

УДК 532.526

Д.А. РЕДЧИЦ¹, А.А. ПРИХОДЬКО²¹*Институт транспортных систем и технологий НАНУ, Украина*²*Днепропетровский национальный университет, Украина***АЭРОДИНАМИКА РОТОРОВ ДАРЬЕ И САВОНИУСА**

Анализируются проблемы, связанные с математическим моделированием нестационарных течений при обтекании роторов ветроагрегатов: запись исходных уравнений, выбор модели турбулентности, построение сетки, тестирование численной методики, обработка и визуализация результатов. Для решения уравнений Навье-Стокса несжимаемой жидкости в произвольных неортогональных координатах на подвижных структурированных сетках применяется метод искусственной сжимаемости. Численный алгоритм построен на базе схемы Roe. Обсуждаются результаты компьютерного моделирования роторов ветроагрегатов Дарье и Савониуса. Анализируется полученная вихревая структура обтекания, аэродинамические характеристики лопастей, изменения во времени угловой скорости роторов под действием набегающего потока ветра и внешней нагрузки. Разработанное программно-методическое обеспечение позволяет выбирать рациональные компоновки (количество лопастей, углы установки, форму профиля) с учетом их движения под действием нестационарного набегающего потока ветра, рассчитывать характеристики ветроустановок: мощность, угловую скорость вращения и т.д.

ветроагрегат, ротор Дарье, Савониуса, отрыв потока, уравнения Навье-Стокса, модель турбулентности

Введение

Разработка и усовершенствование альтернативных источников энергии является актуальной проблемой для энергетики. К одному из перспективных направлений решения данной проблемы относится ветроэнергетика. Большое распространение в мире получили двух- и трехлопастные горизонтально-осевые (ГО) ветроэнергетические установки (ВЭУ) пропеллерного типа. Это связано с высоким коэффициентом использования ними энергии ветра. Близкими значениями коэффициента мощности из вертикально-осевых (ВО) ВЭУ обладают только роторы Дарье.

Повышение мощности ВЭУ и увеличение коэффициента использования энергии ветра делает задачу выбора рациональной аэродинамической формы ротора весьма актуальной. Ведущую роль в работе ВЭУ играют нестационарные аэродинамические процессы, поэтому основным направлением исследований должна быть разработка новых универсальных методов расчета нестационарных процес-

сов при обтекании потоком роторов ветроагрегатов. 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 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.

Уравнения Навье-Стокса являются наиболее полной математической моделью механики жидкости и газа. Поэтому их применение совместно с моделью турбулентности, уравнением динамики ротора позволяет исследовать особенности нестационарного обтекания, структуру поля скоростей,

динамический срыв потока, процессы формирования и распада вихрей вокруг самого ротора и в его следе.

Постановка задачи. В работе рассматриваются ортогональные роторы Дарье и Савониуса, лопасти которых 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, перпендикулярной оси вращения ротора. Роторы Дарье и Савониуса полагаем абсолютно твердыми. Поскольку для максимальных скоростей ветра и значений коэффициента быстроходности локальные числа Маха низкие ($M < 0,3$), поле течения принято несжимаемым.

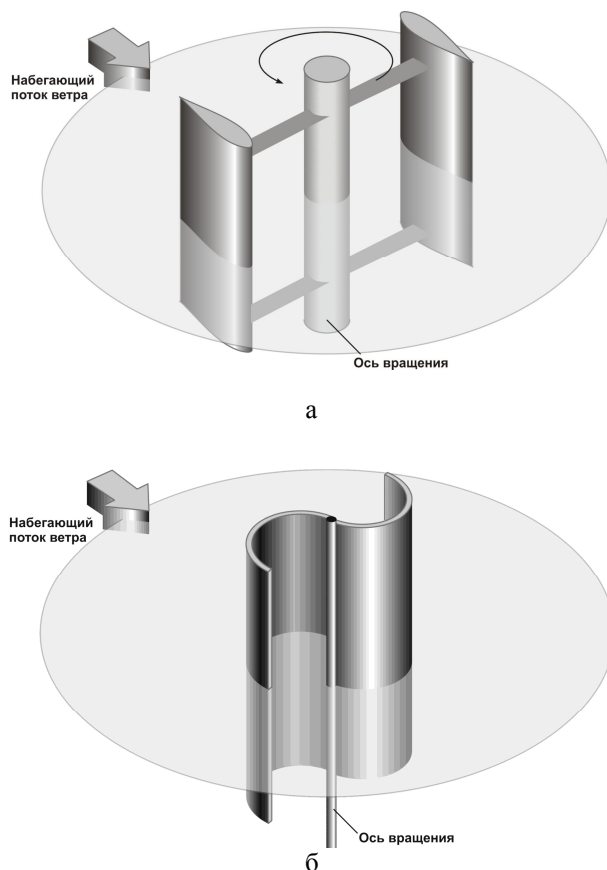


Рис. 1. Расчетные схемы для роторов Дарье (а) и Савониуса (б)

Процессы аэродинамики и динамики ветроагрегата описываются осредненными по Рейнольдсу

уравнениями Навье-Стокса несжимаемой жидкости и уравнением вращения ротора относительно неподвижной оси:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]; \quad (2)$$

$$I_z \frac{d\omega}{dt} = Q - Q_{ld} - Q_{fr}, \quad (3)$$

где x_i , $i = 1, 2$ – декартовы координаты (x, y) ; t – время; u_i – декартовы составляющие вектора скорости (u, v) ; p – давление; ρ – плотность; $\nu_{eff} = \nu + \nu_t$ – эффективный коэффициент кинематической вязкости; ν и ν_t – молекулярный и турбулентный коэффициенты кинематической вязкости; I_z – момент инерции ротора; ω – угловая скорость вращения; Q – крутящий момент, обусловленный действием потока на лопасти ВЭУ; Q_{ld} – момент полезной нагрузки, приложенный к валу электрогенератора; Q_{fr} – результирующий момент трения в электромеханической системе ветроагрегата.

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

1. 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 роторов ВО ВЭУ в качестве базовых использова-

лись регулярные сетки. В неодносвязных областях применялись многоблочные вычислительные технологии, в которых размерность отдельных пересекающихся 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 Р. Роу [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 псевдовремени второго порядка точности по физическому времени.

2. 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 – 13].

2.1. Ротор Дарье. Для иллюстрации особенностей обтекания ротора Дарье были выбраны геометрические параметры и коэффициент быстроходности, соответствующие экспериментальной работе G. Brochier [14] (рис. 2). На рис. 2, б кроме стандартной визуализации вихрей добавлены сплошные и прерывистые линии, а также отдельные точки для того, чтобы стиль интерпретации расчетных данных соответствовал стилю визуализации экспериментальных данных работы G. Brochier [14]. Приведена реконструкция структуры течения при работе двух- и трехлопастного роторов Дарье для коэффициента

быстроходности $\lambda = 2,14$ на основе натурального (а) и вычислительного (б) экспериментов (рис. 3). Для наглядности оставлены вихри максимальной интенсивности. Выделены стадии зарождения, развития и срыва вихрей при различных положениях лопасти на траектории.

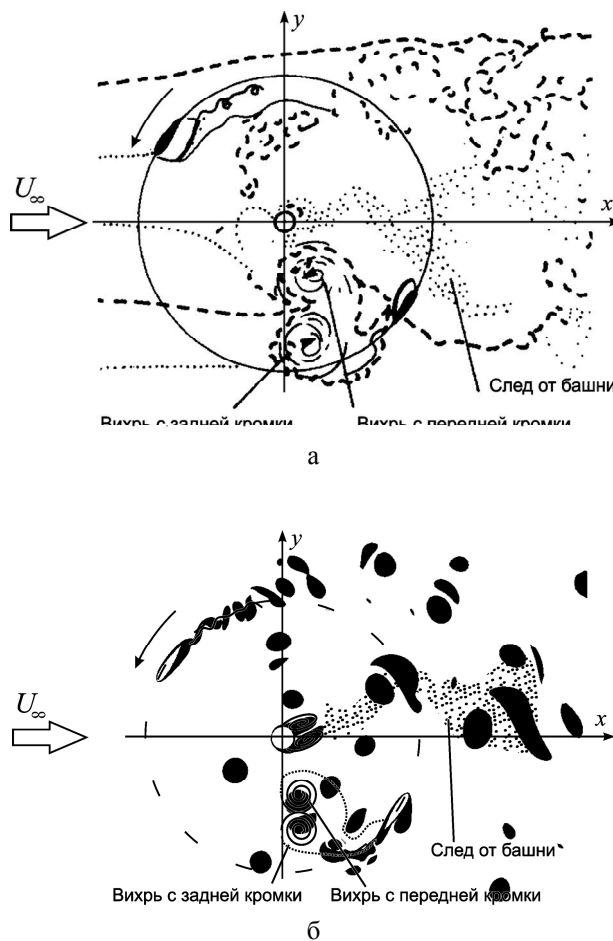


Рис. 2. Визуализация течения при работе двухлопастного ротора Дарье для коэффициента быстроходности $\lambda = 2,14$ на основе натурального (а) [14] и вычислительного (б) экспериментов

В целом картина течения вблизи ротора Дарье характеризуется существенными нестационарными явлениями.

К ним относятся, в первую очередь, динамический срыв потока, образование сложной системы вихрей, повышение уровня турбулентности в затененной области, взаимодействие вихрей различных размеров, скоростей движения и интенсивности с поверхностями роторов. Полученная картина тече-

ния хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными [14].

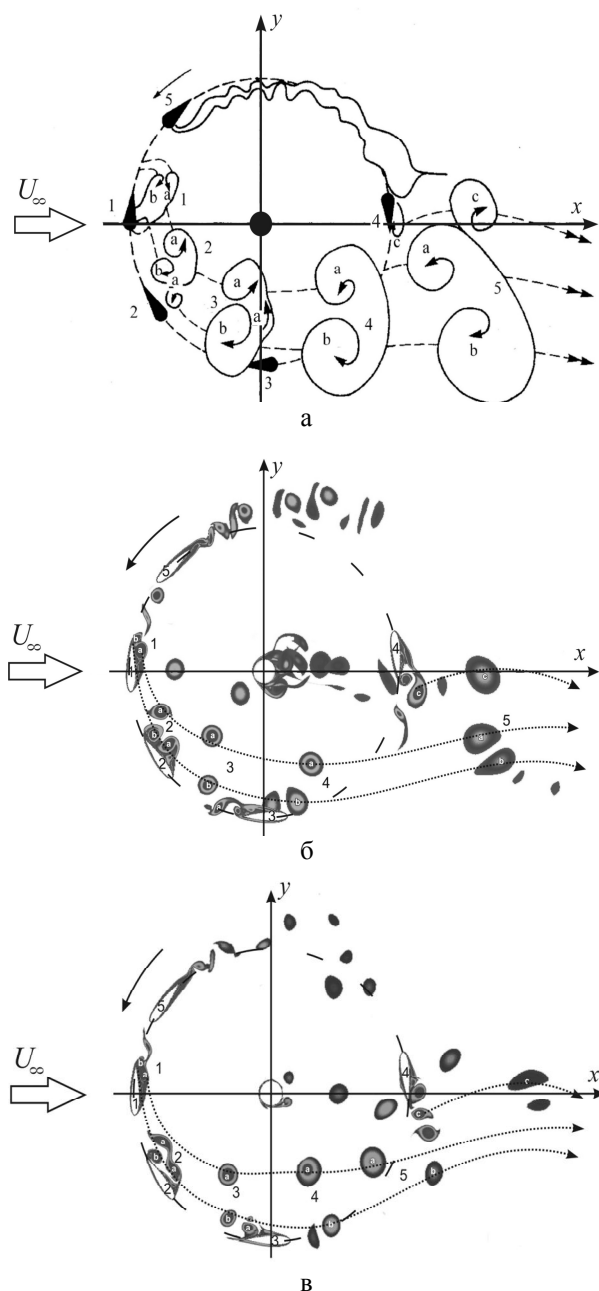


Рис. 3. Реконструкция структуры течения при работе двух- (а), (б) и трехлопастного (в) роторов Дарье для коэффициента быстроходности $\lambda = 2,14$ на основе натурного (а) [14] и вычислительного (б), (в) экспериментов

Установлено влияние чисел Рейнольдса, коэффициентов быстроходности и заполнения на энергетические характеристики ротора Дарье (рис. 4). Показано, что рост числа Рейнольдса приводит к увеличению значений коэффициента мощности. При

уменьшении коэффициента заполнения ротора Дарье коэффициент мощности становится менее чувствительным к изменению коэффициента быстроходности.

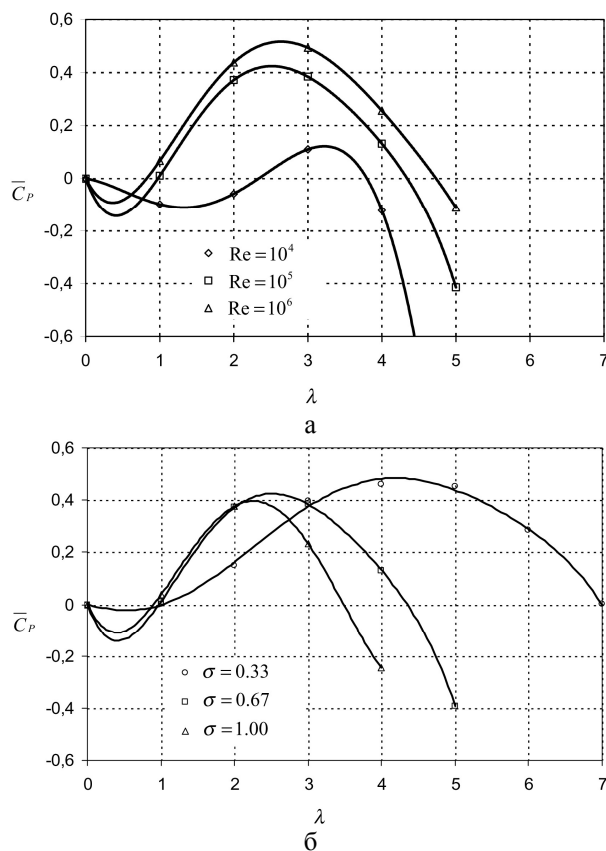


Рис. 4. Зависимость осредненного коэффициента мощности ротора Дарье от коэффициента быстроходности для различных чисел Рейнольдса (а) ($\sigma = 0,67$) и коэффициентов заполнения (б) ($Re = 10^5$)

2.2. Ротор Савониуса. Представлены результаты трех типов вычислительных экспериментов по изучению аэродинамических и энергетических характеристик двух- и трехлопастного ротора Савониуса.

Первый тип – вычислительные эксперименты для неподвижного ротора Савониуса, который фиксировался при различных углах относительно набегающего потока с шагом $\Delta\theta = 10^\circ$. Для большинства угловых положений ротора Савониуса осредненный по времени коэффициент крутящего момента положительный.

Второй тип – вычислительные эксперименты при фиксированном коэффициенте быстроходности ро-

тора. Коэффициенты крутящего момента и мощности двух- и трехлопастного ротора Савониуса определялись осреднением за один полный оборот. Выделены основные стадии формирования вихревой структуры при вращении ротора. Определены зависимости коэффициентов крутящего момента и мощности от коэффициента быстроходности. У двухлопастного ротора значения энергетических характеристик выше, чем у трехлопастного (рис. 5). Полученные результаты удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными данными [15].

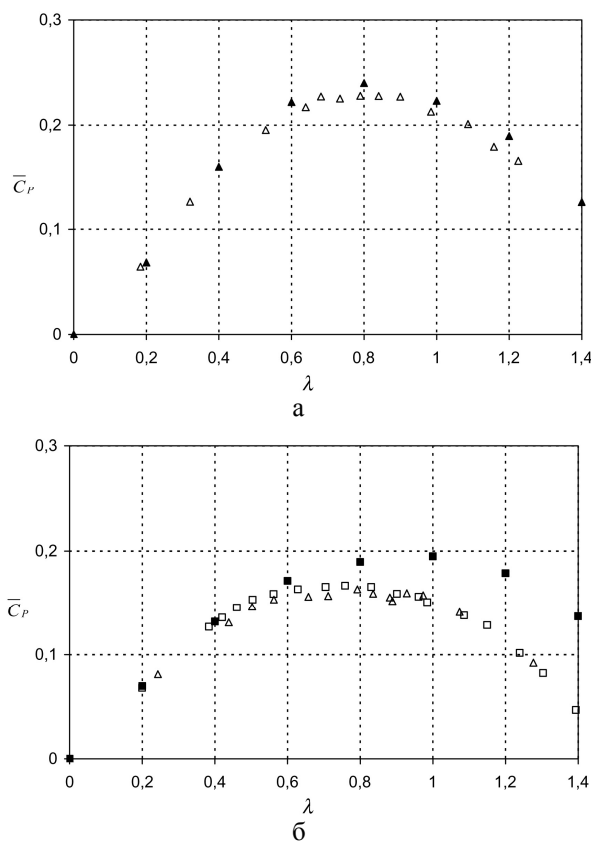


Рис. 5. Зависимость осредненного за один оборот коэффициента мощности $\bar{C}_P$ от коэффициента быстроходности λ двух-(а) и трехлопастного (б) ротора Савониуса

$\Delta, \square$ – эксперимент [15] ($Re = 4,32 \times 10^5$,
 $Re = 8,64 \times 10^5$);
 $\blacktriangle, \blacksquare$ – настоящая работа ($Re = 4,32 \times 10^5$,
 $Re = 8,64 \times 10^5$)

Третий тип вычислительных экспериментов – решение связанной задачи динамики и аэродинами-

ки трехлопастного ротора Савониуса. Проанализирована картина течения вокруг ротора, приведены зависимости коэффициентов лобового сопротивления, подъемной силы и крутящего момента, а также угловой скорости вращения от времени (рис. 6).

Расчет проводился в три этапа.

Целью первого этапа ($t = 0 \div 7$) было получение периодического течения, по структуре похожего на дорожку Кармана.

На втором ($t = 7 \div 13$) и третьем ($t = 13 \div 23$) этапах совместно с аэродинамической задачей решалось уравнение вращения ротора Савониуса. С момента времени $t = 7$ ротор освобождается и вращается под действием набегающего потока ветра.

Вращение ротора приводит к увеличению интенсивности вихрей. Частота схода вихрей определяется скоростью набегающего потока, характерными размерами и частотой вращения самого ротора.

На третьем этапе, в момент времени $t = 13$, к ротору Савониуса прикладывается момент нагрузки. Происходит стабилизация угловой скорости вращения ротора (относительно среднего значения $\bar{\omega} = 2,8$), а также возникают близкие к периодическим колебания коэффициентов лобового сопротивления, подъемной силы и крутящего момента.

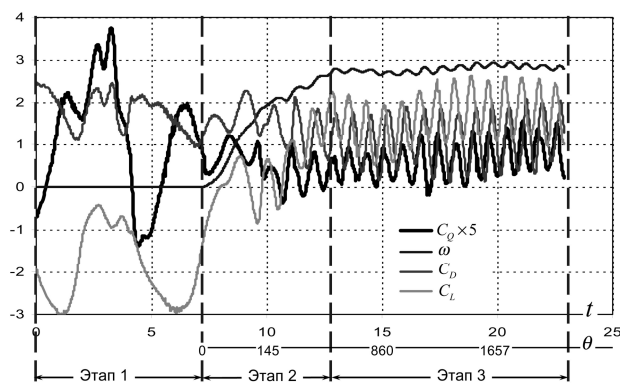


Рис. 6. Изменение неосредненных коэффициентов лобового сопротивления C_D , подъемной силы C_L , крутящего момента C_Q и угловой скорости вращения ω трехлопастного ротора Савониуса от времени t и углового положения ротора θ

Заключение

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 роторов Дарье и Савониуса. Установлено влияние чисел Рейнольдса, коэффициентов быстроходности и заполнения на энергетические характеристики вертикально-осевых ветроэнергетических установок.

Литература

1. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – 919 с.
2. Templin R.J. Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine // National Research Council of Canada. Rep. LTR-160. – 1974. – P. 185.
3. Strickland J.H. A vortex model of the Darrieus turbine: an analytical and experimental study // Sandia laboratories report SAND79-7058. – 1980. – P. 253.
4. Пройсс Р.Д., Сусью Э.О., Морино Л. Аэродинамика винта в нестационарном потенциальном потоке и ее приложение к расчету крыльчатых ветряков // Ракетная техника и космонавтика. – 1980. – № 5. – С. 44-53.
5. Rung T., Bunge U., Schatz M., Thiele F. Restatement of the Spalart-Allmaras eddy-viscosity model in strain-adaptive formulation // AIAA Journal. – 2003. – Vol. 4, № 7. – P. 1396-1399.
6. Rogers S.E., Kwak D. An upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations // AIAA Journal. – 1990. – Vol. 28, № 2. – P. 253-262.
7. Roe P.L. Approximate riemann schemes // Journal of Computational Physics. – 1981. – Vol. 43. – P. 357-372.

8. Zijlema M. On the construction of third-order accurate TVD scheme using Leonards normalized variable diagram with application to turbulent flows in general domains // 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 // Вісник Дніпропетровського університету. Механіка. – 2004. – Вип.8., т. 1, № 6. – С. 67-75.

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

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

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

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

14. Brochier G., Fraunie P., Beguier C., Paraschivoiu I. Water channel experiments of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades // Journal Propulsion. – 1986. – Vol. 2, № 5. – P. 445-449.

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

Поступила в редакцию 14.09.2007

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