приходько А.А. Численное моделирование дозвукового обтекания осциллирующего профиля на основе уравнений Навье-Стокса / А.А. Приходько, Д.А. Редчиц // *Техническая механика*. – 2006. – № 1. – С. 104-114.

13. Приходько А.А. Компьютерное моделирование аэродинамики подвижных роторов ветроагрегатов Дарье и Савониуса / А.А. Приходько, Д.А. Редчиц // *Аэрогидродинамика: проблемы и перспективы*. – 2006. – Т. 2. – С. 120-142.

14. Приходько А.А. Численное моделирование нестационарных турбулентных отрывных несжимаемых течений на основе уравнений Навье-Стокса / А.А. Приходько, Д.А. Редчиц // *Актуальні аспекти фіз.-мех.-х досліджень*. – 2007. – № 1. – С. 261-279.

15. Blackwell B.F. Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius Rotors / B.F. Blackwell, R.E. Sheldahl, L.V. Feltz // *Sandia National Laboratories. SAND76-0131*. – 1976. – P. 105.

Поступила в редакцию 14.09.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Задонцев, МНПК "ВЕСТА", Днепропетровск.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТУРБУЛЕНТНИХ ВІДРИВНИХ ТЕЧІЙ ПРИБІТКАННІ РОТОРА САВОНІУСА

Д.О. Редчиць

Сформульовано постановку задачі динаміки й аеродинаміки роторів вертикально-осьових вітроустановок. Розроблено програмно-методичне забезпечення для розрахунку аеродинамічних і енергетичних характеристик вітроустановок на базі осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (URANS) нестисливої рідини. При моделюванні турбулентності використовується однопараметрична диференціальна модель турбулентності SALSА. Розв'язок системи вихідних рівнянь отримано за допомогою неявного кінцево-об'ємного чисельного алгоритму, що базується на методі штучної стисливості й багатоблочних обчислювальних технологіях. Обговорюються результати розрахунку ротора Савоніуса з різною кількістю й геометричними характеристиками лопатей. Виконано аналіз поля течії навколо ротора Савоніуса. Виділено основні стадії формування вихрової структури при обертанні двох- і трилопатевого ротора Савоніуса. Встановлено вплив числа Рейнольдса, коефіцієнтів швидкохідності та заповнення на енергетичні характеристики ротора.

Ключові слова: ротор Савоніуса, вітроагрегат, рівняння Нав'є-Стокса, модель турбулентності, відрив потоку.

NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY TURBULENT SEPARATED FLOWS AROUND SAVONIUS ROTOR

D.A. Redchits

The statement of problem of dynamic and aerodynamics of vertical-axis wind turbine rotor is formulated. CFD code for calculation of aerodynamic and power characteristics of wind turbine on the basis of incompressible Reynolds average Navier-Stokes equations (URANS) is developed. The one-equation differential model of turbulence SALSА is used. The solution of a system of equations is obtained with the help of implicit finite volume numerical algorithm which is founded on a method of artificial compressibility and multiblock computational technologies. Outcomes of calculation of Savonius rotor with different quantity and geometrical performances of blades are considered. The analysis of flow field around of Savonius rotor is executed. The main stages of structure formation at rotation of two and three-blade Savonius rotor are separated. The influence of Reynolds numbers, tip-speed-ratios and solidity on power characteristics of Savonius rotors is determined.

Key words: Savonius rotor, wind turbine, Navier-Stokes equations, turbulence model, flow separation.

Редчиц Дмитрий Александрович – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института транспортных систем и технологий НАН Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: Redchits_DA@ua.fm.