

УДК 532.516

*С. В. Тарасов, канд. техн. наук, Д. А. Редчиц, канд. физ.-мат. наук,
С. В. Моисеенко, канд. техн. наук, А. С. Тарасов*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АЭРОДИНАМИКИ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Проведена серия численных расчетов нестационарного обтекания вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Дарье и Савониуса турбулентным потоком ветра. В результате математического моделирования аэродинамики вертикально-осевой ветроэнергетической установки выполнена реконструкция структуры течения вокруг роторов Савониуса и Дарье с учетом взаимовлияния, выделены основные стадии формирования вихревой структуры при обтекании роторов. Проведены качественные и количественные оценки влияния ротора Савониуса на суммарные аэродинамические и энергетические характеристики вертикально-осевой ветроэнергетической установки.

Ключевые слова: математическое моделирование, ветроэнергетическая установка, роторы Дарье и Савониуса, уравнения Навье – Стокса.

Введение. К настоящему времени основным недостатком вертикально-осевых (ВО) ветроэнергетических установок (ВЭУ) является низкое значение коэффициента использования энергии ветра. Физическая причина низкой эффективности существующих ВО ВЭУ заключается в явлении динамического срыва потока при больших углах атаки обтекания лопастей ротора ВЭУ. Отрыв набегающего потока от поверхности лопасти ведет к резкому снижению аэродинамической эффективности, потерям энергии в системе образующихся вихрей за ротором ВО ВЭУ. Механические способы предотвращения срыва потока приводят, как правило, к удорожанию конструкции ВО ВЭУ и снижению сроков ее эксплуатации.

Зачастую на практике ВЭУ с ротором Дарье комплектуют ротором Савониуса для обеспечения самозапуска. Но как влияет ротор Савониуса на аэродинамику ротора Дарье на рабочем режиме, не исследовалось ни экспериментально, ни теоретически.

На сегодняшний день остается открытым вопрос о взаимовлиянии роторов Дарье и Савониуса. Эксплуатация данных роторов в единой связке обеспечивает запуск ВО ВЭУ при слабом ветре или когда ротор Дарье находится в «мертвых точках» (угловое положение, при котором стартовый крутящий момент равен нулю).

Однако как показала практика эксплуатации ВО ВЭУ с роторами Дарье такие «мертвые точки», существующие на бумаге, как правило, отсутствуют в реальных условиях вследствие нестационарного воздействия набегающего потока воздуха и турбулентных пульсаций. К тому же,

в крайнем случае, ВО ВЭУ может быть запущена с помощью генератора, который на несколько секунд переводится в режим электродвигателя. Вследствие различных режимов эксплуатации роторов данных типов возникает вопрос о рациональности использования их в «жесткой» связке на рабочем (номинальном) режиме.

Ранее в [1] проведено численное моделирование обтекания неподвижной и подвижной ВО ВЭУ с роторами Савониуса и Дарье. Целью настоящего исследования является оценка взаимовлияния аэродинамики роторов Дарье и Савониуса на рабочем режиме ВО ВЭУ, а также их вклад в общую энергетическую эффективность.

Постановка задачи. В работе рассматривается ВО ВЭУ состоящая из ортогонального ротора Дарье и Савониуса, лопасти которых имеют длину, многократно превышающую хорду (рис. 1). Для исследования процессов аэродинамики ротора ВО ВЭУ применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса несжимаемой жидкости. Замыкание осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса осуществляется с помощью дифференциальной однопараметрической модели Spalart – Allmaras адаптированной к тензору скорости деформаций (SALSA) [4]. 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 [6]. На поверхности твердого тела ставилось условие прилипания.

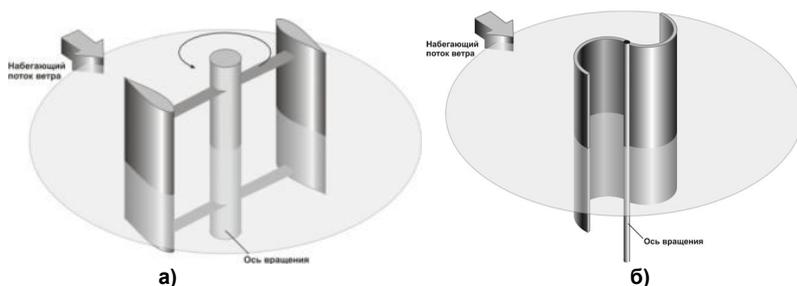


Рис. 1 – Расчетные схемы для роторов Дарье (а) и Савониуса (б)

Метод решения. Для численного решения поставленной задачи использовался разработанный специализированный пакет вычислительной аэродинамики на основе уравнений Навье – Стокса, включая несколько дифференциальных моделей турбулентности (SA [5], SARC, SALSA [4]), для расчета стационарных и нестационарных ламинарных и турбулентных течений. Интегрирование системы исходных уравнений осуществлялось на базе метода контрольного объема. Для конвективных потоков использовалась противопоточная аппроксимация Rogers – Kwak [3], основанная на схеме Roe [2] третьего порядка точности.

Результаты и обсуждение. В качестве примера рассматривается аэродинамика ротора ВО ВЭУ-0020 мощностью 20 кВт (табл. 1), предназначенная для электроснабжения удаленных небольших производственных и жилых объектов.

Таблица 1 – Основные характеристики ВЭУ-0020

	размерные	безразмерные
<i>Ротор Дарье</i>		
- профиль лопасти	NACA 0020	NACA 0020
- диаметр ротора, D	7,2 м	10,17
- радиус ротора, R	3,6 м	5,085
- хорда лопасти, с	0,708 м	1
- длина лопасти, h	0,708 м	1
- угол установки лопасти, γ	0°	0°
- коэффициент быстроходности, λ	—	3
<i>Ротор Савониуса</i>		
- профиль лопасти	полуокружность	полуокружность
- радиус лопасти, r	0,45 м	0,64
- длина лопасти, h	0,3 м	1
- зазор между лопастями, s	0,215 м	0,3
- толщина лопасти, t	0,01 м	0,014
- коэффициент быстроходности, λ	—	0,87
- угловая скорость вращения, ω	10,83 рад/с	0,583
- скорость ветра, U	13 м/с	1,0
- кинематическая вязкость воздуха, ν	$1,47 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$	1,0
- число Рейнольдса, Re_c	—	$6,5 \cdot 10^5$

Численное моделирование проводилось в безразмерном виде. В качестве характерных величин выбирались скорость ветра и хорда лопасти. За нулевой угол поворота ВО ВЭУ выбирается положение, когда одна из лопастей ротора Дарье направлена навстречу потоку, а вторая по потоку. В центре ВО ВЭУ находится двухлопастный ротор Савониуса, представляющий собой две полуокружности, смещенные относительно друг друга на величину s . Многоблочная структурированная пересекающаяся сетка (типа Chimera) вокруг ВО ВЭУ с роторами Савониуса и Дарье приведена на рис. 2.

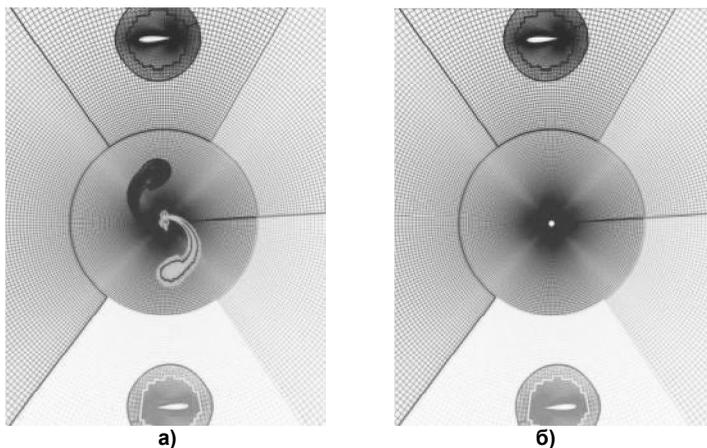


Рис. 2 – Многоблочная пересекающаяся структурированная сетка (типа Chimera) вокруг ВО ВЭУ с роторами Савониуса и Дарье (а) и ротором Дарье (б)

Реконструкция структуры обтекания подвижного ротора ВО ВЭУ набегающим потоком воздуха выполнена с помощью изобар и контуров завихренности, характеризующих размеры и интенсивность сходящих с лопастей вихрей для различных угловых положений на четвертом обороте ВО ВЭУ (рис. 3 – 6).

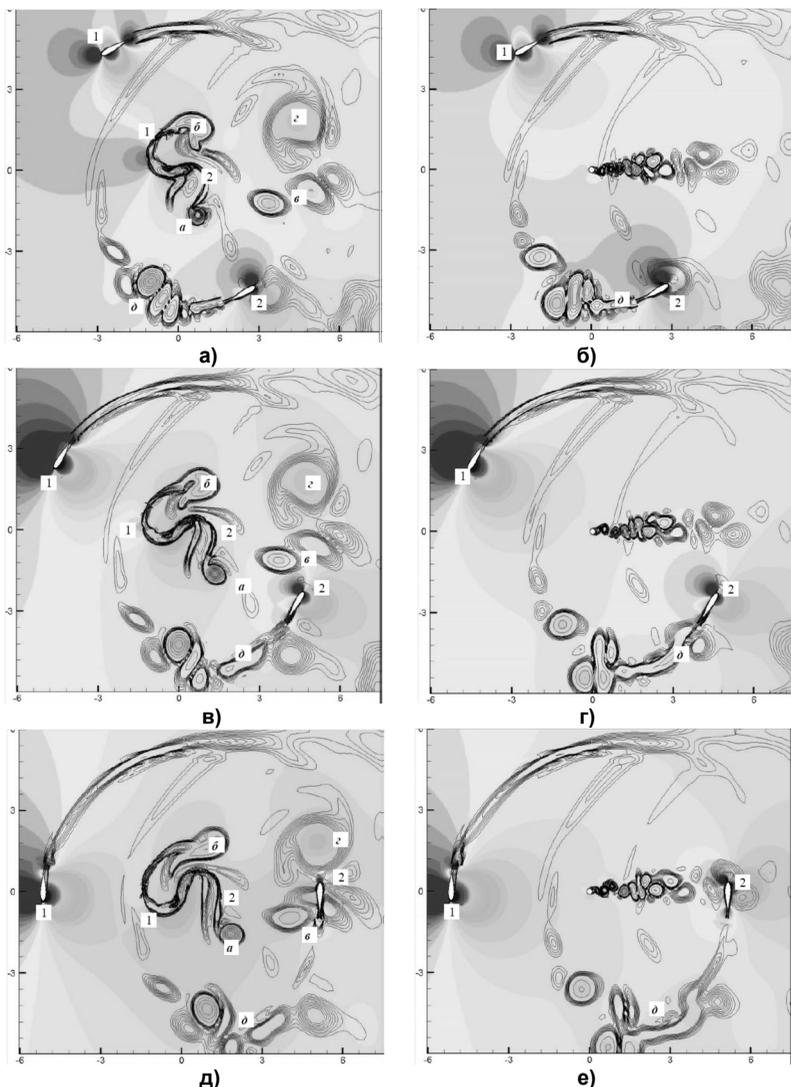


Рис. 3 – Развитие течения при обтекании роторов ВО ВЭУ. Изобары и контуры завихренности для угловых положений: а), б) – $\theta = 30^\circ$; в), г) – $\theta = 60^\circ$; д), е) – $\theta = 90^\circ$

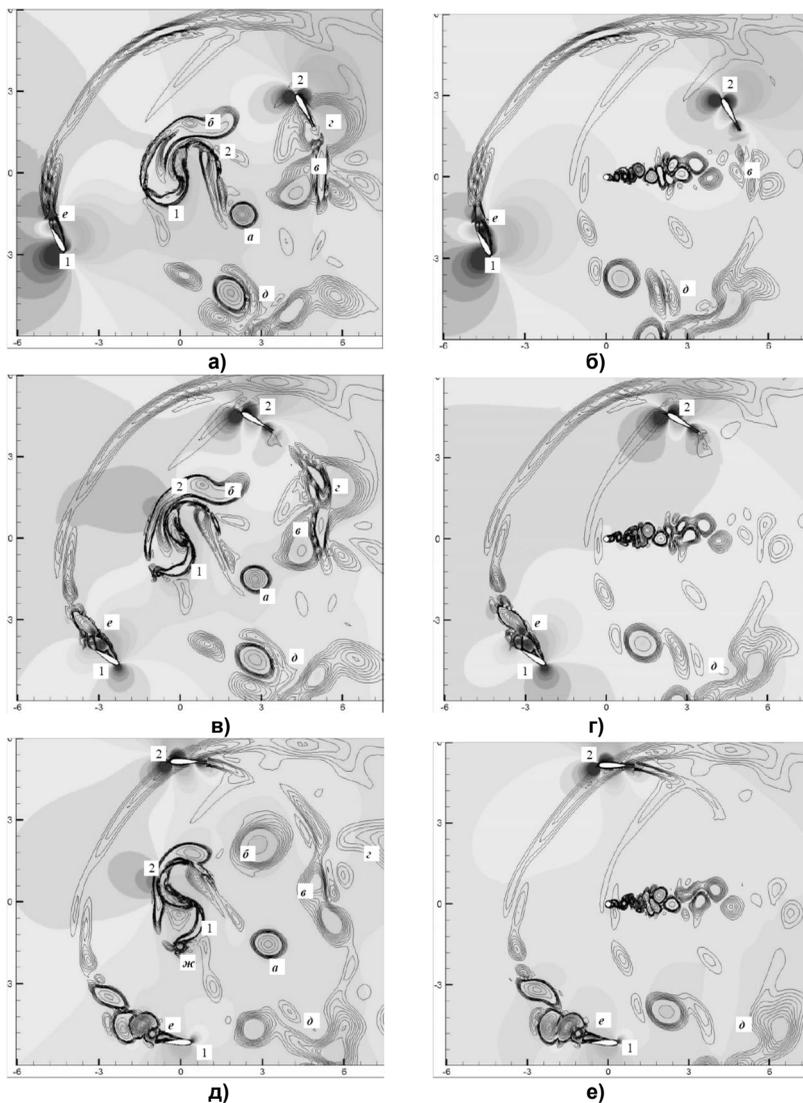


Рис. 4 – Развитие течения при обтекании роторов ВО ВЗУ.
 Изобары и контуры завихренности для угловых положений:
 а), б) – $\theta = 120^\circ$; в), г) – $\theta = 150^\circ$; д, е – $\theta = 180^\circ$

При угле поворота $\theta = 30^\circ$ (рис. 3, б) внутреннее пространство ВО ВЗУ с ротором Дарье практически не содержит крупных вихревых структур, за исключением небольшой области внизу рисунка. Обтекание лопастей ротора Дарье носит присоединенный характер. В следе второй лопасти наблюдается группа вихрей δ , сорвавшихся с внутрен-

ней поверхности данной лопасти. Наличие каскада вихрей δ является следствием динамического отрыва потока со второй лопасти ротора Дарье.

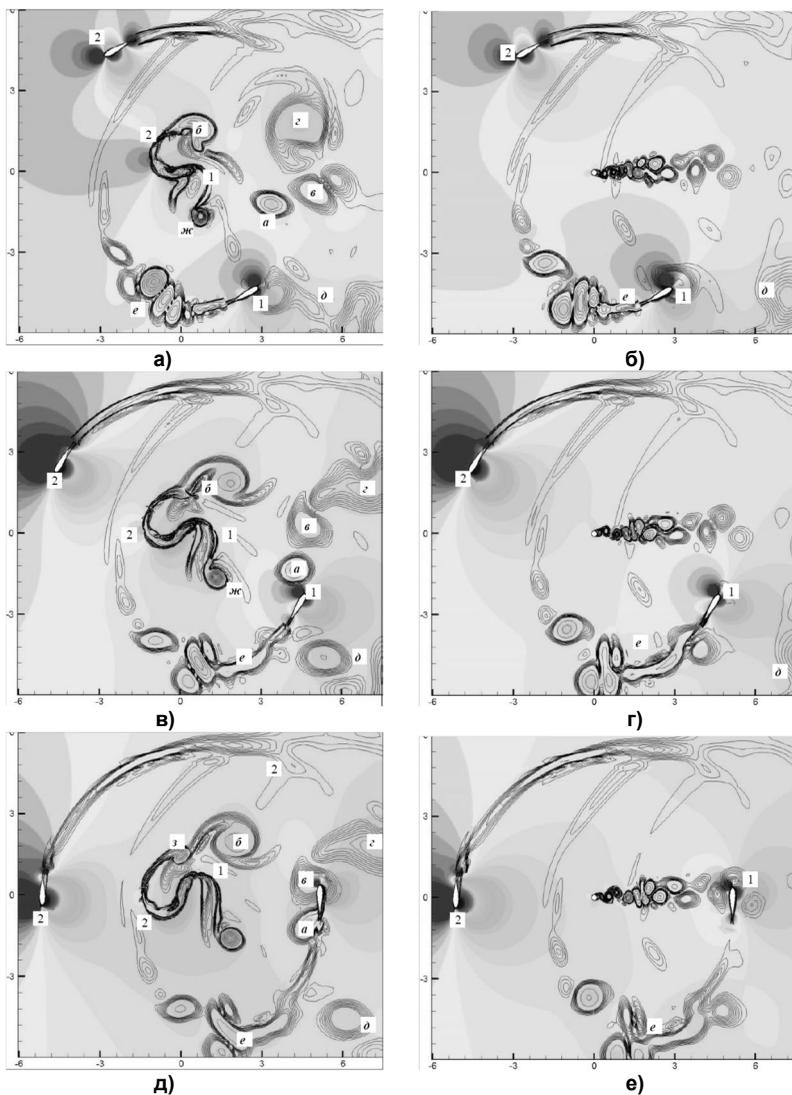


Рис. 5 – Развитие течения при обтекании роторов ВО ВЗУ.
 Изобары и контуры завихренности для угловых положений:
 а), б) – $\theta = 210^\circ$; в), г) – $\theta = 240^\circ$; д), е) – $\theta = 270^\circ$

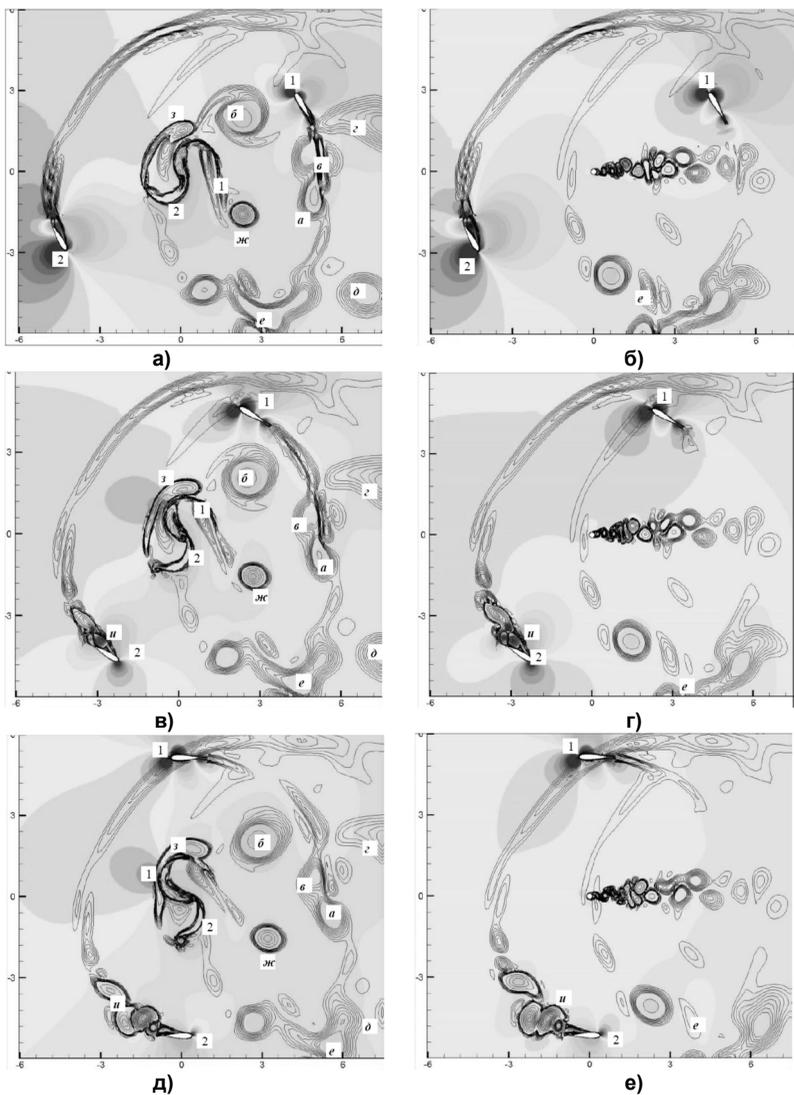


Рис. 6 – Развитие течения при обтекании роторов ВО ВЭУ.
 Изобары и контуры завихренности для угловых положений:
 а), б) – $\theta = 300^\circ$; в), г) – $\theta = 330^\circ$; д), е) – $\theta = 360^\circ$

При сравнении ВО ВЭУ с роторами Дарье и Савониуса (рис. 3 а) наблюдается повышенная турбулизация внутренней области. При угле поворота $\theta = 30^\circ$ (рис. 3 а) на лопастях ротора Савониуса формируются два вихря a и b , которые сходят со второй и первой лопасти, соответственно. Интенсивность и скорость движения вихря a существенно больше, чем у вихря b . Это является следствием ускорения вихря a

лопастью 2, движущейся по потоку, и замедлением вихря b первой лопастью, вращающейся навстречу набегающему ветру. В центральной части щелевого ротора Савониуса наблюдается перетекание части воздуха с внутренней поверхности второй лопасти на внутреннюю поверхность первой, что создает дополнительное давление, а, следовательно, и крутящий момент на валу ротора. В дальнем следе ротора расположен каскад вихрей ε и ν , которые сошли с лопастей ротора на предыдущих оборотах.

Обтекание лопастей ротора Дарье для угла поворота 60° носит присоединенный характер (рис. 3 г). При данном угловом положении вторая лопасть ротора Дарье проходит через вихревой след от опорной башни. Данная вихревая структура по своей интенсивности и размерам гораздо меньше, чем та, которую генерируют лопасти ротора Савониуса (рис. 3 в). Дальнейшее формирование вихрей a и b наблюдается при $\theta = 60^\circ$ (рис. 3 в). Происходит рост вихря a и удлинение b вследствие вращения лопастей. Вихри ν и ε , потеряв значительную часть скорости смещения в следе, начинают взаимодействовать друг с другом, образуя в дальнейшем один большой макровихрь. Для этого углового положения первая лопасть ротора Савониуса начинает создавать положительный крутящий момент (рис. 7). Лопасти ротора Дарье обтекаются потоком воздуха без отрыва. Происходит увеличение коэффициента крутящего момента первой лопасти, а значение коэффициента второй лопасти остается почти постоянным (рис. 7 – 8).

Угловое положение ВО ВЭУ равно 90° (рис. 3 д, е), характеризуется максимальным значением коэффициента крутящего момента первой лопасти ротора Дарье и минимальным значением второй. Причем для ВО ВЭУ только с одним ротором Дарье коэффициенты крутящего момента каждой из лопастей имеют положительные значения (рис. 8).

При угле поворота $\theta = 120^\circ$ (рис. 4 а) вихрь a срывается со второй лопасти ротора Савониуса и начинает сноситься вниз по потоку. Вихрь b продолжает деформироваться под воздействием вращающихся лопастей. Крутящий момент, создаваемый первой лопастью ротора Савониуса, достигает максимального значения, в то время как крутящий момент от второй лопасти продолжает уменьшаться с увеличением угла поворота (рис. 7). На внутренней поверхности первой лопасти ротора Дарье начинает зарождаться динамический срыв потока. Вторая лопасть, пройдя сквозь вихревые образования ν и ε , попадает в затененную Савониусом область. Происходит резкое увеличение коэффициента крутящего момента до значений, соответствующих углу поворота ротора 60° (рис. 7, 8). Каскад вихрей ν и ε получает дополнительный импульс от проходящей сквозь них второй лопасти ротора Дарье и начинает интенсивно перемешиваться. Вихри d , сошедшие со второй лопасти, сносятся вниз по потоку. Вторая лопасть ВО ВЭУ с одним ротором Дарье (рис. 4 б) выходит из затененной области опорной башни гораздо быстрее, чем из аэродинамической тени ротора Савониуса (рис. 4 а), и генерирует более высокий крутящий момент (рис. 7, 8).

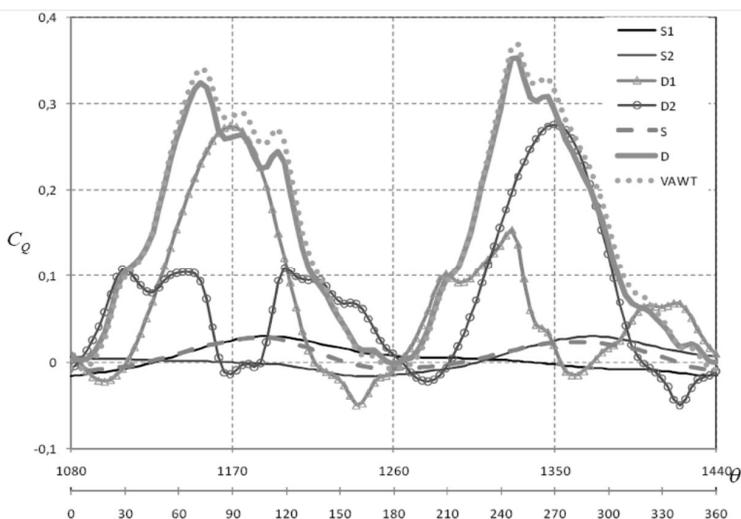


Рис. 7 – Изменение коэффициентов крутящего момента C_Q каждой лопасти ротора Савониуса (S1, S2), Дарье (D1, D2) и роторов в целом (S, D), а также ВО ВЭУ (VAWT) от угла поворота θ на четвертом обороте

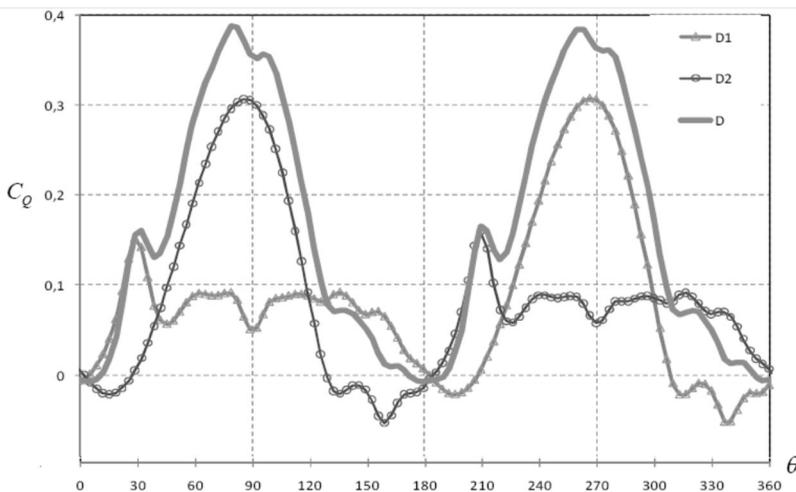


Рис. 8 – Изменение коэффициентов крутящего момента C_Q каждой лопасти ротора Дарье (D1, D2) и ротора в целом (D) от угла поворота θ на четвертом обороте

Угол поворота ВО ВЭУ равен 150° (рис. 4 б). Вихрь *a* продолжает медленно двигаться вниз по потоку от ротора Савониуса. Вихрь *b* начинает деформироваться под воздействием второй лопасти, которая вращается навстречу потоку. Крутящий момент, генерируемый первой лопастью ротора Савониуса, уменьшается, а от второй – принимает отрицательное значение вследствие увеличения лобового сопротивле-

ния (лопасть 2 становится почти перпендикулярно набегающему потоку ветра). Результирующий момент ротора Савониуса для данного углового положения равен нулю.

Вихри ϵ и ζ , взаимодействуя между собой, деформируются, меняют скорость движения, а также свою интенсивность. Каскад вихрей δ обладает самой большой скоростью среди рассматриваемых вихрей. Данный факт объясняется тем, что каскад вихрей δ сорвался со второй лопасти, когда она шла по потоку с линейной скоростью, превышающую скорость набегающего потока в три раза ($\lambda = 3$). При этом значении происходит массивный срыв вихрей с внутренней поверхности лопасти, что приводит к резкому падению крутящего момента в область отрицательных значений (рис. 4 в, г). Поток обтекает вторую лопасть ротора Дарье без отрыва за исключением небольшой области в хвостовой части. Крутящий момент от второй лопасти компенсирует отрицательный момент от первой и обеспечивает небольшой, но положительный результирующий крутящий момент ротора Дарье и всей ВО ВЭУ в целом (рис. 7, 8).

Для углового положения $\theta = 180^\circ$ (рис. 4 д) картина обтекания ротора Савониуса не сильно отличается от предыдущего положения. Исключение составляет лишь небольшая область на краю первой лопасти, где начинает формироваться вихрь. В этом положении крутящий момент второй лопасти отрицательный и превышает по абсолютной величине крутящий момент от первой лопасти. Вихри a , ϵ , ζ , δ теряют свою интенсивность и постепенно начинают разрушаться. На поверхности первой лопасти ротора Дарье происходит присоединение потока, которое начинается вблизи передней кромки лопасти, а затем положение точки отрыва смещается к задней кромке (рис. 4 д, е). Так, при угле поворота 180° суммарный крутящий момент ВО ВЭУ близок к нулю.

Картина обтекания ВО ВЭУ при $\theta = 210^\circ$ (рис. 5 а, б) практически совпадает с той, что мы наблюдали при 30° (рис. 4 а, б), за исключением небольших деталей. Период обтекания двухлопастной ВО ВЭУ с роторами Дарье и Савониуса равен $\theta = 180^\circ$. На месте вихря a формируется вихрь $ж$. Вихрь $б$ начинает дробиться формирующимся новым вихрем на две части. Вихрь a занимает место одного из вихрей каскада ϵ . Происходит рост значений коэффициента крутящего момента первой лопасти ротора Дарье, в то время как для второй он принимает отрицательное значение. Результирующий момент на валу ВО ВЭУ больше нуля, что обеспечивает возможность выработки энергии.

При угле поворота $\theta = 240^\circ$ (рис. 5 в, г) продолжается рост вихрей $б$ и $ж$ на концах лопастей ротора Савониуса. Вихри a и ϵ располагаются на траектории движения первой лопасти ротора Дарье. Вихри ζ и δ , значительно ослабев, сносятся в область дальнего следа. Крутящий момент первой и второй лопасти ротора Савониуса приблизительно равен нулю. Крутящие моменты от первой и второй лопасти ротора Дарье равны между собой.

Для угла $\theta = 270^\circ$ (рис. 5 д) вихри *б* и *ж* отрываются от лопастей ротора Савониуса. На месте оторвавшегося вихря *б* начинает формироваться вихрь *з*. Первая лопасть ротора Дарье прорезает вихри *а* и *в* в подветренной части траектории. При данном положении ВО ВЭУ положительный крутящий момент от роторов Дарье и Савониуса создается лопастями № 2. Причем от ротора Дарье это значение достигает максимума (рис. 7, 8).

Дальнейшее увеличение угла поворота ротора $\theta = 300^\circ$ (рис. 6 а) приводит к увеличению геометрических размеров вихря *з*, а также к дальнейшему смещению вихрей *б* и *ж* вниз по потоку. Основной крутящий момент от ротора Савониуса создается второй лопастью. Первая лопасть ротора Дарье, пройдя каскад вихрей *а* и *в* (рис. 6 а), снова генерирует положительный крутящий момент, в то время как аналогичная лопасть ВО ВЭУ с одним ротором Дарье (рис. 6 б) все время генерировала положительный момент (рис. 8). На второй лопасти ротора Дарье начинает формироваться динамический срыв потока, что приводит к резкому падению коэффициента крутящего момента.

При достижении $\theta = 330^\circ$ (рис. 6 в) вихрь *з* отделяется от второй лопасти ротора Савониуса и начинает взаимодействовать с первой лопастью. Вихри *б* и *ж* медленно сносятся вниз по потоку. Происходит дальнейшее уменьшение коэффициента крутящего момента, создаваемого ротором Савониуса. Первая лопасть ротора Дарье продолжает создавать положительный крутящий момент. На внутренней поверхности этой лопасти отчетливо виден каскад вихрей *и*. На данном участке траектории вторые лопасти ротора Дарье создают отрицательный и положительный крутящий момент соответственно (рис. 7, 8).

Угловое положение ВО ВЭУ в 360° (рис. 6 д, е) характеризуется глобальным падением коэффициента крутящего момента до значения близкого к нулю.

В целом, при обтекании ВО ВЭУ-0020, состоящей из щелевого двухлопастного ротора Савониуса и двухлопастного ротора Дарье возникает сложная картина течения, характеризующаяся одновременным наличием нескольких макровихрей в следе, их взаимодействием с лопастями в подветренной части траектории, резким разворотом и ускорением течения, отрывом потока с острых кромок.

Ротор Савониуса создает область с низкоскоростным потоком с наличием крупномасштабных вихревых образований, внутри которых есть области возвратного течения. Это приводит к ухудшению аэродинамики ротора Дарье на подветренном участке траектории лопасти.

Отличительной особенностью работы данной ВО ВЭУ является отсутствие динамического срыва вихрей на подветренном участке траектории лопасти ротора Дарье. Как показали расчеты, негативным моментом является наличие ротора Савониуса в центральной части ВО ВЭУ, что приводит к существенному затенению подветренного участка траектории лопасти ротора Дарье, а, следовательно, к снижению генерируемого крутящего момента.

Основной вклад в крутящий момент ВО ВЭУ осуществляется за счет ротора Дарье. На долю ротора Савониуса приходится всего несколько процентов от общего объема вырабатываемого установкой момента.

Обтекание опорной башни приводит к формированию вихревой дорожки Кармана. При отсутствии ротора Савониуса вихри, сошедшие с опорной башни гораздо меньше как по размерам, так и по интенсивности. Поэтому их взаимодействие с лопастями ротора Дарье не приводит к существенному изменению аэродинамических характеристик.

Картина течения характеризуется существенными нестационарными явлениями. К ним относятся: динамический срыв потока, образование сложной системы вихрей, взаимодействие вихрей различных размеров, скоростей движения и интенсивности с поверхностями роторов.

В результате проведенных исследований установлены зависимости коэффициентов крутящего момента от угла поворота каждой лопасти ротора Дарье и Савониуса, роторов в целом (рис. 9), а также всей ВО ВЭУ (рис. 10). Анализ результатов показал, что взаимодействие лопастей ротора Дарье с макровихрями от ротора Савониуса в подветренной части траектории приводит к резкому падению коэффициента крутящего момента. Основной вклад в крутящий момент ВО ВЭУ осуществляется за счет ротора Дарье. На долю ротора Савониуса приходится всего несколько процентов от общего объема вырабатываемого установкой момента.

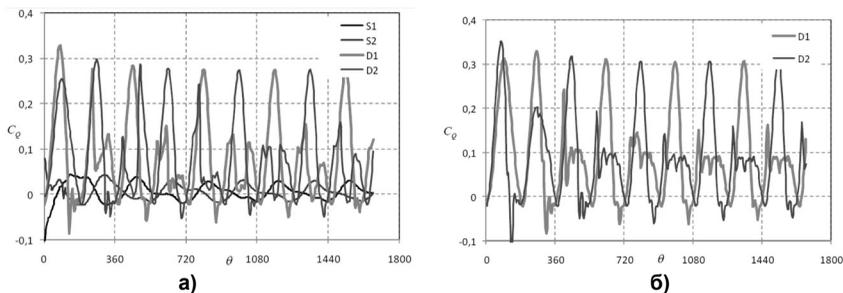


Рис. 9 – Изменение коэффициентов крутящего момента каждой лопасти ВО ВЭУ с роторами Дарье (D) и Савониуса (S) (а) и ротором Дарье (D) (б) от угла поворота

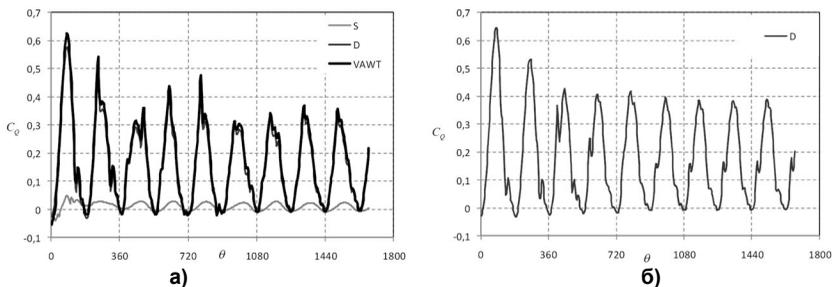


Рис. 10 – Изменение коэффициентов крутящего момента ВО ВЭУ (VAWT) с роторами Дарье (D) и Савониуса (S) (а) и ротором Дарье (D) (б) от угла поворота

Установлено, что отсутствие ротора Савониуса в конструкции ВО ВЭУ приводит к улучшению аэродинамических характеристик ротора Дарье.

Сравнение АДХ двух ВО ВЭУ показало (рис. 11), что коэффициент крутящего момента больше у ВЭУ с одним только ротором Дарье. Средненные за один оборот коэффициенты крутящего момента имеют следующие значения – 0.161 и 0.141. Прирост составляет 14.2%.

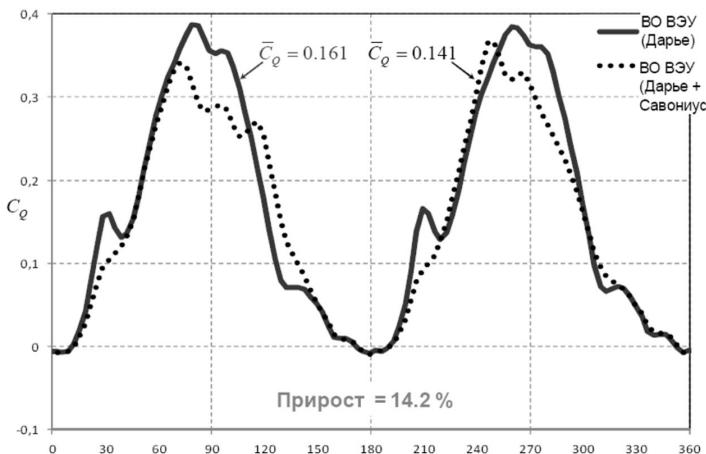


Рис. 11 –Изменение коэффициентов крутящего момента ВО ВЭУ с одним ротором Дарье, а также с роторами Дарье и Савониуса от угла поворота

Выводы. В результате проведенных исследований аэродинамики ВО ВЭУ с роторами Дарье и Савониуса выполнена реконструкция структуры течения, выделены основные стадии формирования вихревой структуры при обтекании роторов Савониуса и Дарье. Проведены качественные и количественные оценки влияния ротора Савониуса на суммарные аэродинамические и энергетические характеристики вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Дарье и Савониуса. Рассчитаны неосредненные коэффициенты крутящего момента отдельных лопастей ротора, а также ВО ВЭУ в целом от углового положения. Показано, что основной вклад в крутящий момент ВО ВЭУ осуществляется за счет ротора Дарье, на долю ротора Савониуса приходится всего несколько процентов от общего объема производимого установкой момента. Установлено, что отсутствие ротора Савониуса в конструкции ВО ВЭУ приводит к улучшению аэродинамических характеристик ротора Дарье. Сравнение аэродинамических характеристик двух ВО ВЭУ показало, что коэффициент крутящего момента больше у ВЭУ с одним только ротором Дарье.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. *Дзензерский В. А.* Математическое моделирование аэродинамики вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Дарье и Савониуса /

В. А. Дзензерский, С. В. Тарасов, Д. А. Редчиц, Н. М. Хачапуридзе // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2012. – № 19. – С. 96–111.

2. **Roe P. L.** Characteristic-based schemes for the Euler equations / P. L. Roe // Annual review of fluid mechanics. – 1986. – Vol.18. – P. 337–365.

3. **Rogers S. E.** Comparison of implicit schemes for the incompressible Navier–Stokes equations and artificial compressibility // AIAA Journal. – 1995. – Vol.33, № 11. – P. 2066–2072.

4. **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.

5. **Spalart P. R.** A one–equation turbulence model for aerodynamic flow / P. R. Spalart, S. R. Allmaras // AIAA Paper. – 1992. – № 439. – P. 21.

6. **Whitfield D. L.** Numerical solution of the two–dimensional time–dependent incompressible Euler equations / D. L. Whitfield, L. K. Taylor // Mississippi state university NACA–CR–195775. – 1994. – P. 65.

УДК 532.516

*С. В. Тарасов, канд. техн. наук, Д. О. Редчиць, канд. фіз.–мат. наук,
С. В. Моїсеєнко, канд. техн. наук, А. С. Тарасов*

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ АЕРОДИНАМІКИ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Проведена серія чисельних розрахунків нестационарного обтікання вертикально-осьової (ВО) вітроенергетичної установки (ВЕУ) з роторами Дар'є і Савоніуса турбулентним потоком вітру. В результаті математичного моделювання аеродинаміки ВО ВЕУ виконана реконструкція структури течії навколо роторів Савоніуса і Дар'є з урахуванням взаємовпливу, виділені основні стадії формування вихрової структури при обтіканні роторів. Проведено якісні та кількісні оцінки впливу ротора Савоніуса на сумарні аеродинамічні і енергетичні характеристики вертикально-осьової вітроенергетичної установки.

Ключові слова: математичне моделювання, вітроенергетична установка, ротори Дар'є і Савоніуса, рівняння Нав'є-Стокса.

UDC 532.516

*S. V. Tarasov, PhD (Tech.), D. O. Redchyts, PhD (Phis.-Math.),
S. V. Moiseenko, PhD (Tech.), A. S. Tarasov*

NUMERICAL SIMULATION OF AERODYNAMICS PROCESSES OF VERTICAL-AXIS WIND TURBINE

A series of numerical calculations were carried out of the non-stationary flow past a vertical-axis (VA) wind turbine (WT) with Darrieus and Savonius rotors by a turbulent flow. Mathematical modeling of aerodynamics resulted the reconstruction of the flow structure around the Savonius and Darrieus rotors taking into account the mutual influence, the main stages of the formation of the vortex structure during the flow around the rotors are identified. Qualitative and quantitative impact as-

assessments of the influence of the Savonius rotor on the total aerodynamic and energy characteristics of the vertical axis wind turbine were carried out.

Keywords: numerical simulation, wind turbine, Darrieus and Savonius rotors, Navier – Stokes equations.

A series of numerical calculations were carried out of the non-stationary flow past a vertical-axis (VA) wind turbine (WT) with Darrieus and Savonius rotors by a turbulent flow. Mathematical modeling of aerodynamics resulted the reconstruction of the flow structure around the Savonius and Darrieus rotors taking into account the mutual influence, the main stages of the formation of the vortex structure during the flow around the rotors are identified. Qualitative and quantitative impact assessments of the influence of the Savonius rotor on the total aerodynamic and energy characteristics of the vertical-axis wind turbine were carried out. Non-average coefficients of the torque of individual rotor blades and VAWT as a whole from the angular position are calculated. It is shown that the main contribution to torque in the VAWT is due to the Darrieus rotor mainly on the windward part of the trajectory, and the share of the Savonius rotor accounts for only a few percent of the total volume of the torque produced by the installation. It is established that the presence of the Savonius rotor in the central part of the VAWT leads to a significant shading of the leeward portion of the trajectory of the Darrieus rotor blade, and, consequently, to a decrease in the generated torque. A comparison of the aerodynamic characteristics of the two VAWT showed that the torque coefficient was greater for the wind turbine with only the Darrieus rotor.

REFERENCES

1. **Dzenzerskiy V. O.** Numerical simulation of aerodynamics of vertical-axis wind turbine with Darrieus and Savonius rotors / V. O. Dzenzerskiy, S. V. Tarasov, D. O. Redchyt's, N. M. Khachapuridze // Problems of computational mechanics and strength of structures. – 2012. – Vol. 19. – P. 96–111 (In Russian).
2. **Roe P. L.** Characteristic-based schemes for the Euler equations / P.L. Roe // Annual review of fluid mechanics. – 1986. – Vol.18. – P. 337–365.
3. **Rogers S. E.** Comparison of implicit schemes for the incompressible Navier–Stokes equations and artificial compressibility // AIAA Journal. – 1995. – Vol.33, № 11. – P. 2066–2072.
4. **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.
5. **Spalart P. R.** A one–equation turbulence model for aerodynamic flow / P. R. Spalart, S. R. Allmaras // AIAA Paper. – 1992. – № 439. – P. 21.
6. **Whitfield D. L.** Numerical solution of the two–dimensional time–dependent incompressible Euler equations / D. L. Whitfield, L. K. Taylor // Mississippi state university NACA–CR–195775. – 1994. – P. 65.

*Институт транспортных систем
и технологий НАН Украины,
г. Днепр, Украина*

Надійшла до редколегії 18.03.2017