

УДК 533.6:621.548

## ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

**Л.И.Кныш**, д-р.техн.наук, проф., зав. каф. аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету ім. Олесь Гончара,

Днепропетровский национальный университет имени Олесь Гончара, пр. Гагарина,72, Днепр, Украина, 49010

Тел: +38-056-776-82-05, e-mail: lknysh@ukr.net

ORCID: 0000-0003-3525-4804

**О.Г. Гоман**, д-р.физ.-мат.наук д.ф.-м.н., проф., профессор каф. аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету ім. Олесь Гончара,

Днепропетровский национальный университет имени Олесь Гончара, 49010, г.Днепр, просп. Гагарина,72

ORCID: 0000-0003-3569-4316

*Предложена инженерная методика расчёта энергетических показателей ветродвигателя с вертикальной осью вращения, который предполагается использовать в системах автономного энергоснабжения. Математическая модель создана на основе двухдисковой импульсной теории. Численные исследования проводилось с уточненными значениями аэродинамических коэффициентов выбранного профиля. Составлен общий алгоритм расчёта и получены зависимости коэффициента мощности от длины хорды профиля и угла его установки. Библ.10, рис.2.*

**Ключевые слова:** ветродвигатель с вертикальной осью вращения, двухдисковая импульсная теория, аэродинамические коэффициенты профиля лопасти, численные исследования, угол наклона лопасти.

## THE INFLUENCE OF SOME GEOMETRICAL PARAMETERS ON THE ENERGY INDICATORS OF THE VERTICAL AXIS WIND TURBINES

**Knysh L.** Chair of Department of AeroHydromechanics and Energy&Mass Transfer. Professor.Doctor of Technical Science.

Oles Gonchar Dnepro National University, Gagarin avenue, 72, Dnipro, Ukraine, 49010,

Phone: +38-056-776-82-05, e-mail: lknysh@ukr.net

ORCID: 0000-0003-3525-4804

**Goman O.** Professor of the Department of AeroHydromechanics and Energy&Mass Transfer. Professor.Doctor of Physics-Mathematical Sciences,

Oles Gonchar Dnepro National University, Gagarin avenue, 72, Dnipro, Ukraine, 49010

ORCID: 0000-0003-3569-4316

*The engineering analysis procedure for the vertical axis wind turbine energy indicators was presented. Such wind turbines are expected to be used in the autonomic power systems. The mathematical model is based on the double-disk momentum theory. The computer simulations were conducted using refined drag coefficients for selected profile. The general analysis algorithm was compiled and dependencies between power factors and profile chord length and installation angle were obtained. References 10, pict. 2.*

**Keywords:** vertical axis wind turbine, double-disk momentum theory, drag coefficients of the blade profile, computer simulations, blade installation angle.



Кныш Л.И.

Knysh L.

д-р.техн.наук, проф., зав. каф. аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олесь Гончара

Специалист в області математического и компьютерного моделювання аерогідродинамічних и теплообмінних процесів в енергетических системах на основі возобновляемых источников энергии. Автор более 70 научных работ, посвящённых расчёту и проектирования солнечных и ветровых энергетических установок различной мощности и назначения

Chair of Department of AeroHydromechanics and Energy&Mass Transfer. Professor. Doctor of Technical Science. Oles Gonchar Dnepro National University

An expert in the field of mathematical modeling of fluid mechanics and heat exchange processes in renewable energy systems. Author of more than 70 scientific publications about design and analysis of solar and wind energy facilities of different capacities and purposes



Гоман О.Г.  
Goman O.

д-р. физ.-мат. наук, проф., профессор каф. аэрогидромеханики и энергомассопереносу Днепровского национального университета имени Олеса Гончара  
Ведущий специалист в области создания обобщённых математических моделей для задач аэродинамики, механики деформированного твёрдого тела, теплообмена. Автор более 120 научных работ, посвящённых аналитическим методам решения задач механики.

Professor of the Department of Aerohydrodynamics and Energy&Mass Transfer. Professor. Doctor of Physics-Mathematical Sciences. Oles Gonchar Dnepro National University  
A leading expert in creation of generalized mathematical models for fluid and solid mechanics problems. Author of more than 129 scientific publications about analytical methods in mechanics field

**Список об означений**

$C_m$	– коэффициент крутящего момента на валу;	$\overline{W}_{1,2}^2$	– относительные безразмерные скорости потока на наветренной и подветренной стороне ветроколеса;
$C_p$	– коэффициент мощности элементарного слоя;	$Z_i = \frac{R\omega}{V_i}$ ,	– числа быстроходности для набегающего потока, наветренной и подветренной стороны соответственно;
$C_x$	– коэффициент силы сопротивления профиля лопасти;	$i = 0, 1, 2$	
$C_y$	– коэффициент подъёмной силы профиля лопасти;	$\beta$	– азимутальный угол;
$F_1, F_2$	– безразмерные величины, в которых учитываются влияния аэродинамических сил и конструкции приёмной системы ветродвигателя для наветренной и подветренной стороны, соответственно;	$\rho$	– плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup> ;
$M_{CP}$	– значение осреднённого крутящего момента;	$\Delta H$	– элементарная толщина горизонтального слоя воздуха, что набегаёт на лопасть ветроагрегата, м;
$NM(m_i)$ , $GM(g_j)$	– обобщённые интегральные функции для моментов, которые создаётся наклонной и горизонтальной траверсами соответственно;	$\eta_1, \eta_2$	– коэффициенты, учитывающие количество лопастей ветроагрегата, длину хорды лопасти, плотность воздуха и скорости потока в наветренной или подветренной стороне соответственно;
$NV(t_i)$ , $GV(s_j)$	– обобщённые интегральные функции, учитывающая попадание элемента наклонной и горизонтальной траверсы соответственно в рассматриваемый слой;	$\mu$	– коэффициент, учитывающий количество лопастей ветроагрегата, длину хорды лопасти, радиус установки лопасти и возможность затенения проходного сечения ометаемого объема лопастями;
$R$	– радиус установки лопастей;	$\psi$	– обобщённый мгновенный угол атаки профиля, учитывающий также угол установки профиля по отношению к ометаемой окружности.
$V_0$	– скорость набегающего на ветроколесо потока, м/с;		
$V_1, V_2$	– скорости в наветренной и в подветренной части ветроагрегата соответственно, м/с;		

**Введение.** Ветроагрегаты с вертикальной осью вращения могут занять ключевые позиции в сегменте автономной возобновляемой энергетики в географических регионах с нестабильным ветровым потенциалом, к которым относится большинство районов Украины [7]. Геометрия вертикальных ветрогенераторов такова, что эффективность их работы практически не зависит от частой смены направления ветра. Более того, при частой смене направления ветра показатели эффективности вертикально-осевых ветроустановок (ВОВУ) оказываются выше, чем у гори-

зонтально-осевых (ГОВУ). Это связано с тем, что несмотря на меньший коэффициент использования энергии ветра, ветрикально-осевым системам, в отличие от горизонтально-осевых, не свойственно резкое падение мощности при изменении направления скорости ветра [2]. Хотя проведённые в последнее время исследования по усовершенствованию конструктивных решений ВОВУ позволили приблизить значения коэффициента использования ветровой энергии в них к показателям, характерным для горизонтальных ветроустановок [5].

Эксплуатационные характеристики ВОБУ существенно выше, чем ГОБУ. Отсутствие механизмов и систем ориентации существенно упрощает конструкцию вертикального ветродвигателя. Размещение силового блока на фундаменте установки позволяет отказаться от достаточно сложной системы передачи крутящего момента, упростив требования по надёжности и долговечности системы.

Наиболее энергетически эффективными являются маломощные ВОБУ, что открывает широкие возможности для использования их в системах автономного и резервного энергоснабжения. Этому способствует также ряд экологических преимуществ, которыми обладают ВОБУ по сравнению с ГОБУ. Уровень инфразвуковых шумов, генерируемых при работе ВОБУ, незначителен и практически не оказывает вредного воздействия на живые организмы. Последствия аварийного разрушения ВОБУ не столь масштабны, как при аварии ГОБУ.

В отличие от достаточно хорошо апробированных пропеллерных ветроэнергетических установок, которые широко распространены и эксплуатируются значительно больше времени, конструкции вертикальных ветроагрегатов отработаны хуже. Определяющим элементом ВОБУ является ветротурбина, которая осуществляет преобразование кинетической энергии ветрового потока в механическую энергию вращения тихоходного вала опорно-трансмиссионной системы. Характеристики ветротурбины влияют на конструкцию всей установки, по ним рассчитываются параметры остальных узлов и систем. Среди множества конструкций ВОБУ наиболее популярной является ветротурбина, выполненная по типу ротора Дарье. Принцип работы такого ротора основан на эффекте подъемной силы при обтекании воздушным потоком прямых крыловидных вертикальных лопастей, вращающихся вокруг вертикальной оси. Таких лопастей может быть две и более. Они шарнирно соединяются с траверсой. Для запуска ветротурбины в конструкцию установки может быть включён ротор Савониуса.

Энергетические характеристики проектируемой ВОБУ в значительной мере зависят от

результатов аэродинамического расчёта ветротурбины [3]. Такой расчёт позволит определить её номинальную мощность и зависимость мощности от скорости ветра и некоторых геометрических параметров, что и является целью данного исследования [4].

**Постановка задачи и метод её решения.** Аэродинамический расчёт вертикально-осевой ветротурбины связан со значительными трудностями. Несмотря на то, что при его проведении используется опыт, накопленный при проектировании авиационной техники, такого рода работы наукоёмкие и затратные. Наиболее полную картину течения вблизи ветроколеса можно описать, основываясь на численном интегрировании уравнений Рейнольдса в различной постановке. При таком подходе становится возможным учесть взаимное влияние лопастей и определить мгновенные распределённые и суммарные нагрузки на лопасти, а также осреднённые энергетические характеристики ветроустановки в целом. При этом задача носит трёхмерный нестационарный характер с плохо определяемыми граничными условиями. Её решение предполагает значительные затраты машинного времени, поэтому его нельзя использовать в качестве повседневного инструмента при проектных разработках.

Для этих целей более уместно использовать один из вариантов импульсных теорий, которые основаны на идеях, взятых из теории ветротурбин пропеллерного типа [6]. Импульсная теория базируется на соотношениях, связывающих потерю импульса потока, прошедшего ометаемую площадь ветротурбины, со средней по времени суммарной аэродинамической силой, действующей на лопасти и определяемой через аэродинамические коэффициенты. Подходов к использованию импульсных теорий существует множество: рассматривают одно- или двухдисковую, одно- или многотрубчатую модели потока. В данной работе используется усовершенствованная методика, основанная на двухдисковой модели потока, в которой на основании аэродинамического расчёта определяются зависимости коэффициента мощности и коэффициента момента от числа быстроходности и предлагаются

методы увеличения значения этих коэффициентов за счёт варьирования геометрическими параметрами ВОБУ и использования более полных данных об аэродинамических характеристиках используемых профилей. Последний тезис видится особенно важным, так как известно, что аэродинамические коэффициенты профилей определяются только экспериментальным путём в аэродинамических трубах, что доступно лишь крупным аэродинамическим центрам. Такие экспериментальные данные по аэродинамическим коэффициентам являются собственностью аэродинамических центров и публикации сведений об этих характеристиках в научной литературе, как правило, отрывочны и неполны. Поэтому основная сложность проведения достоверного аэродинамического расчёта ВОБУ состоит также и в получении необходимой достоверной информации об аэродинамических характеристиках выбранного профиля во всём необходимом диапазоне углов атаки и в максимально большем диапазоне чисел Рейнольдса. В этой связи значения аэродинамических коэффициентов выбранного профиля, взятые из [10], были уточнены путём проведения натурных экспериментов в аэродинамической трубе Т-5 кафедры аэрогидромеханики и энергомассопереноса Днепровского национального университета им. О.Гончара.

**Этапы расчёта.** Составление математической модели основывалось на том, что силы, действующие на лопасти и траверсы, с одной стороны выражаются через аэродинамические коэффициенты профилей лопасти и траверсы, рассчитанные по местным углам атаки и местным относительным скоростям, которые заранее неизвестны. С другой стороны эти же силы можно выразить при помощи теоремы импульсов. Приравнявая выражения для сил, которые получены двумя указанными способами для каждого из активных сечений, приходим к системе двух трансцендентных уравнений, определяющих величины скоростей потока в наветренной и подветренной частях ветротурбины. Эта система имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{V_0}{V_1} - 1 = F_1 \\ 2 \frac{V_1}{V_2} - \frac{V_0}{V_2} - 1 = F_2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $V_0$  – величина скорости набегающего на ветроколесо потока;  $V_1, V_2$  – скорости в наветренной и подветренной части ветроагрегата соответственно;  $F_1, F_2$  – величины, в которых учитываются влияния аэродинамических сил и конструкции приёмной системы ветродвигателя для наветренной и подветренной стороны соответственно.

Выражение для  $F_1$  и  $F_2$ , записанное в компактной форме, имеет вид:

$$F_{1,2} = \mu \int_{\frac{\pi}{2}(-\frac{\pi}{2})}^{\frac{3\pi}{2}(\frac{\pi}{2})} \overline{W}_{1,2}^2 (c_x \sin(\beta - \psi) - c_y \cos(\beta - \psi)) d\beta + NV(t_i) + GV(s_j), \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент, учитывающий количество лопастей ветроагрегата, длину хорды лопасти, радиус установки лопасти и возможность затенения проходного сечения ометаемого объёма лопастями;  $\overline{W}_{1,2}^2$  – относительные безразмерные скорости потока на наветренной и подветренной стороне ветроколеса;  $c_x$  – коэффициент силы сопротивления профиля лопасти;  $c_y$  – коэффициент подъёмной силы профиля лопасти;  $\psi$  – обобщённый мгновенный угол атаки профиля, учитывающий также угол установки профиля по отношению к ометаемой окружности;  $\beta$  – азимутальный угол;  $NV(t_i)$ ,  $GV(s_j)$  – обобщённые интегральные функции, учитывающие попадание элемента наклонной и горизонтальной траверсы соответственно в рассматриваемый слой.

При численном решении представленной системы уравнений возникают вычислительные трудности, связанные с плохой сходимостью решения. Поэтому предлагается эти два уравнения свести к одному, причём в качестве искомого неизвестных лучше использовать не величины скоростей, а числа быстроходности, рас-

считанные по этим скоростям. Приведа систему уравнений (1) к виду:

$$\begin{cases} \frac{Z_1}{Z_0} - 1 = F_1(Z_1) \\ 2 \frac{Z_2}{Z_1} - \frac{Z_2}{Z_0} - 1 = F_2(Z_2), \end{cases} \quad (3)$$

где  $Z_i = \frac{R\omega}{V_i}$ ,  $i = 0, 1, 2$  – числа быстроходности для набегающего потока наветренной и подветренной стороны соответственно и исключив из последней системы величину  $Z_0$ , получим уравнения вида:

$$Z_1 = \frac{Z_2}{1 + F_2(Z_2)} (1 - F_1(Z_1)) \text{ или}$$

$$Z_2 = \frac{Z_1}{1 - F_1(Z_1)} (1 + F_2(Z_2)).$$

При использовании первого уравнения задается произвольное значение  $Z_2$  из допустимого диапазона и находится соответствующее ему значение  $Z_1$ . После чего из первого уравнения системы (3) вычисляется соответствующее значение  $Z_0$ . Аналогично используется и вторая пара уравнений.

Такая процедура позволяет найти зависимости между  $Z_1$  и  $Z_0$ ,  $Z_2$  и  $Z_0$ , которые являются основными искомыми функциями. Зная их, можно определить зависимости  $V_1$  и  $V_2$  от скорости ветра  $V_0$  и угловой скорости вращения ветроустановки. Эти данные являются основой расчёта аэродинамических сил и моментов, действующих как на выбранный элемент, так и на установку в целом.

Общее значение осреднённого крутящего момента в слое таково [1]:

$$M_{CP} = \eta_1 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \bar{W}_1^2 (R(c_x \sin(\beta - \psi) - c_y \cos(\beta - \psi))) d\beta +$$

$$+ \eta_2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \bar{W}_2^2 (R(c_x \sin(\beta - \psi) - c_y \cos(\beta - \psi))) d\beta + \quad (4)$$

$$+ NM(m_i) + GM(g_j),$$

где  $\eta_1, \eta_2$  – коэффициенты, учитывающие количество лопастей ветроагрегата, длину хорды лопасти, плотность воздуха и скорости потока в наветренной или подветренной стороне соответственно;  $R$  – радиус установки лопастей;  $NM(m_i), GM(g_j)$  – обобщённые интегральные функции для моментов, которые создаются наклонной и горизонтальной траверсами соответственно.

С другой стороны, осреднённые за оборот локальные коэффициенты крутящего момента можно записать, введя в рассмотрение коэффициент крутящего момента на валу  $C_m$ :

$$M_{CP} = c_m \frac{1}{2} \rho V_0^2 2R^2 \Delta H. \quad (5)$$

Приравнявая выражения (4) и (5) и переходя в них от размерных скоростей к безразмерным коэффициентам быстроходности, получаем интегральное уравнение для определения  $C_m$ , а следовательно, и коэффициент мощности слоя  $C_p$ . Численное интегрирование полученного уравнения позволяет получить общие зависимости коэффициентов момента и мощности от значения числа быстроходности  $Z_0$ , а следовательно, и от скорости ветра при выбранной геометрии системы.

**Анализ результатов.** На основе представленной методики возможно выполнить параметрические исследования по выбору рациональных геометрических параметров проектируемых ВОБУ [9].

На рис. 1. показана зависимость коэффициента мощности ВОБУ от длины хорды лопасти при условии, что проектируется трёхлопастной ветроагрегат с радиусом окружности вращения  $R = 0,6$  м. В проведенных расчётах не было учтено влияние траверс, а также использовались значения аэродинамических коэффициентов профиля лопасти при усреднённом фиксированном числе Рейнольдса. Тем не менее, полученные данные позволяют сделать некоторые выводы и сформулировать рекомендации по минимизации длины хорды профиля для получения максимального значения коэффициента мощности в широком диапазоне скоростей ветра.

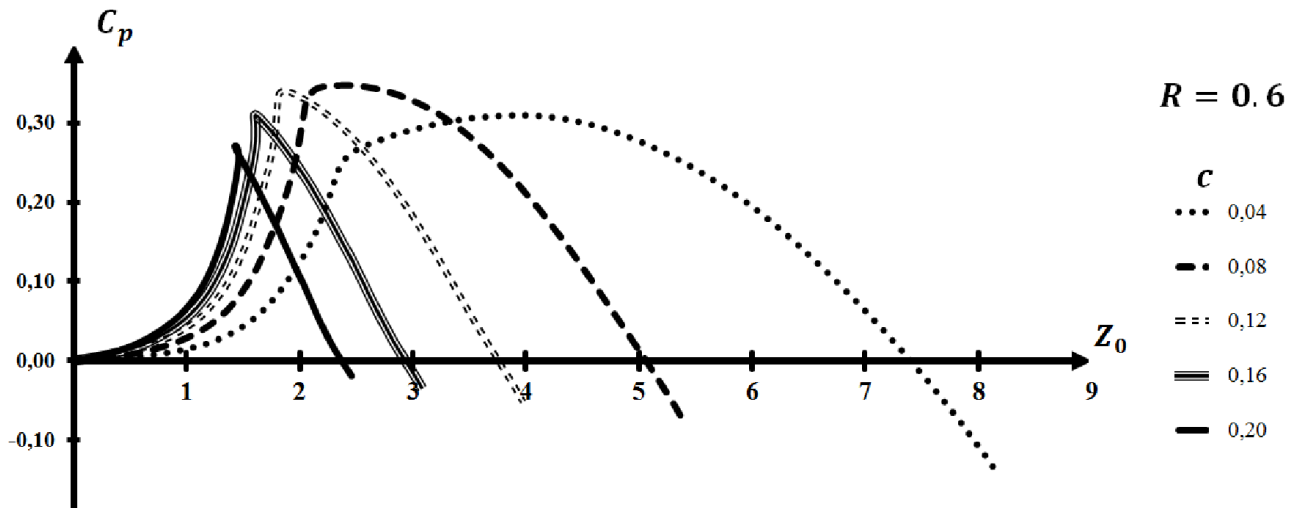


Рис. 1. Зависимость коэффициента мощности ВОБУ от длины хорды профиля.

Fig.1. The dependencies between power coefficient and profile chord length

На рис. 2 представлена зависимость, иллюстрирующая влияние угла установки лопасти на энергетические показатели модельной ВОБУ. При неизменном направлении ветра максимальные значения мощности обеспечиваются нулевым углом установки лопасти. Незначительное увеличение или уменьшение угла су-

щественно не влияет на показатели мощности. Однако уже при углах, близких к  $\pm 10^\circ$ , показатели системы резко падают. Это свидетельствует о том, что при проектировании ВОБУ в местностях с частой сменой направления ветра требуется проводить дополнительные исследования в этом направлении.

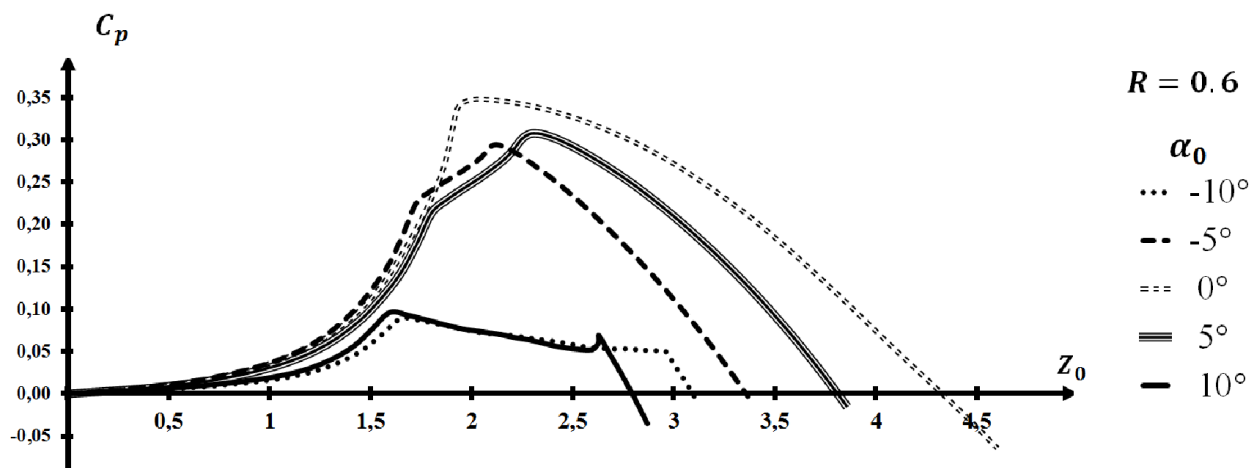


Рис. 2. Зависимость коэффициента мощности ВОБУ от угла установки лопасти.

Fig.2. The dependencies between power coefficient and installation angle.

**Выводы.** В работе предложена инженерная методика расчёта энергетических показателей ветродвигателей с вертикальной осью вращения, которая позволяет на начальных этапах проектирования провести анализ и выбрать

наиболее рациональные параметры ВОБУ. Представленные результаты иллюстрируют общий подход к проведению исследования и могут служить основой для последующих более глубоких численных и натурных экспери-

ментов, зв'язаних з проектуванням і функціонуванням ВОБУ.

1. *Абрамовський Е.Р., Лычагин Н.Н.* Проблеми оптимізації параметрів ветряних двигателів. – Днепропетровск, Наука и образование, 2014. – 274 с.

2. *Воронин С.М., Бабина Л.В.* Работа ветроустановки при изменении направления ветра // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2010, № 1. – С. 98-100.

3. *Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О., Зінченко Т.В.* Аналіз характеристик параметрів лопаті ротора автономної вітроенергетичної установки // *Відновлювальна енергетика*. – 2013, №3(34). – С. 49 – 53.

4. *Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О.* Визначення впливу геометричних параметрів лопаті на енергетичні характеристики ротора // *Відновлювальна енергетика*. – 2014, №3(38). – С. 48 – 53.

5. *Каян В.П., Лебедь А.Г.* Ветроороторы Дарье с прямыми управляемыми лопастями: опыт создания, испытания, оптимизация характеристик // *Відновлювальна енергетика*. – 2015, №3(42). – С. 42 – 48.

6. *Кудря С.А., Перминов Ю.Н., Буденный И.В.* Некоторые особенности проектирования синхронных ветрогенераторов повышенной мощности с возбуждением от постоянных магнитов // *Відновлювальна енергетика*. – 2014, №3(38). – С. 44 – 48.

7. *Кудря С.О., Тучинський Б.Г., Іванченко І.В., Петренко К.В.* Оцінка вітрового енергетичного потенціалу зони відчуження Чорнобильської атомної електростанції // *Відновлювальна енергетика*. – 2016, №3(46). – С. 44 – 49.

8. *Кузнецов М.П.* Застосування нормального розподілу до опису швидкості вітру // *Відновлювальна енергетика*. – 2013, №2(33). – С. 53 – 58.

9. *Рошкевич А. О., Книш Л.И.* Использование двухдисковой импульсной теории для расчёта вертикально-осевого ветрогенератора // *Материалы XIX Международной молодёжной научно-практической конференции «Людина і космос», Днепр, 2017.* – С. 123.

10. *Robert E. Sheldahl, Paul C. Klimas.* Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines – Sandia National laboratories. Energy report, 1981. – 120 p.

#### ВПЛИВ ДЕЯКИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ВІТРОДВИГУНІВ З ВЕРТИКАЛЬНОЇ ВІССЮ ОБЕРТУ

**Л.І. Книш**, д-р.техн.наук, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, 49010, м. Дніпро, прос. Гагаріна,72  
Тел.+38-056-776-82-05, e-mail: lknysh@ukr.net  
ORCID: 0000-0003-3525-4804

**О.Г.Гоман**, д-р.фіз.-мат.наук, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, 49010, м. Дніпро, прос. Гагаріна,72  
ORCID: 0000-0003-3569-4316

*Запропоновано інженерну методику розрахунку енергетичних показників вітродвигуна з вертикальною віссю оберт, який пропонується до використання в системах автономного енергопостачання. Математична модель складена на основі дводискової імпульсної теорії. Числові дослідження проводились з уточненими значеннями аеродинамічних коефіцієнтів вибраного профілю. Складено загальний алгоритм розрахунку та отримані залежності коефіцієнта потужності від довжини хорди профілю та кута його установки. Бібл.10, рис.2.*

**Ключові слова:** вітродвигун з вертикальною віссю оберт, дводискова імпульсна теорія, аеродинамічні коефіцієнти профілю лопаті, числові дослідження, кут нахилу лопаті.

#### REFERENCES

1. *Abramovskii Ye.R., Lychagin N.N.* (2014) Problemy optimizatsii parametrov venrovykh dvigatelei [The mathematical modeling and optimal design of wind engine of different capacities and purposes]. Dnipropetrovsk, Ukraine: Science and Education [in Rus.]

2. *Voronin S.M., Babina L.V.* (2010) Rabota vetroyustanovki pri izmenenii napravleniia vetra [Wind turbine capacity depending on wind direction] *Mejdunarodnij nauchnij jurnal "Alternativnaia energetika i ecologia" [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology]*, 1, 98–100 [in Rus.].

3. *Holovko V.M., Kokhanievich V.P., Shykhailov M.O., Zinchenko T.V.* (2013) Analiz kharakteristic parametrov lopatu rotora avtonomnoi vitroenergetychnoi ustanovky [Comparison of blade profiles of wind turbine and criterias of choise]. *Vidnovluvana energetika [Renewable Energy]*, 3, 49–53 [in Ukr.].

4. *Holovko V.M., Kokhanievich V.P., Shykhailov M.O.* (2014) Vyznacheyyia vplyvu heometrychnykh parametrov lopati na energetichni kharakterystyky rotopa [Connection between rotor geometrical parameters and its energy power] *Vidnovluvana energetika [Renewable Energy]*, 3, 48–53 [in Ukr.].

5. *Kaiyan V.P., Lebed A.H.* (2015) Vetrorotory Darie s priamyimi upravliayemyimi lopastiami: opyt cozдания, ispytaniia, optimizatsii kharakteristic [Review design characteristics of Darrieus rotor with direct controlled blade]. *Vidnovluvana energetika [Renewable Energy]*, 3, 42–48 [in Rus.].

6. *Kugria S.A., Perminov Yu.N., Budennyi I.B.* (2014) Nekotorye osobennosti proektirovaniia cunkhronnykh vetroheneratorov povyshennoi moshchnosti with возбуждением от postoyannykh mahnitov [ Design features of synchronous wind generators with excitation by permanent magnets], 3, 44 – 48 [in Rus.].

7. *Kugria S.A., Tychynskii B.H., Ivanchenko I.B.,*

*Petrenko K.B.* (2016) Otsinka vitrovoho energetychnoho potentsialu zony vidchuzhennia Chornobyl'skoi atomnoi elektrostantsii [Wind energy potential estimation for the Chernobyl nuclear power plant exclusion zone] *Vidnovluvana energetika [Renewable Energy]*, 3, 44–49 [in Ukr.].

8. *Kuznetsov M.P.* (2013) Zastosuvannia normalnoho rozpodilu do opysu shbydkosti vitru [Normal distribution law for prediction of wind speed] *Vidnovluvana energetika [Renewable Energy]*, 2, 53 – 58 [in Ukr.].

9. *Rozhkevich A.O., Knysh L.I.* (2017) Ispolzovanie dvukhdiskovoi inpylsnoi teorii dlia rascheta verticalno-osevogo vetrogeneratora [Mathematical modeling of geometrical parameters of vertical axis wind turbine]. *Materialy XIX Mezhdynarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «Ludyna I kosmos», Dnepr*, 123 [in Rus.].

10. *Robert E. Sheldahl, Paul C. Klimas.* (1981) Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines – Sandia National laboratories. Energy report

#### SYNOPSIS

The vertical axis wind turbines have a number of advantages over horizontal axis wind turbines. Vertical axis wind turbines proved to be especially useful in the autonomous power systems in locations where wind direction changes often.

During the design of the vertical axis wind turbines it is common to use the propeller wind turbines analysis approaches, for example, the double-disk momentum theory. In this paper an improved engineering analysis procedure for determining the dependence between power coefficient, momentum coefficient

and speed number (dimensionless flow velocity) is presented. For the analysis refined values of the drag coefficients for selected profile were used. These values were determined based on full-scale experiments in the wind tunnel T-5.

The mathematical model was created based on the force balances. On the one hand these forces are expressed using drag coefficient of the profile, on the other hand they are calculated based on the momentum theorem. After the transformations and conversion to dimensionless values general system of equations has the following form

$$Z_1 = \frac{Z_2}{1 + F_2(Z_2)} (1 - F_1(Z_1)) \text{ or } Z_2 = \frac{Z_1}{1 - F_1(Z_1)} (1 + F_2(Z_2)),$$

where  $Z_i = \frac{R\omega}{V_i}$ ,  $i = 0, 1, 2$  – speed numbers for oncoming flow

from the windward and leeward directions accordingly. In the

integral functions  $F_{1,2} = \mu \int_{\frac{\pi}{2}(-\frac{\pi}{2})}^{\frac{3\pi}{2}(\frac{\pi}{2})} \overline{W}_{1,2}^2 (c_x \sin(\beta - \psi) -$

$-c_y \cos(\beta - \psi) d\beta + NV(t_i) + GV(s_j)$  geometric and dynamic characteristics of wind engine are taken into account.

The numerical analysis algorithm was compiled based on the received data and used expressions for averaged torques. The parametric studies for selection of some geometric and dynamic characteristics of the system were conducted. It was determined that decrease in the chord profile length has positive influence on the power coefficient value and provides stable work of the wind turbine in the wide range of the wind velocities. The change of the blade installation angle can have a negative influence on the general efficiency of the system.

Стаття надійшла до редакції 09.11.17

Остаточна версія 05.12.17