

Академик НАН Украины В. Т. Гринченко, В. П. Каян

## Оптимизация характеристик ветроротора Дарье с прямыми управляемыми лопастями

*Приведены результаты исследований возможности повышения эффективности использования энергии ветра и улучшения динамических характеристик ветроротора Дарье с прямыми лопастями. Основная идея работы заключается в том, чтобы путем регулирования ориентации лопастей ротора относительно набегающего потока оптимизировать величину крутящего момента на валу ротора. Численное решение двумерной задачи аэродинамики позволило получить исходные данные для разработки механизма регулирования положения лопастей. Возможность практической реализации подтверждена обширными экспериментальными исследованиями на нескольких моделях ветроротора. Показаны способность ротора с управляемыми лопастями самозапускаться при весьма низких скоростях ветрового потока, а также значительное увеличение коэффициентов использования энергии потока и крутящего момента на валу ветроротора по сравнению с аналогичным ротором с жестко фиксированными лопастями.*

**Ключевые слова:** ротор Дарье, управление лопастями, эффективность.

Программы развития энергетики ведущих стран мира и значительное число уже реализованных проектов свидетельствуют о возрастающей роли возобновляемых источников энергии в общем энергетическом балансе. При создании устройств, использующих различные природные источники энергии, возникает значительное число научных и инженерных проблем. Одна из них — повышение эффективности преобразования энергии природного источника в механическую или электрическую энергию. Эта проблема появляется и при создании энергетических установок, преобразующих кинетическую энергию ветра или потока жидкости в механическую или электрическую энергию. В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на повышение эффективности таких устройств, как ветророторы с вертикальной осью вращения (типа ротора Дарье с прямыми лопастями).

В настоящее время для утилизации ветровой энергии широко используются ветроэнергетические установки (ВЭУ) с горизонтальной осью вращения ветроротора с установленной мощностью от сотен ватт до нескольких мегаватт. Обязательными компонентами конструкции таких ВЭУ являются вертикальные башни высотой от 10 до 150 м, механизмы для ориентирования площади вращения ветроротора перпендикулярно направлению ветра. Для размещения установки необходим участок поверхности, превосходящий в несколько раз площадь, ометаемую ветроротором. Ветроустановки с вертикальной осью вращения не нуждаются в специальных механизмах ориентации относительно направления ветра и допускают двухпорную систему крепления ротора. Генератор может размещаться в основании установки, что упрощает ее конструкцию. Важным достоинством установки с вертикальной осью вращения является также относительная простота конструкции лопастей и относительно малая площадь, необходимая для размещения ВЭУ [1]. Одним из главных недостатков ветророторов Дарье с жестко фиксированными относительно горизонтальных траверс

лопастями является высокая скорость ветрового потока, при которой происходит самозапуск ротора во вращение, и большие значения переменной механической нагрузки на валу. Как оказалось, оба эти недостатка могут быть устранены при использовании специальных способов управления положением лопастей в процессе вращения ветроротора.

При движении по круговой траектории лопасть ротора Дарье работает в периодически изменяющемся нестационарном потоке. Проекция результирующей аэродинамической силы, возникающей при обтекании профиля лопасти, на касательную к круговой траектории лопасти и дает ту силу, которая создает крутящий момент на валу ветроротора. Поскольку при конструировании лопастей используются типичные крыльевые профили, основным параметром, определяющим величину и направление действующей на профиль силы, является угол атаки. Характер движения лопасти в роторе с фиксированным положением лопастей таков, что на весьма большой части ее траектории углы атаки становятся закрытичными. Это приводит к срыву потока и резкому снижению величины полезной составляющей аэродинамической силы так, что на некоторых участках траектории лопасть даже тормозит ветроротор [2]. Однако, если иметь возможность поворачивать лопасть таким образом, чтобы обтекание профиля лопасти происходило под оптимальным углом атаки, можно значительно увеличить величину момента, развиваемого на оси ротора.

Следует отметить, что за последние 30 лет в мире были зарегистрированы десятки патентов на механизмы управления лопастями ротора Дарье, однако нигде не упоминалось о законах управления лопастью и практической реализации этих устройств. Целью наших исследований являлось определение возможных законов управления лопастью ротора, разработка энергетически эффективных механизмов, позволяющих реализовать такие законы, и проверка предложенных решений с использованием экспериментальной ветроустановки. При решении задачи использованы результаты компьютерного моделирования, различные конструктивные решения механизма управления лопастями и обширные данные экспериментальных исследований моделей в различных условиях [3].

С начала 2000-х годов в Институте гидромеханики НАН Украины исследования моделей ветророторов с управляемыми лопастями на первом этапе проводились в гидролотке на специальной экспериментальной установке, модели роторов отличались длиной лопастей и их количеством, а также величиной радиуса установки лопастей на траверсах модели ветроротора [3, 4]. У ветророторов с жестко фиксированными относительно траверс лопастями угол установки хорды профиля лопасти к касательной к ее окружности вращения был выбран равным  $+4^\circ$ , профиль лопасти — осесимметричный типа NASA-0015 [5].

Механизм изменения угла установки лопасти относительно траверсы состоял из управляющей дорожки, с которой была связана лопасть, имевшая возможность поворота относительно траверсы. В исследованиях применялись два типа механизма управления лопастями. В механизме управления № 1 управляющая дорожка была круговой и она имела возможность перемещаться относительно оси вращения модели ветроротора вдоль направления продольной оси гидролотка, в результате чего появлялся некоторый эксцентриситет  $e$  между центром вращения ветроротора и центром управляющей дорожки, что обеспечивало изменение угла установки лопасти в каждой точке ее круговой траектории. В механизме управления № 2 дорожка была выполнена профилированной таким образом, что задавался определенный закон поворота лопастей так, чтобы на большей части как наветренной, так и подветренной частях круговой траектории на лопасти выдерживался определенный угол атаки, величина которого зависела от формы профиля и числа Рейнольдса [5]. В дальнейшем на такую конструкцию ветроротора был получен патент Украины [6].

Основным параметром, характеризующим эффективность работы ветроротора, является коэффициент использования энергии потока  $C_p$ , обычно представляемый в зависимости от величины коэффициента быстроходности  $\lambda p$ . Коэффициент быстроходности характеризует быстроходность ветроротора и показывает соотношение окружной скорости лопасти  $V_{\text{окр}} = 2\pi nR$  и скорости набегающего на ветроротор потока  $V$  и определяется как

$$\lambda p = \frac{2\pi nR}{V}, \quad (1)$$

где  $n$  — число оборотов ветроротора в секунду;  $R = \text{const}$  — радиус окружности, по которой движется центр давления на хорде лопасти;  $V$  — скорость набегающего на модель ветроротора потока, измеренная в момент записи рабочего режима. Этот коэффициент важен при проектировании электрогенератора, использующего механическую энергию вращения ветроротора. Чем выше величина коэффициента  $\lambda p$ , при которой достигается максимум коэффициента  $C_p$ , тем более быстроходным считается ветроротор и тем менее габаритным будет электрогенератор.

Коэффициенты использования энергии потока  $C_p$  и крутящего момента на валу ветроротора  $C_m$  определялись как

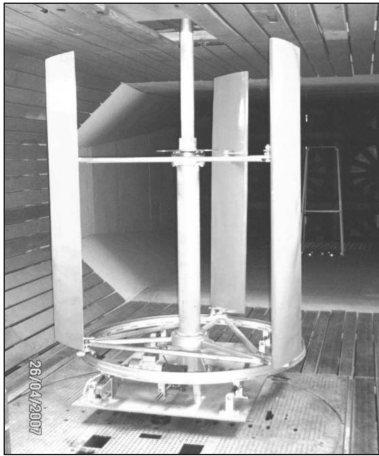
$$C_p = 2P/\rho V^3 S, \quad C_m = C_p/\lambda p, \quad (2)$$

где  $P = 2\pi nM$  — полезная мощность, развиваемая моделью ветроротора;  $\rho$  — плотность воды (или воздуха);  $S = 2Rl_{\text{лоп}}$  — ометаемая площадь модели ветроротора.

Результаты исследований модели ветроротора показали преимущество способа управления механизмом № 2 над способом управления механизмом № 1, при этом эффективность ротора (величина коэффициента  $C_p$ ) возросла на 40–70%, а величина как средней аэродинамической нагрузки на вал ротора, так и амплитуды ее пульсации была снижена в несколько раз [4]. Это определялось тем, что при использовании механизма № 2 оптимальный угол атаки на лопасти удавалось сохранять на значительно большей части круговой траектории лопасти, чем при использовании механизма № 1.

Для подтверждения результатов, полученных на малых моделях ветроротора, и проведения более масштабных исследований ветроротора такого типа уже в воздушном потоке в Институте гидромеханики НАН Украины в 2006–2007 гг. был разработан, создан и в 2007 г. испытан в аэродинамической трубе Киевского Национального авиационного университета макет трехлопастного ветроротора (ИГМ-1) с механизмом № 1 управления лопастями с ожидаемой выходной мощностью на валу ветроротора величиной около 1 кВт. Ветроротор (рис. 1, а) имел следующие параметры: длина лопасти —  $l_{\text{лоп}} = 1,95$  м, длина хорды лопасти —  $b = 0,41$  м, профиль лопасти НАСА — 0015, удлинение лопасти —  $\lambda = 4,77$ , радиус кругового вращения лопасти —  $R = 0,8$  м, диаметр управляющей окружности  $D = 1,45$  м, ометаемая площадь —  $S = 3,13$  м<sup>2</sup>, коэффициент заполнения —  $\sigma = 3b/2R = 0,77$ , максимальная достигаемая величина относительного эксцентриситета —  $\varepsilon = e/b = 0,12$ . Исследования работы ветроротора проводились при скорости воздушного потока от 5 до 13 м/с.

Для создания нагрузочного момента на валу ветроротора использовались тормозные муфты типа INTORQ с тормозными моментами на валу  $M = 7,5$ ; 15; 30 и 60 Нм соответственно. Муфты располагались на верхнем конце дополнительного опорного вала выше потолка рабочей части аэродинамической трубы. Размеры поперечного сечения рабочего участка аэродинамической трубы были  $B \times H = 4 \times 2,5$  м. Отметим, что ветроротор са-



а



б

Рис. 1. Ветроротор ИГМ-1 (2007 г.) с механизмом управления № 1 (а) и ветроротор ИГМ-3 (2012 г.) с механизмом управления № 2 (б) в аэродинамической трубе НАУ

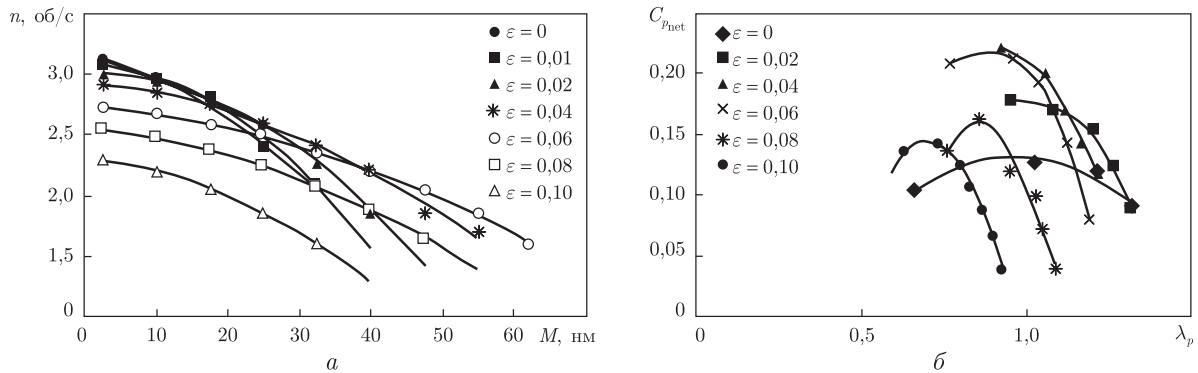
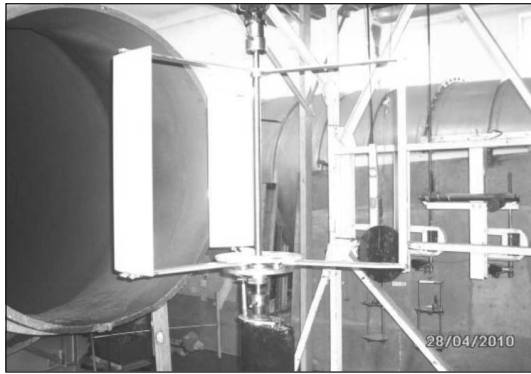


Рис. 2. Зависимости величины числа оборотов ветроротора  $n$  в секунду от величины нагрузочного момента  $M$  на валу (а) и зависимости величин коэффициента использования энергии потока  $C_{p_{net}}$  ветроротора ИГМ-1 от величины коэффициента быстроходности  $\lambda_p$  (б) при различных величинах относительного эксцентриситета  $\epsilon$  при скорости ветрового потока  $V = 12$  м/с

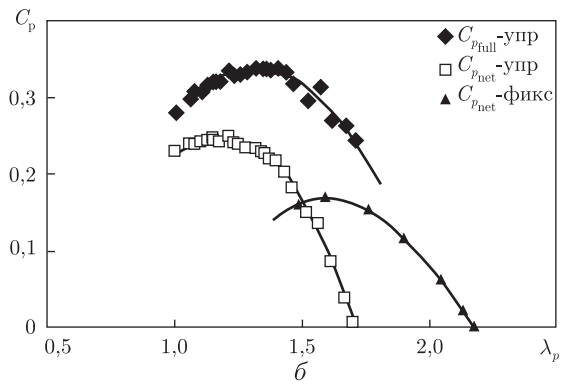
мозапустился при скорости потока  $V = 4$  м/с, относительный эксцентриситет  $\epsilon$  при этом был равен 0,08.

Зависимость скорости вращения ветроротора  $n$  (об/с) от величины полезного момента  $M$  (Нм) на валу при скорости ветрового потока  $V = 12$  м/с и различных величинах относительного эксцентриситета  $\epsilon$  представлена на рис. 2, а. Когда эксцентриситет  $\epsilon = 0$  или достаточно мал, увеличение нагрузочного момента на валу приводит к быстрому снижению величины скорости вращения ветроротора  $n$ . Когда же величина относительного эксцентриситета близка к оптимальной ( $\epsilon = 0,04-0,06$ ), это снижение достаточно плавное и зависимость  $n$  от  $M$  практически линейная.

Зависимости коэффициента использования энергии потока  $C_{p_{net}}$ , характеризующего полезную (чистую) энергию на выходе вала ветроротора, представлены на рис. 2, б. Невысокие значения коэффициента  $C_{p_{net}}$  обусловлены большими потерями энергии, связанными с некоторыми конструктивными и технологическими особенностями ветроротора (подробно об этом см. в [7]). Однако даже в этом случае эффективность ветроротора с управляемыми



а



б

Рис. 3. Ветроротор ИГМ-2 (2010 г.) с механизмом управления № 2 в аэродинамической трубе НАКУ “ХАИ” (а) и зависимости величин коэффициента  $C_p$  ветроротора от коэффициента быстроходности  $\lambda_p$  ( $b = 0,2$  м,  $V = 9$  м/с) (б)

лопастями (когда  $\varepsilon = 0,05-0,06$ ) более чем в 1,5 раза выше, чем у ветроротора с жестко установленными лопастями ( $\varepsilon = 0$ ). Измерения нагрузки на вал ротора от воздействия набегающего потока также показали возможность снижения как средней аэродинамической нагрузки, так и динамического коэффициента пульсации этой нагрузки, почти в пять раз.

Следующий трехлопастный ветроротор ИГМ-2 был спроектирован для испытаний в аэродинамической трубе Национального аэрокосмического университета “ХАИ” и соответственно его геометрические параметры были следующими: длина лопасти  $l_{\text{лоп}} = 0,7$  м, лопастей было два комплекта с длиной хорды  $b$  0,125 и 0,2 м, профиль лопасти НАСА 0015, удлинение лопастей  $\lambda = 5,6$  и 3,5 соответственно, радиус кругового вращения лопасти  $R = 0,5$  м, средний диаметр управляющей канавки  $D = 0,2$  м, площадь рабочего сечения  $S = 0,7$  м<sup>2</sup>, коэффициент заполнения  $\sigma = 0,375$  и 0,6 соответственно (рис. 3, а). Основные параметры аэродинамической трубы Т-3, в которой проходили исследования, были следующие: диаметр выходного сечения сопла  $D_c = 1,5$  м; длина открытой рабочей части аэродинамической трубы  $L = 2,05$  м; диапазон скоростей — 0,5–45 м/с.

Измерение скорости потока в рабочей части аэродинамической трубы производилось при помощи стандартного микроанометра ММН250 № 1912 с классом точности 0,5, полезный момент на валу ветроротора измерялся с помощью измерительного нагрузочного устройства ИНУ-5, которое представляет собой асинхронную магнитную муфту. Исследования проводились при скоростях потока на срезе сопла рабочей части аэродинамической трубы 7, 9 и 11 м/с [8].

Управляющий механизм № 2 представлял собою диск, расположенный под нижними траверсами ветроротора (см. рис. 3, а), в котором имелась специальным образом спрофилированная канавка, внутри которой двигались ролики, оси которых были соединены с тягами, расположенными внутри нижних траверс. Другим концом тяги были соединены с управляющими осями на торце лопастей. Диск крепился на нижней опоре жестко. Однако такая конструкция управляющего механизма оказалась нерациональной, поскольку, как было определено экспериментально, в ней были весьма велики потери энергии, производимой лопастями ветроротора. На рис. 3, б кривая ( $C_{p_{full-упр}}$ ) соответствует полной энергии, производимой управляемыми лопастями, а кривая ( $C_{p_{net-упр}}$ ) — полезной энергии на валу ветроротора. Кривая ( $C_{p_{net-фикс}}$ ) относится к этому же ветроротору, когда управляю-

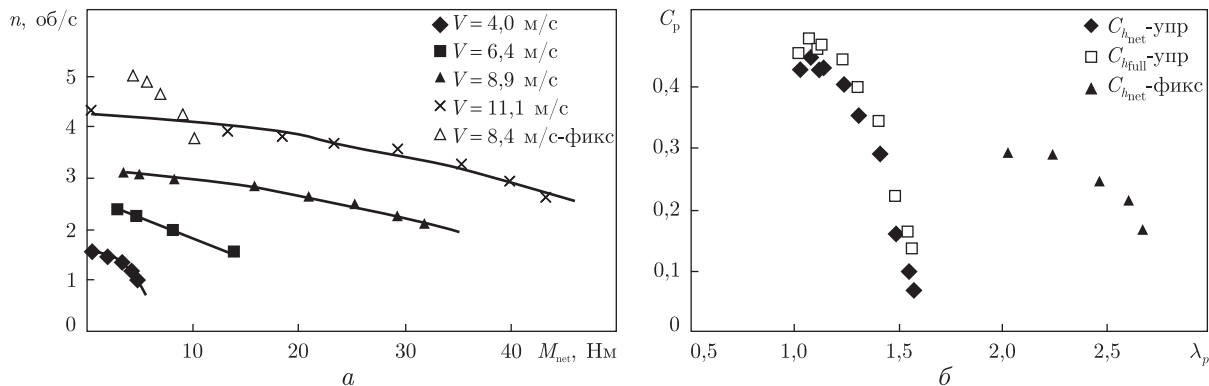


Рис. 4. Зависимости скорости вращения ветроротора  $n$  от величины нагрузочного момента  $M_{\text{нет}}$  на валу при различных скоростях ветрового потока  $V$  (а) и зависимости величин коэффициента использования энергии потока  $C_p$  ветроротора от величины коэффициента быстроходности  $\lambda_p$  (б) при скорости ветрового потока  $V = 9$  м/с

щий механизм отсутствует и лопасти установлены на траверсах жестко, а угол установки лопасти (т.е. угол между хордой лопасти и касательной к круговой траектории в месте крепления поворотной оси лопасти) составляет  $10^\circ$  [8].

С учетом опыта проектирования и испытаний двух описанных выше ветророторов в Институте гидромеханики НАН Украины в 2011–2012 гг. был создан ветроротор ИГМ-3 (см. рис. 1, б), который в 2012–2013 гг. прошел несколько испытаний в аэродинамической трубе Национального авиационного университета. Ветроротор имел следующие параметры: длина лопасти  $l_{\text{лоп}} = 1,6$  м, длина хорды лопасти  $b = 0,25$  м, профиль лопасти НАСА 0015, удлинение лопасти  $\lambda = 6,4$ , радиус кругового вращения лопасти  $R = 0,7$  м, средний диаметр управляющей дорожки  $D = 0,4$  м, площадь рабочего сечения  $S = 2,24$  м<sup>2</sup>, коэффициент заполнения  $\sigma = 0,54$ . Лопасти были выполнены из углепластика и одна лопасть весила 2,7 кг.

Использовался механизм управления № 2, который представлял собой цилиндрическую дорожку специальной формы в плане и толщиной 8 мм, расположенную под нижними траверсами ветроротора (см. рис. 1, б), по обеим сторонам которой двигались три пары роликов, соединенных специальными каретками, которые шарнирно были соединены с тягами, расположенными внутри нижних траверс. Другим концом тяги шарнирно соединялись с управляющими осями на торце лопастей. Управляющая дорожка крепилась на нижней опоре жестко. Существенным отличием конструкции ветроротора ИГМ-3 от предыдущих конструкций было консольное крепление вала. Нижний конец вала уходил под пол аэродинамической трубы, где на валу размещался диск с 60-тью отверстиями для измерения скорости вращения ветроротора, и вал через редуктор с коническими шестернями соединялся с электромагнитной порошковой тормозной муфтой (мод.14.512.08.1.2). Диапазон задаваемых муфтой тормозных моментов составлял 3–80 Нм с шагом 2 Нм. Во время работы ветроротора скорость воздушного потока измерялась в двух точках — перед ветроротором на расстоянии  $2,5R$  от вертикальной оси ветроротора и за ветроротором на расстоянии  $1,5R$  от оси. При начальной нагрузке на валу в 3 Нм (сопротивление муфты с отключенным электропитанием) ветроротор самозапускался при скорости ветрового потока  $V = 2,5 \div 2,8$  м/с, без нагрузки (т.е. при снятой муфте) — при  $V = 1,8 \div 2$  м/с.

Зависимость скорости вращения ветроротора  $n$  от величины полезного момента  $M_{\text{нет}}$  на валу при различных скоростях ветрового потока  $V$  представлена на рис. 4, а. Макси-

мальные мощности на валу получены при наименьших скоростях вращения ветроротора. Управление лопастями позволяет получить на валу вращающий момент, почти в три раза превосходящий момент, создаваемый ротором с жестко фиксированными лопастями, при этом почти вдвое снижается скорость вращения ветроротора (см. рис. 4, *a*). Это хорошо видно на рис. 4, *б*, где максимум эффективности ротора с управляемыми лопастями получен при коэффициенте быстроходности  $\lambda p = 1,1$ , а максимум эффективности ротора с жестко фиксированными лопастями получен при коэффициенте  $\lambda p = 2,1$ , в то же время величина коэффициента  $C_{p_{net}}$  у ротора с управляемыми лопастями почти в 1,5 раза выше, чем у того же ветроротора с жестко фиксированными лопастями (т. е. механизм управления снят). При жестком креплении лопастей угол установки лопастей составлял  $8^\circ$ , что согласуется и с данными, полученными в Институте МакМастер в Канаде [9] при продувке ветроротора с размерами  $H \times D = 3 \times 2,5$  м (экспериментально  $C_{p_{full}}$  был получен там не более 0,33).

Следует отметить также, что если поддерживать на круговой траектории движения лопасти оптимальный угол атаки профиля, полученный в статике продувками в аэродинамической трубе [5], увеличение эффективности ротора практически нет. Еще в 80-х годах прошлого века была высказана гипотеза о том, что при периодически нестационарном обтекании профиля происходит затягивание отрыва на поверхности крыла и оптимальный угол атаки, при котором обтекание профиля еще безотрывное, становится больше [10]. Углы, задаваемые управляющей дорожкой ветроротора ИГМ-3, были значительно больше, чем те, которые следовало бы выбрать, используя результаты работы [5]. Кроме того, на подветренной части траектории углы атаки на профиле задавались меньшей величины, чем на наветренной части траектории. Это связано с тем, что на лопасть, движущуюся по подветренной части траектории, ветровой поток приходит заторможенный на 20–40% (в зависимости от скорости вращения ветроротора), что подтверждается как нашими измерениями, так и данными работы [11].

Однако при всех положительных эффектах, полученных во время испытаний роторов с управляемыми лопастями, отрицательным последствием наличия механизма управления является то, что необходимо ориентировать управляющую дорожку (но не ротор) к направлению действия ветрового потока. Для малых роторов это легко осуществить с помощью флюгера, а для роторов больших размеров (мощностью 50–300 кВт) необходимо предусмотреть отдельный привод поворота дорожки). Отметим, что этот недостаток сразу исчезает там, где поток однозначно ориентирован (реки, морские или приливные течения).

В итоге, применение у роторов с вертикальной осью вращения простого в конструктивном и технологическом плане механизма управления (№ 2) лопастями даст возможность эффективно использовать его при малых (6–8 м/с) скоростях ветра, снизить величину ветровой нагрузки на вал ветроротора, значительно улучшить эффективность ротора. Это позволяет надеяться, что энергоустановки с роторами описанной конструкции будут весьма эффективными при использовании как воздушных, так и водных потоков (речных, морских) в качестве генераторов энергии мощностью 5–10 кВт для индивидуальных хозяйств либо в качестве насосных или энергетических установок мощностью 20–50 кВт для добычи и перекачки нефти или воды.

Таким образом, результаты проведенных исследований указывают на возможность практической реализации способов существенного повышения коэффициента использования кинетической энергии потока ветроротором с контролируемым движением лопастей. Дальнейшее совершенствование ветроротора возможно на основе оптимизации его конструкции по более комплексному критерию, включающему не только эффективность преобразова-

ния энергии, но и контроль динамической уравновешенности, улучшение износостойкости и долговечности механизма управления. Это может быть важно с точки зрения длительной и надежной работы ветроустановки.

## Цитированная литература

1. *Avallone E. A., Baumeister T., Sadegh A. M.* Marks standard handbook for mechanical engineers. – New York: McGraw Hill, 2006. – 685 p.
2. *Дзензерский В. А., Тарасов С. В., Костюков И. Ю.* Ветроустановки малой мощности. – Киев: Наук. думка, 2011. – 590 с.
3. *Довгий С. А., Каян В. П., Кочин В. А., Лебедь А. Г.* Исследование влияния активного управления прямыми лопастями на рабочие характеристики ветроротора Дарье // Прикл. гидромех. – 2010. – **12**, № 3. – С. 12–23.
4. *Kayan V.* Darrieus turbine with controlled blades: the perspective converter of hydrokinetic energy // Open J. Renewable Energy and Sustainable Development. – 2014. – **1**, № 2. – P. 9–23.
5. *Sheldahl R. E., Klimas P. C.* Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines // Tech. rep. SAND 80–2114. – Sandia National Labs., Albuquerque, N M, USA, 1981. – 120 p.
6. *Пат. 84319С* Україна, МПК F03D 3/00, F03D 7/06. Вітросилова установка / В. В. Гребенников, В. П. Каян, С. О. Довгий, В. А. Кочин. – Опубл. 17.07.2008. – Бюл. № 19.
7. *Каян В. П., Лебедь А. Г.* Оптимизация рабочих характеристик полномасштабного макета ветроротора Дарье с прямыми управляемыми лопастями // Прикл. гидромех. – 2010. – **12**, № 4. – С. 26–35.
8. *Каян В. П., Лебедь А. Г., Чмовж В. В.* Оптимизация рабочих характеристик ветроротора Дарье с прямыми лопастями // Відновлювальна енергетика. – 2011. – № 1. – С. 43–54.
9. *Fiedler A. J., Tullis S.* Blade offset and pitch effects on a high solidity vertical axis wind turbine // Wind Engineering. – 2009. – **33**, No 3. – P. 237–246.
10. *Гребешов Э. П., Коврижных Л. Д.* Пропульсивные характеристики крыла-двигателя, работающего вблизи экранирующих поверхностей // Тр. ЦАГИ. – 1983. – Вып. 2211. – С. 6–20.
11. *Horiuchi K., Ushiyama I., Seki K.* Straight wing vertical axis wind turbines: A flow analysis // Wind Engineering. – 2005. – **29**, No 3. – P. 243–252.

## References

1. *Avallone E. A., Baumeister T., Sadegh A. M.* Marks standard handbook for mechanical engineers, New York: McGraw Hill, 2006.
2. *Dzenzerski V. A., Tarasov S. V., Kostjukov I. Ju.* Wind power plants with small capacity, Kiev: Naukova dumka, 2011 (in Russian).
3. *Dovgy S. A., Kayan V. P., Kochin V. A., Lebid A. G.* Appl. hydromech., 2010, **12**, No 3: 12–23 (in Russian).
4. *Kayan V.* Open J. of Renewable Energy and Sustainable Development, 2014, **1**, № 2: 9–23.
5. *Sheldahl R. E., Klimas P. C.* Tech. rep. SAND 80–2114, Sandia National Labs., Albuquerque, N M, USA, 1981. – 120 p.
6. *Patent 84319C of Ukraine, МПК F03D 3/00, F03D 7/06.* Wind power plant, V. V. Grebenikov, V. P. Kayan, S. O. Dovgy, V. A. Kochin, Publ. 17.07.2008. – Bul. No 19. – (in Ukrainian).
7. *Kayan V. P., Lebid A. G.* Appl. Hydromech., 2010, **12**, No 4: 26–35 (in Russian).
8. *Kayan V. P., Lebid A. G., Chmovidg V. V.* Renewable energy, 2011, № 1: 43–54 (in Russian).
9. *Fiedler A. J., Tullis S.* Wind Engineering, 2009, **33**, No 3: 237–246.
10. *Grebeshov E. P., Kovridjnyh L. D.* TsAGI Reports, 1983, Iss. 2211: 6–20 (in Russian).
11. *Horiuchi K., Ushiyama I., Seki K.* Wind Engineering, 2005, **29**, No 3: 243–252.

Академік НАН України В. Т. Грінченко, В. П. Каян

## Оптимізація характеристик вітроротора Дар'є з прямими керованими лопатями

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

*Наведено результати досліджень можливості підвищення ефективності використання енергії вітру й поліпшення динамічних характеристик вітроротора Дар'є з прямими лопатями. Основна ідея роботи полягає в тому, щоб шляхом регулювання орієнтації лопатей ротора щодо потоку, що набігає, оптимізувати величину крутного моменту на валу ротора. Чисельне розв'язання двовимірної задачі аеродинаміки дозволило одержати вихідні дані для розробки механізму регулювання положення лопатей. Можливість практичної реалізації підтверджена широкими експериментальними дослідженнями на декількох моделях вітроротора. Показано здатність ротора з керованими лопатями самозапущатися при досить низьких швидкостях вітрового потоку, а також значне збільшення коефіцієнтів використання енергії потоку й крутного моменту на валу вітроротора порівняно з аналогічним ротором з жорстко фіксованими лопатями.*

**Ключові слова:** ротор Дар'є, керування лопатями, ефективність.

Academician of the NAS of Ukraine V. T. Grinchenko, V. P. Kayan

## Performance optimization of a Darrieus wind turbine with straight controlled blades

Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Kiev

*The possibility of increasing the energy efficiency of a Darrieus wind turbine with straight blades is considered. The basic idea is, by controlling the orientation of the blades relative to the oncoming flow, to optimize the magnitude of torque on the rotor shaft. The numerical solution of the two-dimensional problem of aerodynamics allowed us to obtain basic data for developing a mechanism for adjusting the position of the blades. The possibility of a practical realization is confirmed by the extensive experimental studies on several wind turbine models. The wind turbine with controlled blades is self-starting at a rather low speed of wind. The energy efficiency of such turbine is one and a half time higher than that of a turbine with fixed blades.*

**Keywords:** Darrieus turbine, blades control, efficiency.