

17. Приходько А.А. Численное моделирование нестационарных трансзвуковых турбулентных отрывных течений при обтекании профилей / А.А. Приходько, О.Б. Полевой, А.А. Пилипенко // Тези науково-практичної конференції «Комп'ютерна гідромеханіка». – К., 2008. – С. 41.

Надійшла до редколегії 28.11.08

УДК 532.516

Д. А. Редчиц

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «ТРАНСМАГ»

АЭРОДИНАМИКА РОТОРА САВОНИУСА

Представлені результати трьох типів обчислювальних експериментів з вивчення аеродинамічних та енергетичних характеристик дво- та трилопатевого ротора Савоніуса. Для чисельного моделювання аеродинаміки ротора застосовуються осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса. При моделюванні турбулентності використовується однопараметрична диференціальна модель турбулентності. Розв'язок системи вихідних рівнянь отримано за допомогою неявного скінчено-об'ємного чисельного алгоритму, що базується на методі штучної стисливості. Виконано аналіз поля течії навколо ротора Савоніуса. Виділено основні стадії формування вихорової структури. Встановлено вплив числа Рейнольда та коефіцієнтів швидкохідності на енергетичні характеристики ротора Савоніуса.

Введение. Разработка и усовершенствование альтернативных источников энергии является актуальной проблемой для энергетики Украины. 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 энергии ветра. Близкими значениями коэффициента мощности из вертикально-осевых (ВО) ВЭУ обладают только роторы Дарье. Основными преимуществами ротора Савониуса является простота конструкции, независимость от направления ветра, сравнительно низкая скорость вращения и большой крутящий момент.

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 процессов при обтекании потоком роторов ветроагрегатов.

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

Известные методики определения аэродинамических и энергетических характеристик ротора ВЭУ основаны на экспериментальных данных [1], импульсной [2] и вихревой [3] теориях, 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 [1; 5] 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 следе за ветроагрегатом.

Постановка задачи. В работе рассматриваются ортогональные двух- и трехлопастные роторы 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 Савониуса полагаем абсолютно твердыми. Поскольку для максимальных скоростей ветра и значений коэффициента быстроходности локальные числа Маха низкие ($M < 0.3$), поле течения можно считать несжимаемым.

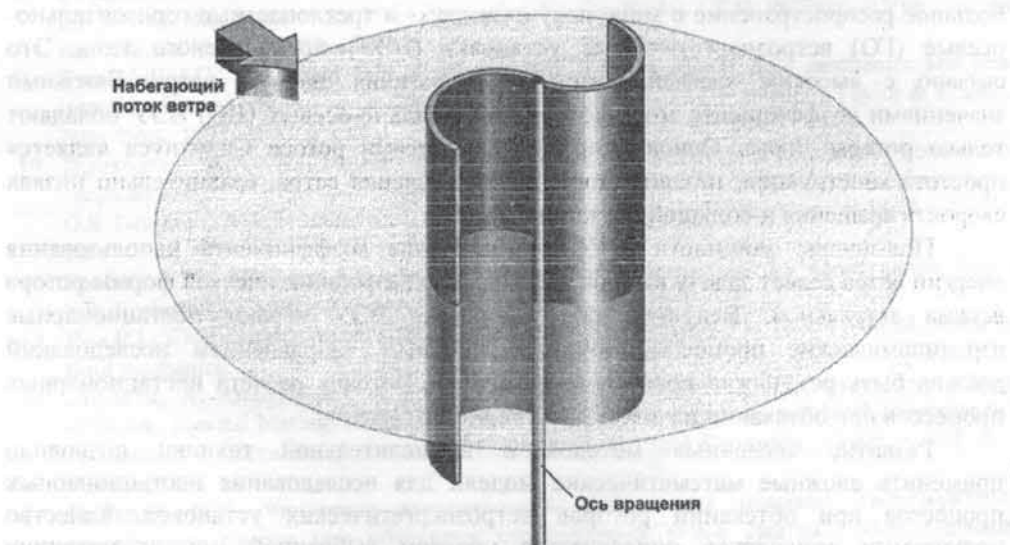


Рис. 1. Расчетная схема ротора Савониуса

Процессы аэродинамики и динамики ветроагрегата описываются осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса несжимаемой жидкости и уравнением вращения твердого тела относительно неподвижной оси:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} &= 0, & (1) \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], & (2) \\ I_Z \frac{d\omega}{dt} &= Q - Q_{ld} - Q_{fr}, & (3) \end{aligned} \right.$$

где x_i , $i=1,2$ – декартовы координаты (x,y) ; t – время; u_i – декартовы составляющие вектора средней скорости (u,v) ; p – давление; ρ – плотность; ν и ν_t – молекулярный и турбулентный коэффициенты кинематической вязкости; I_Z – момент инерции ротора; ω – угловая скорость вращения; Q – крутящий момент, определяемый из решения задачи аэродинамики; 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) [6].

В качестве начальных условий задавались параметры невозмущенного потока во всей расчетной области. На внешней границе применялись неотражающие граничные условия, для расчета которых использовался метод характеристик. На поверхности твердого тела ставилось условие прилипания. В модели турбулентности SALSA значение рабочей переменной на теле задавалось равным нулю, на входной границе – 0.1, на выходной – ставилось условие Неймана. Начальная угловая скорость ротора полагалась равной нулю.

Численный алгоритм. Система исходных уравнений (1) – (3), замкнутая дифференциальной моделью турбулентности, интегрировалась численно с использованием метода контрольного объема. Разработанный численный алгоритм базируется на трехслойной неявной схеме Rogers-Kwak [7], имеющей второй порядок точности интегрирования по времени, третий порядок противоточной аппроксимации конвективных слагаемых, и второй порядок центрально-разностной аппроксимации диффузионных членов. Полученная блочно-матричная система алгебраических уравнений решалась методом итераций Гаусса-Зейделя.

В модели турбулентности для аппроксимации конвективных слагаемых применялась схема TVD с ограничителем потоков ISNAs третьего порядка.

Верификация разработанного алгоритма и комплекса программ выполнена на задачах о течении в каверне, задаче Блазиуса, обтекании неподвижного и вращающегося цилиндров, неподвижного и колеблющегося профилей [8-13].

Обсуждения результатов. В настоящей работе проведено три типа 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 $\Delta\theta = 10^\circ$.

Второй – вычислительные эксперименты при фиксированном коэффициенте быстроходности ротора. Значения коэффициентов крутящего момента и мощности двух- и трехлопастного ротора Савониуса определялись осреднением за один оборот.

Третий тип вычислительных экспериментов – решение связанной задачи динамики и аэродинамики трехлопастного ротора Савониуса. Ротор приводился в движение под действием набегающего потока ветра. В этом случае аэродинамические (крутящий момент) и динамические (угловая скорость) характеристики ротора определялись как функции времени.

Первые два типа вычислительных экспериментов сравнивались с экспериментальными данными [14].

Условия физического и вычислительного экспериментов. В [14] выполнено экспериментальное изучение двух- и трехлопастного ротора Савониуса в низкоскоростной аэродинамической трубе с целью определения аэродинамических и энергетических характеристик. Скорость невозмущенного потока составляла $U_\infty = 7 \text{ м/с}$ и $U_\infty = 14 \text{ м/с}$, что соответствует числам Рейнольдса, рассчитанным по диаметру ротора $Re = 4.32 \times 10^5$ и $Re = 8.64 \times 10^5$, соответственно.

Геометрия двухлопастного ротора Савониуса. Лопастей ротора в своем сечении имеют полуокружности с радиусом $r = 0.25 \text{ м}$ (рис. 2 а) [14]. Радиус вращения R измерялся от оси вращения до внешней грани лопастей. Расчетная сетка содержала 800×600 узлов.

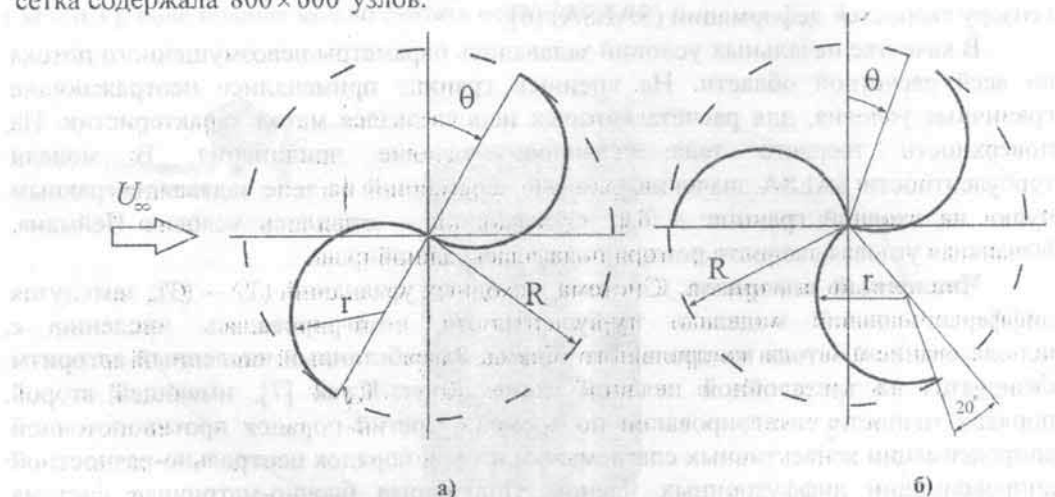


Рис. 2. Схема двух-(а) и трехлопастного (б) ротора Савониуса

Геометрия трехлопастного ротора Савониуса. Дуга лопастей у трехлопастного ротора Савониуса была уменьшена на 20° по внешней грани (рис. 2 б) [14]. Расчетная сетка содержала $1050 \times 980 \approx 10^6$ узлов. Подробная сетка необходима для адекватной передачи сложной геометрии ротора Савониуса и качественного учета процессов в турбулентном пограничном слое.

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.

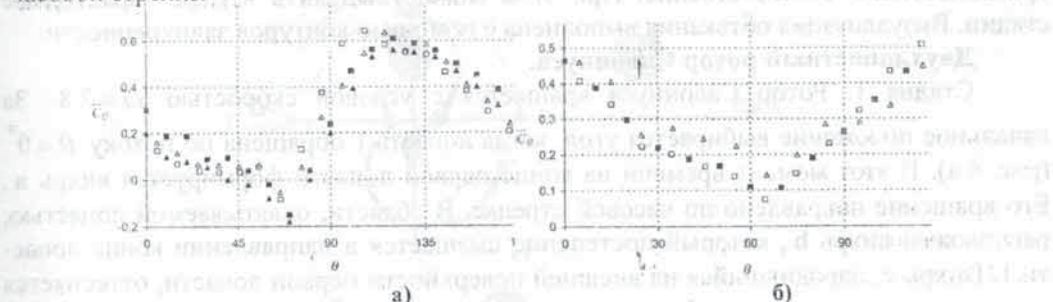


Рис. 3. Изменение осредненного по времени коэффициента крутящего момента \bar{C}_Q для различных угловых положений θ двух-(а) и трехлопастного (б) ротора Савониуса Δ, \square - эксперимент ($Re = 4.32 \times 10^5$, $Re = 8.64 \times 10^5$) [14]; \triangle, \blacksquare - настоящая работа ($Re = 4.32 \times 10^5$, $Re = 8.64 \times 10^5$)

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 а).

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.

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 а). Смещение кривой коэффициента крутящего момента является следствием задержки отрыва потока на лопастях с ростом числа Рейнольдса от 4.32×10^5 до 8.64×10^5 , что приводит к небольшому улучшению аэродинамических свойств ротора.

Изменение осредненного по времени статического коэффициента крутящего момента от углового положения для трехлопастного ротора Савониуса приведено на рис. 3 б. В этом случае статический коэффициент крутящего момента всегда положительный при любом угловом положении ротора.

Подвижный ротор Савониуса. Анализ поля течения и энергетических характеристик двух- и трехлопастного ротора Савониуса выполнены при фиксированном коэффициенте быстроходности.

Анализ картины течения. 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° и 120° для двухлопастного и трехлопастного, соответственно. При этом можно выделить четыре характерные стадии. Визуализация обтекания выполнена с помощью контуров завихренности.

Двухлопастный ротор Савониуса.

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, оттесняется 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, но уже с меньшей скоростью.

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: $a \rightarrow m$, $b \rightarrow c$, $c \rightarrow f$, $e \rightarrow n$, $g \rightarrow a$, $k \rightarrow g$.

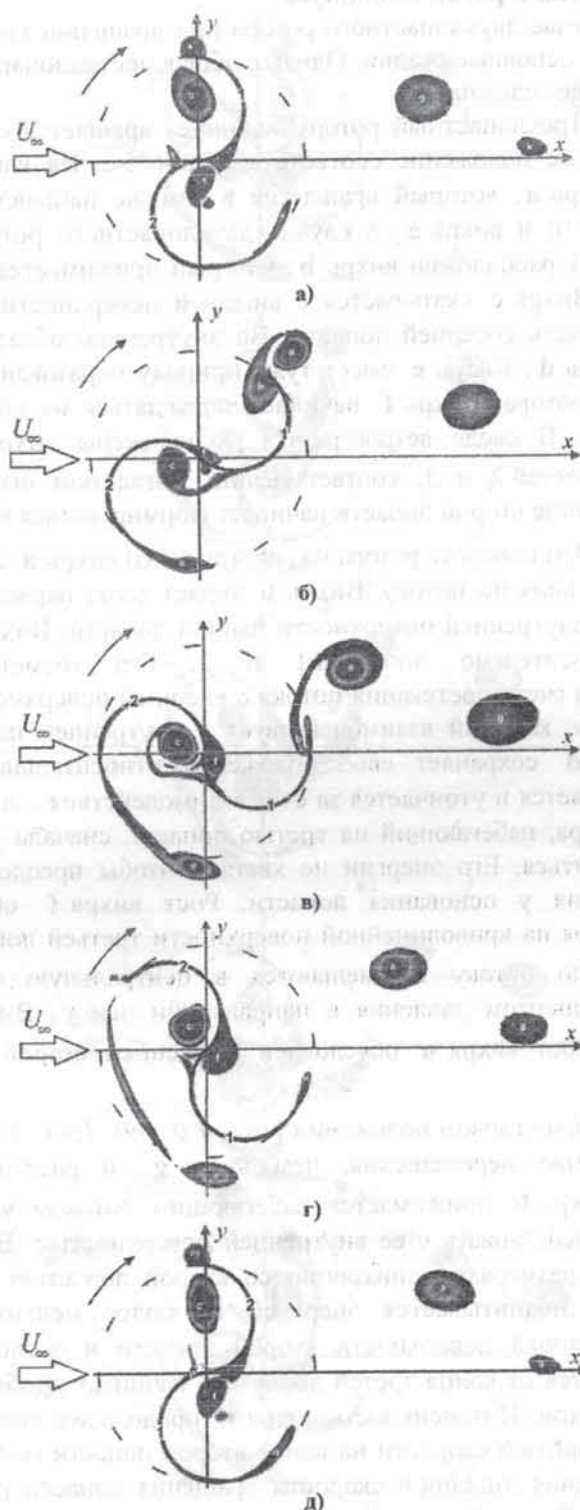


Рис. 4. Контуры завихренности возле подвижного ($\lambda = 1.4$) двухлопастного ротора Савониуса: а) $\theta = 0^\circ$; б) $\theta = 45^\circ$; в) $\theta = 90^\circ$; г) $\theta = 135^\circ$; д) $\theta = 180^\circ$

Трехлопастный ротор Савониуса

Как и в случае двухлопастного ротора при вращении трехлопастного можно выделить четыре основные стадии. Однако, общая нестационарная картина течения вокруг ротора более сложная.

Стадия 1. Трехлопастный ротор Савониуса вращается с угловой скоростью $\omega = 2.8$. Начальное положение соответствует рис. 5 а. На конце первой лопасти наблюдается вихрь **a**, который вращается в том же направлении и имеет ту же интенсивность, что и вихрь **a**, в случае двухлопастного ротора. Во внутренней области лопасти 1 расположен вихрь **b**, который прижимается к ней набегающим потоком ветра. Вихрь **c** скатывается с внешней поверхности первой лопасти во внутреннюю область соседней лопасти. Во внутренней области третьей лопасти расположен вихрь **d**. Вихрь **e** имеет ту же природу образования, что и вихрь **e** у двухлопастного ротора. Вихрь **f** начинает зарождаться на внешней поверхности третьей лопасти. В следе ветроагрегата расположены вихри **g** и **k**, которые сорвались с лопастей 2 и 3, соответственно, когда они были в этом угловом положении. На конце второй лопасти начинает формироваться вихрь **n**.

Стадия 2. При повороте ротора на 30° (рис. 5 б) вихрь **a** отрывается от лопасти 1 и сносится вниз по потоку. Вихрь **b** теряет свою первоначальную форму и приближается к внутренней поверхности данной лопасти. Вихрь **c** сохраняет свое положение относительно лопастей 1 и 2. Его геометрические размеры увеличиваются за счет перетекания потока с внешней поверхности первой лопасти и остатков вихря, который взаимодействует с внутренней поверхностью второй лопасти. Вихрь **d** сохраняет свое положение относительно третьей лопасти. Вихрь **e** вытягивается и утончается за счет взаимодействия с набегающим потоком ветра. Поток ветра, набегающий на третью лопасть, сначала ускоряется, а потом начинает замедляться. Его энергии не хватает, чтобы преодолеть возрастающий градиент давления у основания лопасти. Рост вихря **f** обусловлен отрывом пограничного слоя на криволинейной поверхности третьей лопасти. Вихри **g** и **k** сносятся вниз по потоку и смещаются в центральную область. Смещение обусловлено градиентом давления в направлении оси y . Вихрь **k** теряет свою интенсивность. Рост вихря **n** обусловлен движением второй лопасти навстречу потоку.

Стадия 3. При угловом положении ротора $\theta = 60^\circ$ (рис. 5 в) вихрь **a** обладает большей скоростью перемещения, чем вихрь **g**, и расстояние между ними сокращается. Вихрь **b** прижимается набегающим потоком к первой лопасти и начинает взаимодействовать с ее внутренней поверхностью. Вихрь **c** продолжает увеличиваться в размерах и синхронно со второй лопастью перемещается в ее следе. Вихрь **d** подпитывается энергией от более мелких вихрей, которые срываются с внешней поверхности второй лопасти и поглощаются вихрем **d**. Вихрь **e** отрывается от конца третьей лопасти и начинает дробиться на отдельные, более мелкие, вихри. Интенсивность вихря **n** продолжает увеличиваться по мере увеличения абсолютной скорости на конце второй лопасти (которая получается из векторного сложения линейной скорости вращения лопасти ротора Савониуса и скорости ветра). Вихрь **f** увеличивается в размерах и смещается к основанию ротора. На конце третьей лопасти начинает зарождаться вихрь **m**.

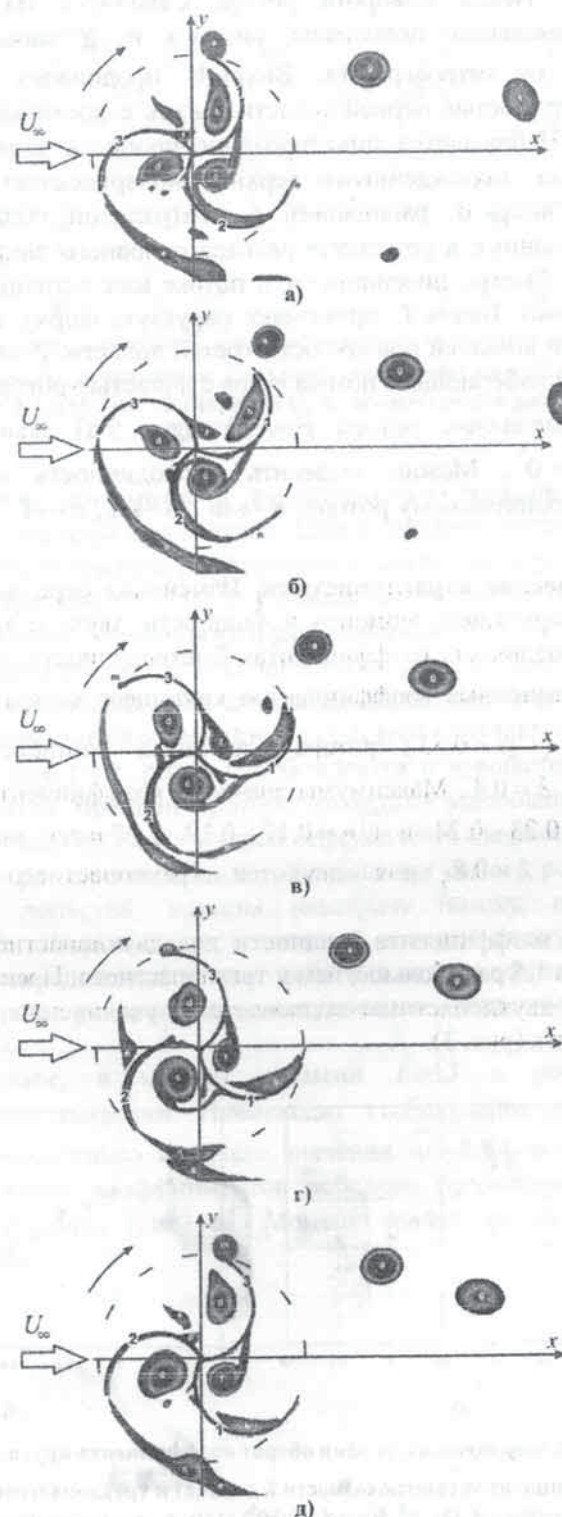


Рис. 5. Контуры завихренности возле подвижного ($\lambda = 1.4$) трехлопастного ротора Савониуса: а) $\theta = 0^\circ$; б) $\theta = 30^\circ$; в) $\theta = 60^\circ$; г) $\theta = 90^\circ$; д) $\theta = 120^\circ$

Стадия 4. После поворота ротора Савониуса на угол 90° (рис. 5 г) относительно начального положения, вихри **a** и **g** сносятся вниз по потоку, формируя след от ветроагрегата. Вихрь **b** продолжает взаимодействовать с внутренней поверхностью первой лопасти. Вихрь **c** достигает своей максимальной интенсивности. Наблюдается нивелирование процесса слияния вихря **c** с более мелкими вихрями, порожденными верхней поверхностью первой лопасти. На данной стадии вихрь **d** расположен в центральной области третьей лопасти. Вихри **e**, образованные в результате распада основного вихря **e**, имеют меньшую интенсивность и быстро диссипируют в потоке или поглощаются другими, более крупными вихрями. Вихрь **f** принимает округлую форму и утончается в своем основании вблизи внешней поверхности третьей лопасти. Рост вихря **m** обусловлен взаимодействием набегающего потока ветра с лопастью ротора Савониуса.

Угловое положение ротора $\theta = 120^\circ$ (рис. 5 д) эквивалентно положению ротора при $\theta = 0^\circ$. Можно выделить периодичность в генерации вихрей, аналогичную двухлопастному ротору: $a \rightarrow m$, $b \rightarrow d$, $c \rightarrow f$, $d \rightarrow c$, $f \rightarrow p$, $g \rightarrow a$, $e \rightarrow n$, $k \rightarrow g$.

Энергетические характеристики. Изменения осредненных за один оборот коэффициентов крутящего момента и мощности двух- и трехлопастного ротора Савониуса при различных коэффициентах быстроходности приведены на рис. 6, 7. Максимумы осредненных коэффициентов крутящего момента двух- ($\bar{C}_Q = 0.40$) и трехлопастного ($\bar{C}_Q = 0.33$) ротора Савониуса соответствуют коэффициенту быстроходности $\lambda = 0.4$. Максимумы значений коэффициентов мощности лежат в диапазоне $\bar{C}_P = 0.23 - 0.24$ и $\bar{C}_P = 0.17 - 0.19$ в области значений коэффициента быстроходности $\lambda = 0.8$ для двух- и трехлопастного ротора Савониуса, соответственно.

Максимум коэффициента мощности для двухлопастного ротора Савониуса приблизительно в 1.5 раза больше, чем у трехлопастного. Преимущество трехлопастного ротора над двухлопастным заключается в увеличении минимума стартового крутящего момента (рис. 3).

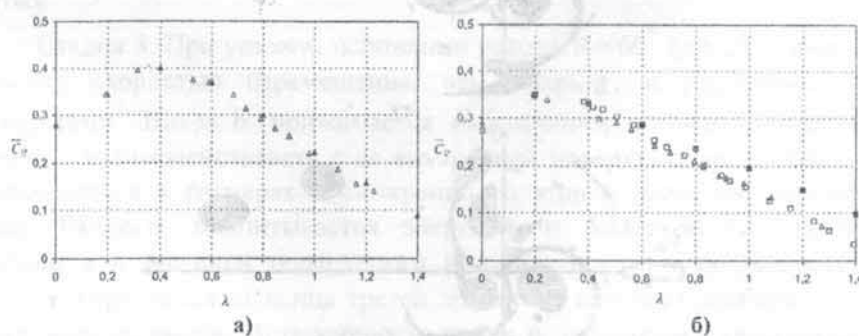


Рис. 6. Изменение осредненного за один оборот коэффициента крутящего момента \bar{C}_Q для различных коэффициентов быстроходности λ двух-(а) и трехлопастного (б) ротора Савониуса Δ, \square - эксперимент ($Re = 4.32 \times 10^5$, $Re = 8.64 \times 10^5$) [14]; \triangle, \blacksquare - настоящая работа ($Re = 4.32 \times 10^5$, $Re = 8.64 \times 10^5$)

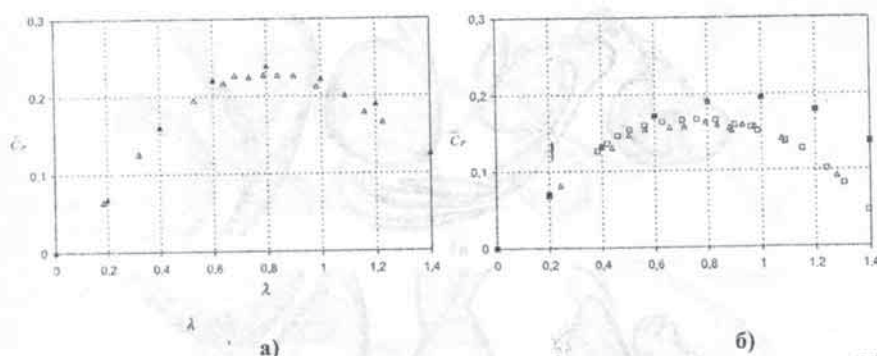


Рис. 7. Изменение осредненного за один оборот коэффициента крутящего момента \bar{C}_T для различных коэффициентов быстроходности λ двух-(а) и трехлопастного (б) ротора Савониуса Δ, \square – эксперимент ($Re = 4.32 \times 10^5$, $Re = 8.64 \times 10^5$) [14]; $\blacktriangle, \blacksquare$ – настоящая работа ($Re = 4.32 \times 10^5$, $Re = 8.64 \times 10^5$)

Связанная задача динамики и аэродинамики трехлопастного ротора Савониуса. 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.

Контуры завихренности возле трехлопастного ротора Савониуса приведены на рис. 8, 9. В случае неподвижного ротора за лопастями формируются вихри, которые поочередно отрываются от лопастей и сносятся вниз по потоку (рис. 8 а-в).

С момента времени $t = 7$ ротор освобождается и вращается под действием набегающего потока ветра. Вращение ротора приводит к увеличению интенсивности вихрей (рис. 8, 9). Частота схода вихрей определяется скоростью набегающего потока, характерными размерами и частотой вращения самого ротора Савониуса. Вихри, сходящие с лопастей, идущих навстречу потоку, имеют меньшую интенсивность, чем те, которые сходят с лопастей, которые движутся по потоку. В первом случае вихри замедляются за счет действия вязких эффектов, а во втором случае, они, наоборот, ускоряются движущимися лопастями. Направление вращения их различно.

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, близкие к периодическим, колебания коэффициентов лобового сопротивления, подъемной силы и крутящего момента (рис. 10). Момент трения на валу ветроагрегата полагался равным нулю.

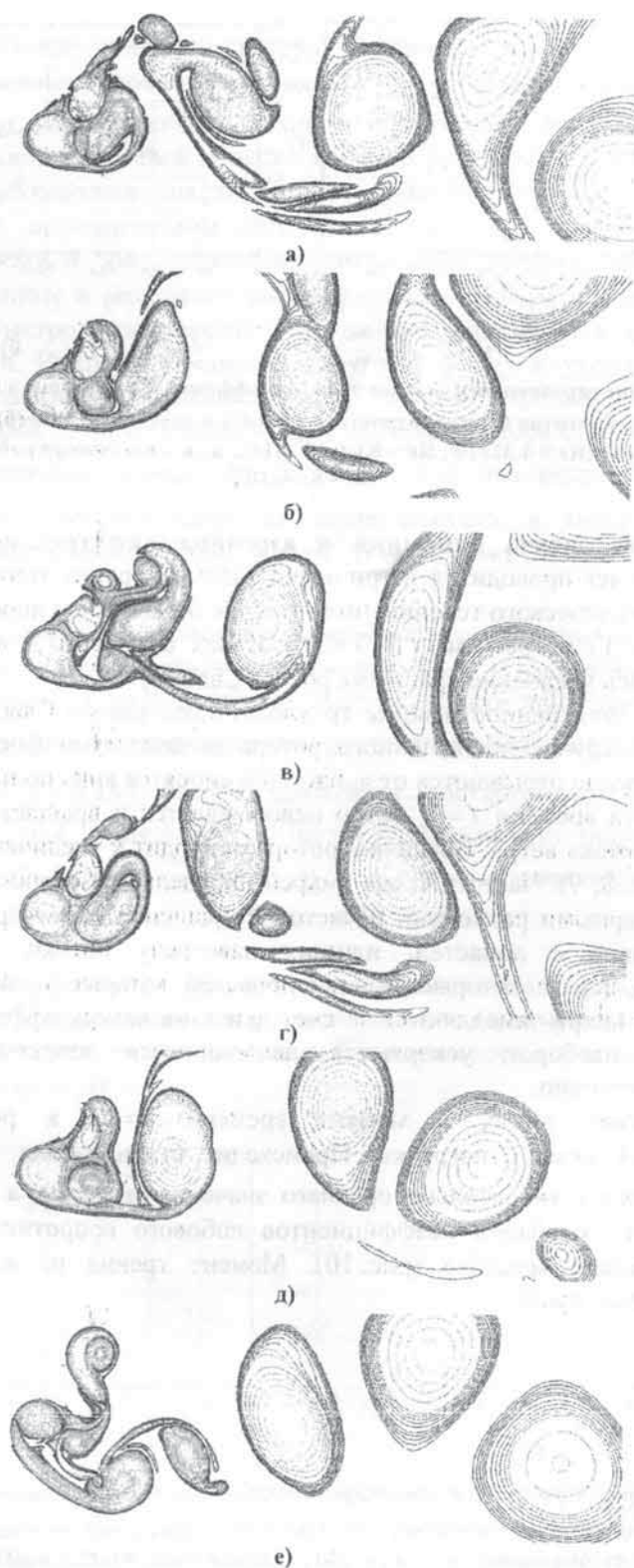


Рис. 8. Контуры завихренности вокруг трехлопастного ротора Савониуса для различных моментов времени: а) $t = 0$; б) $t = 2$; в) $t = 4$; г) $t = 6$; д) $t = 8$; е) $t = 10$

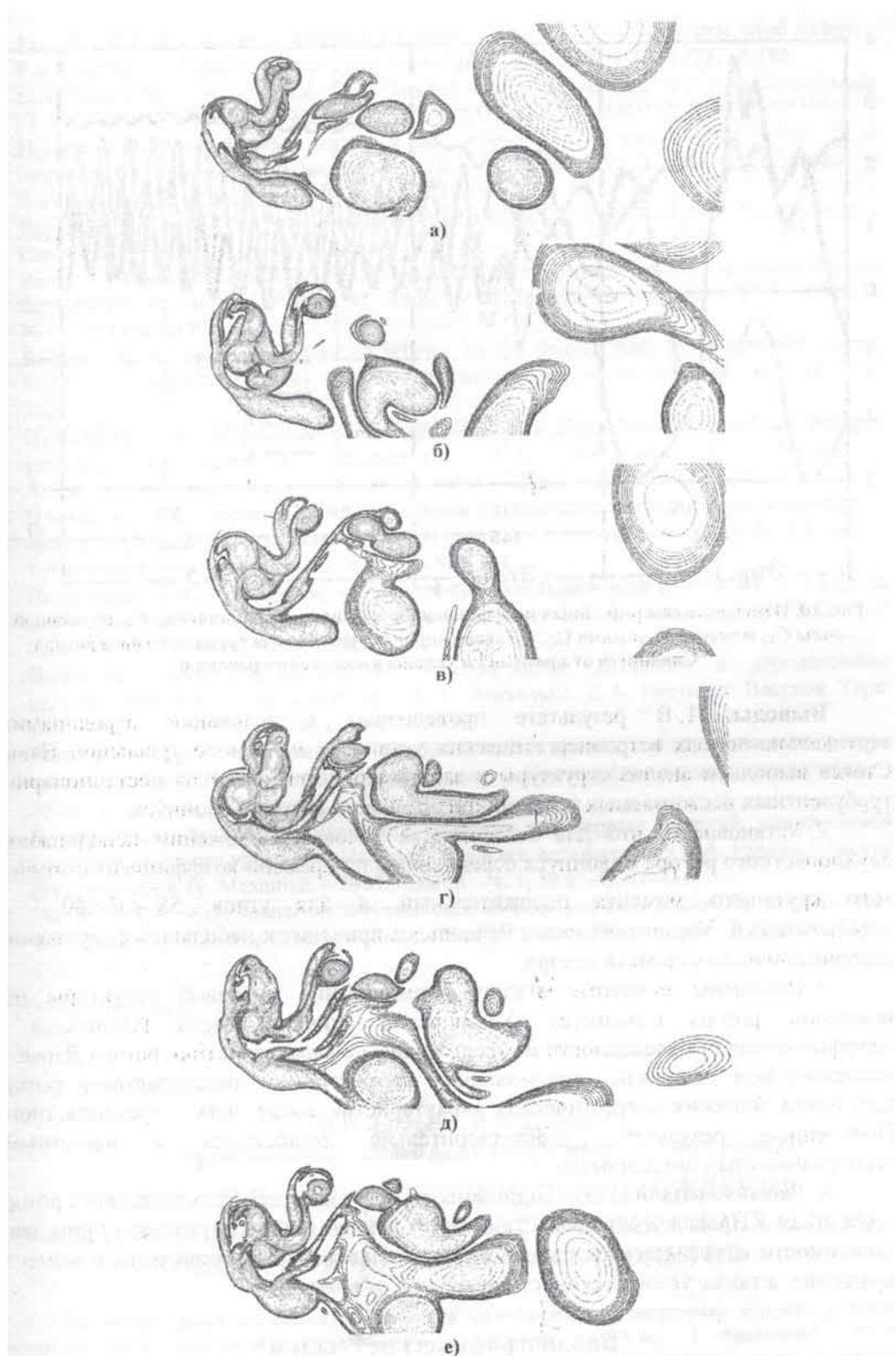


Рис. 9. Контуры завихренности вокруг трехлопастного ротора Савониуса для различных моментов времени: а) $t = 12$; б) $t = 14$; в) $t = 16$; г) $t = 18$; д) $t = 20$; е) $t = 22$

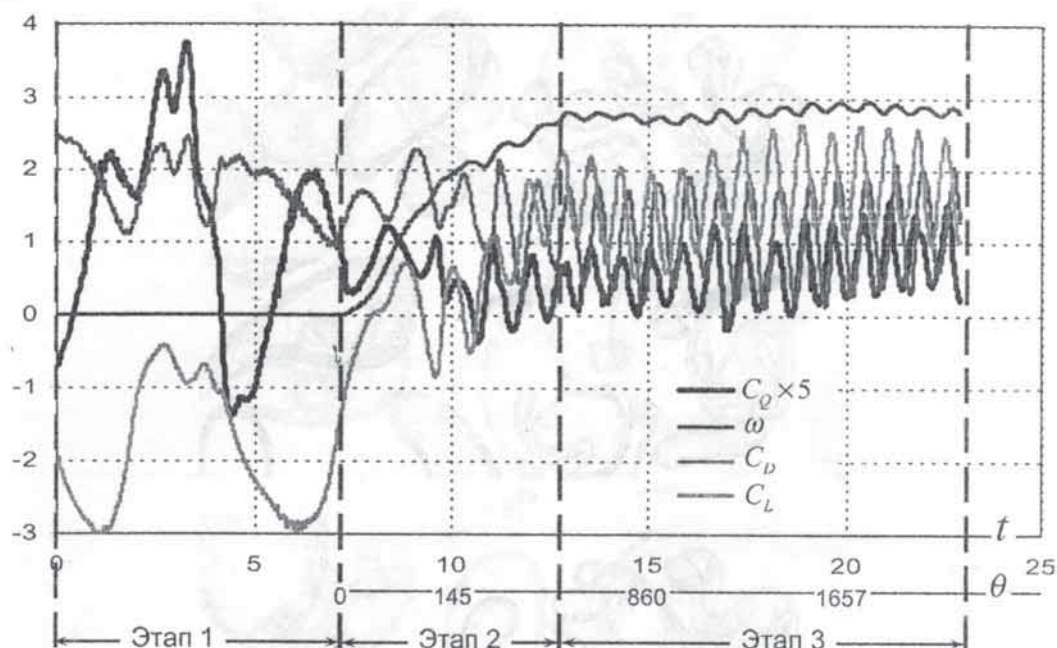


Рис. 10. Изменение неосредненных коэффициентов лобового сопротивления C_D , подъемной силы C_L , момента вращения C_Q , угловой скорости вращения ω трехлопастного ротора Савониуса от времени t и углового положения ротора θ

Выводы. 1. 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.

2. 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.

3. Выделены основные стадии формирования вихревой структуры при вращении ротора Савониуса. Установлено влияние числа Рейнольдса и коэффициентов быстроходности на энергетические характеристики ротора Дарье. В исследованном диапазоне определяющих параметров у двухлопастного ротора Савониуса значения энергетических характеристик выше, чем у трехлопастного. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными данными.

4. Решена связанная задача динамики и аэродинамики трехлопастного ротора Савониуса. Проанализирована картина течения вокруг ротора, приведены зависимости коэффициентов лобового сопротивления, подъемной силы и момента вращения, а также угловой скорости вращения от времени.

Библиографические ссылки

1. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Х., 2003. – 919 с.

2. **Templin R.J.** Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine / R.J. Templin // 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 / J.H. Strickland // Sandia laboratories report SAND79-7058. – 1980. – P. 253.
4. **Пройс Р.Д.** Аэродинамика винта в нестационарном потенциальном потоке и ее приложение к расчету крыльчатых ветряков / Р.Д.Пройс, Э.О. Сусью, Л. Морино // Ракетная техника и космонавтика. – 1980. – № 5. – С.44–53.
5. **Paraschivoiu I.** Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept / I. Paraschivoiu. – Canada: Polytechnic international press, 2002. – 438 p.
6. **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.
7. **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.
8. **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.
9. **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.
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.** Математическое моделирование динамики и аэродинамики вертикально-осевых ветроагрегатов / А.А. Приходько, Д.А. Редчиц // Вестник Харк. нац. ун-та. – 2005. – № 703. Вып. 5. – С. 178–197.
12. **Редчиц Д. А.** Численное решение связанной задачи динамики и аэродинамики ротора ветроагрегатов / Д.А.Редчиц, А.А.Приходько // Космическая наука и технология. – 2005. – Т.11, № 1. – С. 27–35.
13. **Редчиц Д.А.** Алгоритм численного решения двумерных течений несжимаемой жидкости на основе уравнений Навье-Стокса и его верификация / Д.А. Редчиц // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Механіка. – 2004. – Вип.8. – т.1, № 6. – С. 67–75.
14. **Blackwell B.F.** Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius Rotors / B.F. Blackwell, R.E. Sheldahl, L.V. Feltz // Sandia Na-tional Laboratories. SAND76-0131. – 1976. – P. 105.

Надійшла до редколегії 10.11.08

УДК 532.516

В.И. Елисеев, В.В. Давидсон

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЯХ СЛАБО КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

На основі теорії іонобміну розглянуто проходження електричних струмів у слабо концентрованих електролітах. Отримано аналітичні розв'язки і проведено аналіз характеристичного рівняння. Знайдені якісні закономірності проходження сталих і змінних струмів у даному середовищі.

© В.И. Елисеев, 2009