

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОАГРЕГАТОВ С СООСНЫМИ ВЕТРОТУРБИНАМИ В СИСТЕМАХ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ*

Л.И. Кныш

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара
д. 72, пр. Гагарина, Днепр, 49010, Украина
тел.: +38(056)776-82-05; e-mail: lknysh@ukr.net

doi: 10.15518/isjaee.2018.25-30.025-033

Заключение совета рецензентов: 06.06.18 Заключение совета экспертов: 15.06.18 Принято к публикации: 21.06.18



Представлены результаты экспериментальных исследований горизонтально-осевого ветроагрегата с соосным расположением ветротурбин. Предполагается, что такая компоновка ветротурбины может быть использована при проектировании ветроагрегатов относительно небольшой мощности и при размещении на ограниченной площади, поскольку соосные системы имеют преимущества по габаритным показателям и максимальному использованию ометаемой площади. Возможность использования соосных горизонтально-осевых ветротурбин исследовалась с точки зрения положительного или отрицательного влияния турбин друг на друга. Обзор литературы показал, что при определённых условиях функционирование близко расположенных турбин может в целом улучшать характеристики потока, при этом повышая общую эффективность ветроэнергетической системы. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-5 с двумя соосными модельными двухлопастными ветротурбинами, вращающимися в противоположных направлениях. Генератор одной турбины находился с ней на одном валу в рабочей части аэродинамической трубы, а второй – в нижнем отсеке экспериментального стенда и был связан с турбиной через трансмиссионную передачу. На основе созданного испытательного стенда проводилась фиксация динамических, энергетических и частотных характеристик ветроэнергетической системы. Фиксация динамических характеристик проводилась с помощью комбинированного приёмника давления Пито – Прандтля. Энергетические показатели фиксировались автоматическими приборами учёта. Для замера частоты вращения турбин применялся лазерный метод с последующей фиксацией данных частотомером. Полученные данные подвергались некоторой корректировке, связанной с техническими особенностями проведения эксперимента. При низких скоростях ветра наблюдалось падение мощности соосного ветроагрегата по сравнению с изолированно работающей ветротурбиной. Такое падение связывалось с наличием возвратных потоков, которые усиливают турбулентность. При увеличении скорости ветра влияние возвратных потоков снижалось, при этом мощность ветроэнергетической системы с соосным расположением турбин значительно возрастала и превосходила мощность изолированно работающей турбины. Результаты показали возможность использования соосной компоновки ветротурбин для определённых типов ветроагрегатов и её перспективность при условии более детального исследования.

Ключевые слова: экспериментальные исследования; горизонтально-осевой ветроагрегат; соосные ветротурбины; аэродинамическая труба; абсолютные энергетические характеристики.

ON POTENTIAL OF USING WIND TURBINES WITH COAXIAL WIND ROTORS FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY

L.I. Knysh

Oles Gonchar Dnepropetrovsk National University
72 Gagarin Av., Dnipro, 49010, Ukraine
tel.: +38 056 776 82 05, e-mail: lknysh@ukr.net

* Кныш Л.И. О возможности использования ветроагрегатов с соосными ветротурбинами в системах энергообеспечения // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;25-30:25-33.



The paper presents the experimental research results for the horizontal-axis wind turbine with coaxial wind rotors. It is assumed that such coaxial layout of the wind turbine can be used for designing of the wind energy systems with relatively low capacity and limited location area since the coaxial systems have advantages in overall dimensions and maximum using of the swept area. Possibility of coaxial horizontal-axis wind turbines usage is determined by positive or negative effect of turbines on each other. Literature review shows that closely spaced wind turbines can generally improve flow characteristics under certain conditions and consequently increase wind energy system efficiency. We have carried out the experiments in T-5 wind tunnel with two coaxial model two-bladed wind turbines which rotate in opposite directions. The generator of the first turbine and first turbine itself are located on the same shaft in the test section of wind tunnel. The second generator is in a lower compartment of the experimental setup and is connected by the transmission. We have measured the dynamic, energy and frequency characteristics of wind energy systems based on created experimental setup. A Pitot tube and automatic metering devices have measured the dynamic parameters and energy performance respectively. A frequency counter has saved all of the data obtained with the laser frequency measurement technique. The experiment has some specific technical features so the data received need to be corrected. The coaxial wind turbine power has decreased in comparison to isolated wind turbine at low wind speed. The return flows reinforce turbulence so wind speed falls. If wind speed increases, the impact of the return flows decreases, the coaxial wind turbine capacity significantly grows and exceeds isolated turbine capacity. The possibility of using wind turbines with coaxial wind rotors for autonomous power supply is shown. Such wind turbines are perspective and require more detailed analysis.

Key words: experimental research; horizontal-axis wind turbine; coaxial wind rotors; wind tunnel; absolute energy parameters.



Людмила Ивановна
Кныш
Liudmyla Knysh

Сведения об авторе: д-р. техн. наук, проф., зав. кафедрой аэрогидромеханики и энергомассопереноса Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара.

Образование: Днепропетровский государственный университет (1988 г.).

Область научных интересов: математическое и компьютерное моделирование аэрогидродинамических и теплообменных процессов в энергетических системах на основе возобновляемых источников энергии; расчёт и проектирование солнечных и ветровых энергетических установок различной мощности и назначения.

Публикации: более 70.
ORCID 0000-0003-3525-4804

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, Chair of the Department of AeroHydromechanics and Energy&Mass Transfer, Oles Gonchar Dnepro National University.

Education: Dnipropetrovsk State University, 1988.

Research interests: mathematical modeling of fluid mechanics and heat exchange processes in renewable energy systems; design and analysis of solar and wind energy facilities of different capacities and purposes.

Publications: more than 70.

1. Введение

Эффективность энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии во многом зависит от выбора оптимальных проектных параметров систем преобразования [1, 2]. В этой связи ветроэнергетические агрегаты являются энергетическими объектами с широким спектром возможных проектных решений, причём это разнообразие главным образом связано с типом и компоновкой ветротурбины [3–5].

Существует целый класс моделей ветротурбин, которые после детального исследования могут быть использованы для создания ветроустановок с вертикальной осью вращения. Выбор моделей горизонтальных ветротурбин в этом смысле более ограничен и связан в основном с выбором аэродинамической

формы профиля лопасти, количеством лопастей и углом их установки. Вопрос о взаимном расположении промышленных пропеллерных ветроагрегатов также хорошо изучен [6–8]. Но для автономного использования при ограниченной площади интерес может представлять система, в которой две пропеллерные ветротурбины располагаются на одной оси [9]. Такая идея, как и многие другие в ветроэнергетике, взята из авиации, в частности из теории соосных авиационных несущих винтов [10]. В вертолётной технике эта система компоновки винтов имеет ряд преимуществ, прежде всего благодаря своим относительно небольшим размерам и возможности максимально использовать ометаемую площадь. Малые габариты и компактность упрощают обслуживание, существенно расширяют область применения такой техники. В связи с этим выскажем предполо-

жение о том, что аналогичная схема пропеллерного ветроагрегата будет иметь дополнительные преимущества и в определённых типах ветроагрегатов по сравнению с классическими горизонтально-осевыми ветротурбинами.

Следует отметить, что имеется множество исследований, результаты которых косвенно могут быть задействованы в анализе влияния близко расположенных ветротурбин на общие энергетические показатели системы. С одной стороны, известно, что функционирование каждой ветротурбины изменяет структуру ветрового потока, приводит к его дополнительной турбулизации и, в конечном счёте, к снижению общего ветрового потенциала [11]. Но, с другой стороны, существуют исследования, которые показывают, что при определённых условиях аэродинамический след от работы турбины может потенциально улучшить общую структуру ветрового потока, уменьшить турбулентность – «выровнять поток», что приведёт к повышению общей эффективности ветроэнергетической системы [12]. В работе [13] приведены результаты численного моделирования системы из двух вертикально-осевых ветротурбин, вращающихся в противоположных направлениях. Выявлено влияние зазора между турбинами и их расположения друг относительно друга на энергетические показатели системы. Сравнение с ветротурбинами, работающими изолированно, показало повышение эффективности при совместном функционировании ветротурбин. Аналогичные результаты были получены и при проведении экспериментальных ис-

следований турбин, вращающихся в одну или противоположные стороны [14, 15].

В приведенных работах рассматривалось взаимное влияние вертикально-осевых ветротурбин. Малогабаритные соосные горизонтально-осевые ветротурбины имеют иные геометрические, динамические и функциональные характеристики. Однако, возможно, при определённых параметрах влияние одной турбины на другую будет также улучшать общую структуру потока, повышая при этом общие энергетические характеристики ветроагрегата. Такое предположение должно быть подтверждено дополнительными теоретическими и экспериментальными исследованиями.

В данной работе впервые представлены результаты экспериментальных исследований по определению энергетических характеристик двух горизонтально-осевых ветроагрегатов, лопасти которых расположены на одной оси.

Для проведения исследований был создан экспериментальный стенд на базе дозвуковой аэродинамической трубы Т-5, где осуществлялась продувка моделей двухлопастных соосных ветротурбин. Статистическая обработка и последующий анализ полученных результатов позволил сделать выводы о перспективности использования горизонтально-осевых соосных турбин в ветроэнергетических агрегатах различной мощности и назначения, в комплексных системах на основе альтернативных источников энергии, выявить экологические преимущества подобных систем.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
ρ	Плотность воздуха, зависящая от атмосферного давления и температуры в лаборатории
λ	Коэффициент быстроходности ветроустановки
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
a	Показания микроманометра, который регистрирует разность давлений комбинированного приёмника давления
C_p	Коэффициент мощности ветроагрегата
K	Постоянная микроманометра
P_0	Давление полного напора в выбранной точке
P	Статическое давление в выбранной точке
V	Скорость воздушного потока

2. Теоретический анализ: Выбор метода исследования

Аэродинамический расчёт ветротурбины является сложной многопараметрической задачей, даже приближённое решение которой вызывает значительные вычислительные трудности [16–18] – не только математические, но и трудности, связанные с определением аэродинамических коэффициентов профилей, значения которых нельзя вычислить теоретически. Экспериментальные данные для новых типов профилей вообще отсутствуют или являются собственностью научно-производственных центров. Численный расчёт на основе стандартных промышленных пакетов вычислительной аэрогидродинамики

типа ANSYS, FlowVision, XFlow и другой трёхмерной нестационарной задачи обтекания лопастей ветротурбины является чрезвычайно затратным с точки зрения ресурсов ЭВМ, поэтому пока его трудно рекомендовать в качестве основного метода исследования ветроагрегатов [19, 20]. Часто численный расчёт комбинируют с инженерными методами [21, 22], однако и в этом случае для проведения исследования необходимы экспериментальные данные [23, 24].

Задача значительно усложняется, если необходимо учитывать взаимное влияние элементов ветроагрегатов. В работе [25] приведены результаты решения такой задачи, которое базируется на комбинированном подходе. Сочетание динамической модели и инженерной импульсной теории позволило создать



численный алгоритм для определения максимальных показателей эффективности с учётом взаимного влияния турбин, который впоследствии был проверен экспериментально.

Необходимо отметить, что специфика подобных задач такова, что часто эксперимент является единственным методом получения адекватных энергетических характеристик ветроагрегатов с учётом их расположения и компоновки. Обобщённые результаты экспериментальных исследований по учёту аэродинамического взаимодействия ветротурбин представлены в [15]. В аэродинамической трубе авторы тестируют несколько конфигураций вертикально-осевых ветроагрегатов, сравнивают их характеристики с работой изолированной ветротурбины и делают общие выводы о возможности повышения эффективности ветроагрегатов за счёт их взаимного влияния друг на друга. Экспериментальные исследования по определению интегральных энергетических характеристик системы двух соосных модельных ветротурбин представлены в [26, 27]. Подобный подход выбран и в данной работе.

3. Методика эксперимента

Для проведения серии экспериментов на базе аэродинамической трубы Т-5 был создан экспериментальный стенд (рис. 1), который состоит из модельной ветроустановки с двумя соосными ветротурбинами, расположенными в открытой части аэродинамической трубы, приборов учёта вырабатываемой электрической мощности и частоты вращения ветротурбин, микроманометра и полезной нагрузки.

Промышленная аэродинамическая труба с открытой рабочей частью имеет длину 1 115 мм и диаметр выходного сечения сопла 750 мм. Струя воздуха в рабочей части расширяется, что приводит к развитию на её границе пограничного слоя, поэтому диаметр ядра струи не превышает 600 мм. Диаметр ветротурбин равен 500 мм, что даёт основания полагать следующее: модель работает в стабилизированном потоке с минимальным влиянием краевых эффектов. Технические характеристики аэродинамической трубы позволяют генерировать в ней воздушный поток в диапазоне скоростей от 0 до 50 м/с.

Профиль изготовленной модельной ветроустановки соответствовал семействам профилей Эсперо. Крутящий момент от первой (желтой) ветротурбины передавался на генератор, расположенный на одной оси с системой пропеллеров, а крутящий момент от второй (серой) ветротурбины передавался через резиновый блок на генератор, расположенный в нижнем отделе рабочей части аэродинамической трубы.



Рис. 1 – Экспериментальная установка в рабочей части аэродинамической трубы
Fig. 1 – The experimental setup in open part of the wind tunnel

Расчёт скорости потока V проводился на основе уравнения Бернулли по замерам разности давлений, для определения которых использовался комбинированный приёмник давления – трубка Пито-Прандтля:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_0 - P)} = \sqrt{\frac{2}{\rho} a K} .$$

Вырабатываемая модельными ветротурбинами электрическая мощность поступала на нагрузку и фиксировалась сертифицированными приборами учёта – амперметрами и вольтметрами. Замер частотных характеристик проводился лазерным методом, после чего значения фиксировались частотомером.

Эксперимент состоял из трёх этапов. На первом этапе измерялись параметры при одновременной работе двух соосных ветротурбин, которые вращались в разные стороны. Такое вращение обеспечивалось определённым выбором углов наклона лопастей. Предполагалось, что завихренный поток, образующийся за первой ветротурбиной, будет «выпрямляться, раскручиваться» за счёт работы второй турбины, что приведёт к более полному использованию энергии ветра с единицы ометаемой площади [28].

Второй и третий этапы состояли из продувок первой ветротурбины при снятой второй и второй ветротурбины при снятой первой.

Обработка результатов экспериментов проводилась в абсолютных величинах, что позволяло оценить общую качественную картину процесса. На рис. 2 показаны кривые, полученные в результате этой обработки.

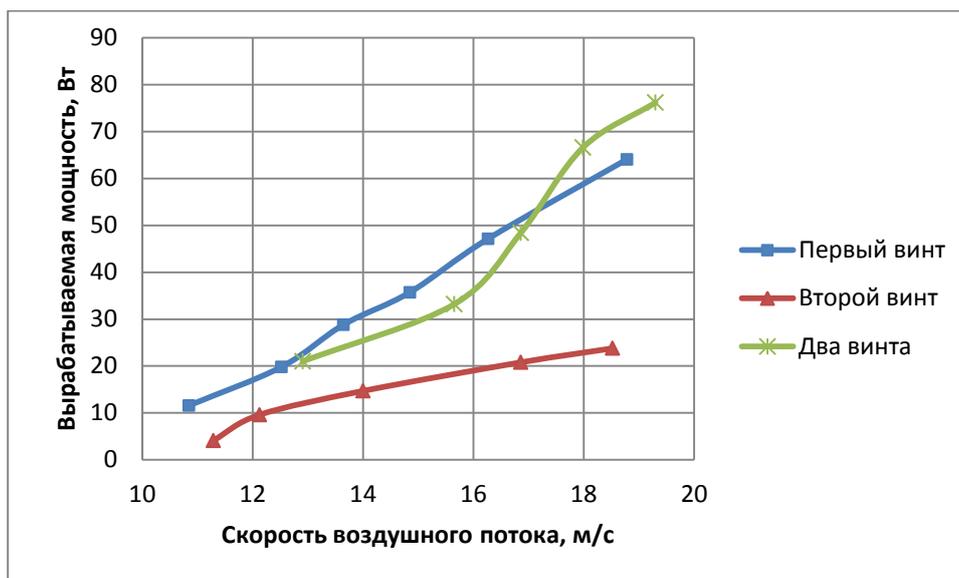


Рис. 2 – Результаты экспериментов в абсолютных величинах
Fig. 2 – The experimental results in absolute values

График «Первый винт» показывает мощность, вырабатываемую при одиночной работе переднего винта, график «Второй винт» – при одиночной нагрузке заднего винта, а график «Два винта» – это работа двух винтов одновременно.

4. Анализ полученных результатов

На графиках видно (см. рис. 2), что при совместной работе двух ветротурбин при малых скоростях ветра наблюдается снижение мощности вырабатываемой энергии по сравнению с мощностью единичной ветротурбины. Это снижение, очевидно, связано с влиянием возвратных потоков от второй ветротурбины, что увеличивает общую турбулизацию потока. С повышением скорости такое влияние ослабевает, и после некоторого значения скорости, лежащего в диапазоне $16 \div 18$ м/с, мощность, вырабатываемая двумя турбинами, будет превосходить мощность единичной турбины. С ростом скорости ветра намечается тенденция к увеличению мощности двух ветротурбин при их совместной работе.

Количественный анализ результатов вызвал некоторые затруднения, связанные с особенностью проведения эксперимента – установка генератора в нижнем отсеке аэродинамической трубы влияет на полученные количественные характеристики. Как видно на графиках, наблюдается значительное уменьшение вырабатываемой мощности при автономном функционировании второго винта по сравнению с автономным функционированием первого. Поскольку использовались абсолютно одинаковые генераторы,

что было подтверждено взаимной переменой их местоположения, такое различие можно объяснить лишь потерями, которые имеют место при организации трансмиссионной передачи [29].

При этом на силу трения влияет качество ремня, его геометрия, натяжение, факторы сопряжения механизмов, качество подшипников. Кроме того, передающий ремень расположен в ядре потока аэродинамической трубы и на него оказывают существенное влияние аэродинамические силы, что также увеличивает суммарные потери на трение и снижает генерацию электрического тока. Провести точный учёт подобных потерь экспериментально не представляется возможным технически. В то же время теоретический расчёт силы трения существенно усложнит все энергетические расчёты, поэтому на практике применялся приближённый метод, основанный на расчёте потерь на трение по разнице значений мощности, генерируемой первым и вторым генераторами при автономной работе каждого. Метод включал в себя проведение серии последовательных локальных интерполяций для максимального обобщения результатов измерений.

Полученные в результате приближённых исследований количественные показатели потерь мощности суммировались со значениями, которые фиксировались приборами. Таким образом, косвенно нивелировались потери на трение, имеющие место при такой компоновке испытательного стенда. На рис. 3 показаны уточнённые качественные значения мощности в предположении, что механические потери на втором винте минимальны.



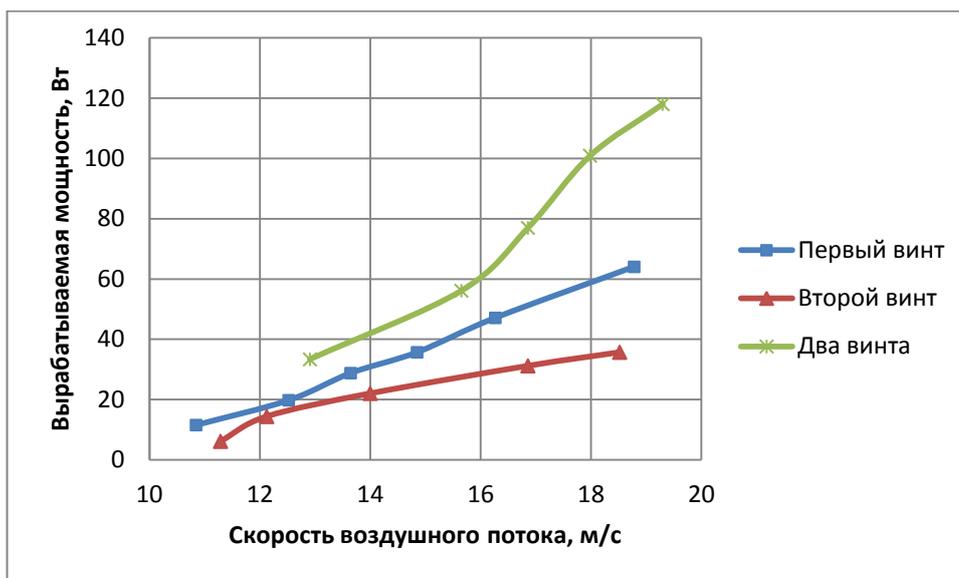


Рис. 3 – Результаты экспериментов без учёта влияния механического трения
 Fig. 3 – The experimental results without influent of the mechanical friction

На графиках рис. 3 чётко видно, что даже при небольших значениях скорости суммарная эффективность работы системы из двух соосных ветротурбин будет выше, чем каждой ветротурбины в отдельности. Причём при малых скоростях ветра мощность соосной системы будет практически равняться сумме мощностей первой и второй ветротурбины, а при повышении скорости ветра прослеживается тенденция некоторого увеличения мощности соосной системы по сравнению с суммой мощностей первой и второй ветротурбины.

4.1. Перспективы дальнейших исследований

Полученные результаты дают общую качественную картину и показывают только возможность и перспективность использования предложенной компоновки двух соосных ветротурбин. Специфика постановки эксперимента не позволяет получить с достаточной степенью точности общие частотные характеристики системы при работе двух ветротурбин одновременно. Аппроксимация частотных характеристик в данном случае будет некорректной. Это делает невозможным анализ результатов в общепринятых в ветроэнергетике обобщённых переменных $C_p = C_p(\lambda)$, что затрудняет перенос полученных результатов на реальный объект и сравнение с приближёнными теоретическими методиками [30]. Для решения этой проблемы предполагается провести дополнительную серию экспериментов с предварительным переоборудованием экспериментальной установки для получения адекватных частотных характеристик двух соосных ветроагрегатов и минимизации потерь на трение при трансмиссионной передаче.

5. Заключение

Проведенные экспериментальные исследования модельной ветроустановки с двумя соосными двухлопастными ветротурбинами показали перспективность данной компоновки при использовании в условиях ограниченной площади. Эффективность соосной системы возрастает при увеличении скорости ветра и становится выше, чем суммарная эффективность каждого ветроагрегата при их раздельной работе. Дальнейшие исследования позволят выявить количественные характеристики предложенной компоновки, очертить сферу её возможного применения, обобщить результаты для проектирования реальных ветроэнергетических систем.

Список литературы

- [1] Будько, В.И. Современное состояние и развитие возобновляемой энергетики / В.И. Будько, С.А. Кудря, А.В. Пепелов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 4–6. – С. 130–141.
- [2] Islam, M.R. Progress and recent trends of wind energy technology / M.R. Islam, S. Mekhilef, R. Saidur // Renew Sustain Energy Rev. – 2013. – No. 21. – P. 456–468.
- [3] Головки, В.М. Вплив параметрів системи орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми «хвіст на косому шарнірі» на статичні характеристики ВЕУ / В.М. Головки [и др.] // Відновлювана енергетика. – 2016. – № 1 (44). – С. 45–54.
- [4] Головки, В.М. Вплив параметрів системи орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми підпружиненого хвоста на статичні характеристики вітроустановки / В.М. Головки [и др.] //



Відновлювана енергетика. – 2015. – № 3 (42). – С. 30–39.

[5] Eriksson, S. Evaluation of different turbine concepts for wind power / S. Eriksson, H. Bernhoff, M. Leijon // *Renew Sustain Energy Rev.* – 2008. – No. 12. – P. 1419–1434.

[6] Кудря, С.О. Оцінка вітрового енергетичного потенціалу зони відчуження ЧАЕС / С.А. Кудря [и др.] // *Відновлювана енергетика.* – 2016. – № 3 (46). – С. 44–49.

[7] Тучинский, Б.Г. Математические модели некоторых оптимизационных задач расстановки ветровых электроустановок / Б.Г. Тучинский // *Відновлювальна енергетика.* – 2013. – № 1 (32). – С. 52–57.

[8] Sørensen, B. *Renewable Energy: its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy, and Planning Aspects* / B. Sørensen. – Elsevier Academic Press, New York, 2004.

[9] Соломин, Е.В. О размещении ветроэнергетических установок на зданиях и сооружениях / Е.В. Соломин // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE).* – 2014. – № 9. – 42–45.

[10] Coleman, C.P. A Survey of Theoretical and Experimental Coaxial Rotor Aerodynamic Research / C.P. Coleman. – NASA Technical Paper 3675, March 1997. – P. 32.

[11] Tescione, G. Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry / G. Tescione [et al.] // *Renew. Energy.* – 2014. – No. 70. – P. 47–61.

[12] Dabiri, J.O. Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays / J.O. Dabiri // *J. Renew. Sustain. Energy.* – 2011. – No. 3. – P. 043104.

[13] Zanforlin, S. Fluid dynamic mechanisms of enhanced power generation by closely spaced vertical axis wind turbines / S. Zanforlin, T. Nishino // *Renewable Energy.* – 2016. – No. 99. – P. 1213–1226.

[14] Lam, H.F. Measurements of the wake characteristics of co- and counter-rotating twin H-rotor vertical axis wind turbines / H.F. Lam, H.Y. Peng // *Energy.* – 2017. – No. 131. – 13–26.

[15] Ahmadi-Baloutaki, M. A wind tunnel study on the aerodynamic interaction of vertical axis wind turbines in array configurations / M. Ahmadi-Baloutaki, R. Carriveau, D.S-K. Ting // *Renewable Energy.* – 2016. – No. 96. – P. 904–913.

[16] Кныш, Л.И. Влияние некоторых геометрических параметров на энергетические показатели ветродвигателей с вертикальной осью вращения / Л.И. Кныш, О.Г. Гоман // *Відновлювальна енергетика.* – 2017. – № 4 (51). – С. 59–66.

[17] Абрамовский, Е.Р. Проблемы оптимизации параметров ветряных двигателей / Е.Р. Абрамовский, Н.Н.Лычагин. – Днепропетровск: Наука и образование, 2014. – 274 с.

[18] Sun., Zh. Improved fixed point iterative method for blade element momentum computations / Zh. Sun [et

al.] // *Wind Energy.* – 2017. – Vol. 20. – Iss. 9. – P.1585–1600.

[19] Тарасов, С.В. Вычислительная гидродинамика на службе ветроэнергетики / С.В. Тарасов [и др.] // *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка.* – 2016. – № 5 (24). – С. 38–48.

[20] Dhert, T. Aerodynamic shape optimization of wind turbine blades using a Reynolds-averaged Navier–Stokes model and an adjoint method / T. Dhert [et al.] // *Wind Energy.* – 2017. – Vol. 20. – Iss. 5. – P. 909–926.

[21] Troldborg, N. A simple model of the wind turbine induction zone derived from numerical simulations / N. Troldborg, A. Raul, M. Forsting // *Wind Energy.* – 2017. – Vol. 20. – Iss. 12. – P. 2011–2020.

[22] Ramos-García, N. Hybrid vortex simulations of wind turbines using a three-dimensional viscous-inviscid panel method / N. Ramos-García [et al.] // *Wind Energy.* – 2017. – Vol. 20. – Iss. 11. – P.1871–1889.

[23] Sheldahl, R.E. *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 / R.E. Sheldahl, P.C. Klimas. – Energy report, 1981. – 120 p.

[24] Hansen, M.O. *Aerodynamics of wind turbine* / M.O. Hansen. – UK: Earthscan; 2008.

[25] Eunkuk, S. Characteristics of turbine spacing in a wind farm using an optimal design process / S. Eunkuk [et al.] // *Renewable Energy.* – 2014. – Vol. 65. – P. 245–249.

[26] Капля, Е.В. Результаты экспериментальных исследований частоты вращения двойного горизонтально-осевого ветроколеса / Е.В. Капля // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE).* – 2015. – № 17–18. – С. 30–33.

[27] Ерохин, Ф.А. Исследование горизонтально-осевой трёхлопастной ветроэнергетической установки / Ф.А. Ерохин // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE).* – 2015. – № 17–18. – С. 38–41.

[28] Доржиев, С.С. Осевые ускорители низкопотенциальных ветровых потоков / С.С. Доржиев, Е.Г. Базарова, К.А. Горинов // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE).* – 2015. – № 7. – С. 37–47.

[29] Sha Wei. Dynamic response analysis on torsional vibrations of wind turbine geared transmission system with uncertainty / Sha Wei [et al.] // *Renewable Energy.* – 2015. – Vol. 78. – P. 60–67.

[30] Игнатъев, С.Г. Коэффициент использования установленной мощности как критерий эффективности ветроэнергетической установки / С.Г. Игнатъев // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE).* – 2016. – № 5–6. – С. 28–38.

References

[1] Bud'ko V.I., Kudrja S.A., Pepelov A.V. Current state and development of renewable energy (Sovremennoe sostoyanie i razvitie vozobnovlyаемoi energetiki). *Internat-*



tional Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE), 2017;(4–6):130–141 (in Russ.).

[2] Islam M.R., Mekhilef S., Saidur R. Progress and recent trends of wind energy technology. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013;(21):456–468.

[3] Golovko V.M., Kohanjevych V.P., Shyhajlov M.O., Bud'ko V.I. The influence of rotor orientation parameters of the constructive scheme «tail oblique hinge» over static characteristics of wind turbines (Vplyv parametriv systemy orijentacii' rotora z vykorystannjam konstruktyvnoi' shemy "hvist na kosomu sharniri" na statychni harakterystyky VEU). *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable energy)*, 2016;1(44):45–54 (in Ukr.).

[4] Golovko V.M., Kohanjevych V.P., Shyhajlov M.O., Marchenko N.V. The influence of rotor system orientation parameters using the constructive scheme of the spring tail over static characteristics of wind turbines (Vplyv parametriv systemy orijentacii' rotora z vykorystannjam konstruktyvnoi' shemy pidpruzhynenogo hvosta na statychni harakterystyky vitroustanovky). *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable energy)*, 2015;3(42):30–39 (in Ukr.).

[5] Eriksson S., Bernhoff H., Leijon M. Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2008;(12):1419–1434.

[6] Kudrja S.O., Tuchynskij B.G., Ivanchenko I.V., Petrenko K.V. Wind energy potential estimation for the Chernobyl nuclear power plant exclusion zone (Ocinka vitrovogo energetychnogo potencialu zony vidchuzhennja ChAES). *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable energy)*, 2016; 3(46):44–49 (in Ukr.).

[7] Tuchinskij B.G. Mathematical models of some optimizing tasks for wind turbines disposition (Matematicheskie modeli nekotoryh optimizatsionnyh zadach rasstanovki vetrovyh elektroustanovok). *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable energy)*, 2013; 1(32):52–57 (in Russ.).

[8] Sørensen B., *Renewable Energy: its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy, and Planning Aspects*. Elsevier Academic Press, New York, 2004.

[9] Solomin E.V. About the arrangement of wind turbines on the buildings and constructions (O razmeshhenii vetroenergeticheskikh ustanovok na zdaniyah i sooruzheniyah). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2014;(9):42–45 (in Russ.).

[10] Coleman C.P. A Survey of Theoretical and Experimental Coaxial Rotor Aerodynamic Research. NASA Technical Paper 3675, March 1997. – P. 32.

[11] Tescione G., Ragni D., He C., Simao Ferreira C.J., van Bussel G.J.W. Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry. *Renewable Energy*, 2014;(70):47–61.

[12] Dabiri J.O. Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2011;(3):043104.

[13] Zanforlin S., Nishino T. Fluid dynamic mechanisms of enhanced power generation by closely spaced

vertical axis wind turbines. *Renewable Energy*, 2016;(99):1213–1226.

[14] Lam H.F., Peng H.Y. Measurements of the wake characteristics of co- and counter-rotating twin H-rotor vertical axis wind turbines. *Energy*, 2017;(131):13–26.

[15] Ahmadi-Baloutaki M., Carriveau R., Ting D.S.-K. A wind tunnel study on the aerodynamic interaction of vertical axis wind turbines in array configurations. *Renewable Energy*, 2016;(96):904–913.

[16] Knysh L.I., Goman O.G. The influence of some geometrical parameters on the energy indicators of the vertical axis wind turbines (Vliyanie nekotoryh geometricheskikh parametrov na energeticheskie pokazateli vetrodvigatelei s vertikal'noi os'u vrashcheniya). *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable energy)*, 2017;4(51):59–66 (in Russ.).

[17] Abramovskij E.R., Lychagin N.N. Problems of optimization of wind turbine parameters (Problemy optimizatsii parametrov vetrovykh dvigatelei). Dnepropetrovsk, Nauka i obrazovanie Publ., 2014; 274 p. (in Russ.).

[18] Sun Zh. Improved fixed point iterative method for blade element momentum computations. *Wind Energy*, 2017;20(9):1585–1600.

[19] Tarasov S.V., Redchic D.A., Polevoj O.B., Chashina I.B., Moiseenko S.V. Computational fluid dynamics for wind energy problems (Vychislitel'naya gidrodinamika na sluzhbe vetroenergetiki). *Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series: Mechanics*, 2016;5(24)38–48 (in Russ.).

[20] Dhert T., Ashuri T., Martins J.R.R.A. Aerodynamic shape optimization of wind turbine blades using a Reynolds-averaged Navier–Stokes model and an adjoint method. *Wind Energy*, 2017;20(5):909–926.

[21] Troldborg N., Raul A., Forsting M. A simple model of the wind turbine induction zone derived from numerical simulations. *Wind Energy*, 2017;12(20):2011–2020.

[22] Ramos-García N., Ramos-García N., Hejlesen M.M., Sørensen J.N., Walther J.H. Hybrid vortex simulations of wind turbines using a three-dimensional viscous-inviscid panel method. *Wind Energy*, 2017;20(11):1871–1889.

[23] 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.

[24] Hansen MO. Aerodynamics of wind turbine. UK: Earthscan; 2008

[25] Eunkuk S., Seungmin L., Byeongho H., Soogab L. Characteristics of turbine spacing in a wind farm using an optimal design process. *Renewable Energy*, 2014;(65):245–249.

[26] Kaplja E.V. The results of experimental researches on the rotation frequency of dual horizontal-axis wind rotors (Rezultaty eksperimental'nyh issledovaniy chastoty vrashcheniya dvoynogo gorizonta'ln'o-osevogo vetrokolesa), *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2015;(17–18):30–33 (in Russ.).

[27] Erohin F.A. Researches of horizontal axes three-blades wind turbine (Issledovanie gorizontal'no-osevoi trehlopastnoi vetroenergeticheskoi ustanovki). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2015;(17–18):38–41 (in Russ.).

[28] Dorzhiev S.S., Bazarova E.G., Gorinoy K.A. The axis accelerators of the low-potential wind flow (Osevyi uskoriteli nizkopotencial'nykh vetrovykh potokov). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2015;(7):37–47 (in Russ.).

[29] Sha Wei, Zhao Jingshan, Han Qinkai, Chu Fulei Dynamic response analysis on torsional vibrations of wind turbine geared transmission system with uncertainty. *Renewable Energy*, 2015;(78):60–67.

[30] Ignat'ev S.G. The capacity factor as a measure of the efficiency of the wind power plant (Koeffitsient effektivnosti vetroenergeticheskoi ustanovki). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2016;(5–6):28–38 (in Russ.).

Транслитерация по BSI



О мероприятии

7 декабря в Москве, в Конгресс-центре Торгово-промышленной палаты РФ состоится Международный энергетический форум и Торжественная церемония вручения Международной премии «Малая энергетика – большие достижения». Проект, организованный Ассоциацией малой энергетики, проходит при официальной поддержке бизнес-объединения «Деловая Россия», комитета энергетики Государственной Думы РФ, Министерства энергетики РФ и Энергетического центра Московской школы управления «СКОЛКОВО». Генеральный партнер проекта: Группы компаний «МКС».

Прием заявок на участие в Международном конкурсе «Малая энергетика – большие достижения» ведется с 1 сентября по 11 ноября. Премия вручается по шести номинациям:

- «Лучший проект в области малой энергетики мощностью до 5 МВт»;
- «Лучший проект в области малой энергетики мощностью от 5 МВт»;
- «Лучший проект в области альтернативной энергетики»;
- «Инновационная разработка в сфере энергетики»;
- «Инвестор года в энергетике»;
- «За вклад в развитие отрасли».

Победители в шести номинациях получают Почетный диплом и эксклюзивную статуэтку «Золотая молния», выполненную златоустовскими мастерами.

Для посетителей:

Принять участие в международном конкурсе «Малая энергетика – большие достижения» можно бесплатно, подав заявку с 1 сентября по 11 ноября на эл. адрес: award@energo-union.com. Подробности проекта можно узнать на официальном сайте мероприятия <http://energo-union.com/awards/>

Для участия в Торжественной церемонии вручения Международной премии «Малая энергетика – большие достижения» и Международном энергетическом форуме необходимо пройти регистрацию на сайте проекта: <http://energo-union.com/awards/>. Участие в мероприятии бесплатное.

Оргкомитет Международной премии «Малая энергетика – большие достижения»

Мария Невוליная	Алла Захарова
+7 351 247 33 99	+7 922 634 00 00
energo@energo-union.com	zakharova@energo-union.com
award@energo-union.com	

Организаторы:

Ассоциация малой энергетики
При поддержке бизнес-объединения «Деловая Россия», комитета энергетики Государственной Думы РФ, Минэнерго РФ, Энергетического центра Московской школы управления СКОЛКОВО

energo-union.com

