

УДК 621.548.5

# ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОАЭРОДИНАМИКИ МОДЕЛЕЙ ВЕТРОРОТОРА С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

С. А. ДОВГИЙ, В. П. КАЯН

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 11.12.03

Приведены результаты исследований по определению влияния периодического изменения угла установки лопасти в течении одного оборота ветрогенератора с вертикальной осью вращения (типа Дарье) на мощностные и моментные характеристики ветрогенератора, а также на его способность к самозапуску. Исследования проводились путем модельного эксперимента в гидротрубе при скоростях потока воды 0,3 – 0,7 м/с. Механизм управления положением лопастей во время вращения модели ротора позволял изменять углы установки лопасти от  $-14^\circ$  до  $+25^\circ$ . Показана способность ротора с колеблющимися лопастями самозапускаться при очень низких скоростях набегающего потока, а также значительное увеличение рабочего момента на валу по сравнению с ротором с жестко закрепленными лопастями.

Наведені результати досліджень впливу періодичної зміни кута встановлення лопаті під час одного обороту вітрогенератора з вертикальною віссю обертання (типу Дар'є) на характеристики потужності та моменту, що виробляє вітрогенератор, а також на його спроможність до самозапуску. Дослідження проводились шляхом модельного експерименту у гидротрубі при швидкостях потоку води 0,3 – 0,7 м/с. Механізм управління позицією лопатей під час обертання моделі ротору дозволяв змінювати кути позиціонування лопаті від  $-14^\circ$  до  $+25^\circ$ . Показана спроможність ротора з лопатями, що коливаються, самозапускатися при дуже малих швидкостях потоку, що обтікає ротор, а також значне зростання величини робочого моменту на валу у порівнянні з ротором, у якого лопаті закріплені жорстко.

The outcomes of researches on definition of influence of a periodic angular variation of the installation of a blade are reduced during one turnover of vertical axis wind turbines (such as Darье rotor) on power and moment performance of wind turbines, and also on its ability in self-start-up. The researches were conducted by modelling experiment in a hydrotray at flow velocities of water 0,3 - 0,7 m/s. The gear of a positional control of blades during rotation of model of a curl allowed to change angles of the installation of a blade from  $-14^\circ$  up to  $+25^\circ$ . The ability of a rotor with vacillating blades to self-start is shown at very low rates of a ram airflow. Significant increase of the working moment is shown the shaft in comparison with a wind turbines with hard-mounted blades.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из неисчерпаемых источников энергии на Земле является ветер. Проведенные во многих странах исследования показали, что современные ветроэнергетические установки могут быть эффективно использованы в регионах со среднегодовой скоростью ветра, превышающей 4 - 5 м/с. Однако наиболее массовые на сегодня ветроустановки с горизонтальной осью вращения ветродвигателя (пропеллерного типа) в связи с ограничениями, накладываемыми размерами лопастей (по оценкам конструкторов на сегодняшний день их длина не должна превышать 60 м), не могут по мощности превзойти цифру в 5 – 7 МВт, что, в свою очередь, ограничивает возможности снижения стоимости кВт-часа до конкурентноспособной величины.

Ветроустановки с вертикальной осью вращения ветродвигателя (типа ротора Дарье) свободны от таких ограничений и их мощность может достигать, по оценкам экспертов, 8 – 15 МВт. Одним из главных недостатков таких ветрогенераторов является высокая скорость ветрового потока, при которой происходит самозапуск ротора во враще-

ние. В результате проектировщики вынуждены снабжать такие ветроустановки дополнительными устройствами (электродвигателем, ротором Савониуса и др.) для раскрутки ротора и вывода его на рабочий режим.

Низкая скорость самозапуска такого ветрогенератора вызвана тем, что вертикальные лопасти в роторе закреплены относительно горизонтальных траверс жестко и в статическом состоянии не могут создать при обтекании их ветровым потоком средней и малой скорости достаточного момента для приведения ротора во вращение. Если же будет возможность повернуть лопасти у находящегося в неподвижности ротора так, чтобы изменить величину и направление действия возникающей на них аэродинамической силы, то появится возможность самозапуска ротора даже при малых (порядка 4 – 5 м/с) скоростях ветра.

Украина, к сожалению, обладает невысоким энергетическим потенциалом ветра, причем распределена ветровая энергия по территории Украины неравномерно [1]. Известно, что регионы, наиболее благоприятные для промышленного развития ветроэнергетики, характеризуются среднегодовой скоростью ветра более 5.0 - 5.5 м/с на

высоте 10 м и более. Этим условиям в Украине соответствуют только прибрежные районы ряда южных областей, а также Крым и Карпаты. Поэтому разработка новых конструкций ветророторов, которые могли бы эффективно работать при невысоких скоростях ветрового потока, очевидна.

Исследования нестационарных аэродинамических характеристик крыльев, совершающих угловые колебания при одновременном движении их поперек потока (так называемые крыльевые движители бионического типа), показали, что вектор силы тяги такого движителя, кроме проекции, создаваемой крылом нормальной силы, включает в себя еще и подсосывающую силу, появляющуюся из-за конечности толщины профиля крыла (лопасти), причем вклад этой силы в общую создаваемую колеблющимся крылом силу тяги весьма значителен [2]. По некоторым оценкам, управление положением профиля лопасти ротора во время движения его по круговой траектории и оптимизация колебания лопастей может привести к повышению суммарной энергоотдачи таких ветророторов до 20%, а на некоторых режимах работы – и до 50% [3].

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения экспериментальных исследований гидравлических моделей ветророторов в гидрлотке были спроектированы и изготовлены специальная экспериментальная установка и три модели ветроротора (типа Дарье) с прямоугольными лопастями. На гидрлотке была установлена жесткая рама, к которой шарнирно крепили прямоугольную рамку, в которой на горизонтальных поперечинах с возможностью свободного вращения устанавливали концы вертикального вала ротора. К нижней части рамки крепили тензобалку для измерения гидродинамического сопротивления модели ротора. Модель ротора состояла из двух параллельных друг другу дисковых траверс, соединяющего их вала и лопастей, продольные оси которых были параллельны валу. Геометрические размеры моделей представлены в таблице:

Ротор $N$	Диаметр установки лопастей [м]	Длина лопасти [м]	Удлинение лопасти (крыла)	Количество лопастей
1	0,350	0,30	6	2 – 4
2	0,175	0,30	6	2 – 4
3	0,175	0,15	3	3 – 4

Верхний конец вертикального вала соединялся с гибким валом, свободный конец которого с калиброванной катушкой крепили на боковой стенке лотка горизонтально. На катушку при вращении ротора наматывалась нитка, на конце которой крепился поднимающийся груз (таким образом измеряли рабочий момент на валу модели ветроротора). На верхней траверсе ротора равномерно по окружности было установлено 10 высокоэрцевитивных магнитов, а на верхней поперечине рамки закреплено устройство для измерения частоты вращения ротора. Перед моделью ротора в воде устанавливали датчик скорости потока так, чтобы он наименее влиял на обтекание модели потоком. Скорость потока в рабочем сечении гидрлотка изменялась от 0.3 до 0.7 м/с.

Проводились исследования гидроаэродинамики моделей ветроротора как с традиционной схемой установки лопастей (лопасти крепились к траверсам жестко, угол установки хорды профиля лопасти к касательной к окружности вращения равнялся  $+4^\circ$ ) [4], так и с механизмом изменения в течение одного оборота ротора угла установки лопасти относительно касательной к окружности вращения. В последнем случае под нижней дисковой траверсой дополнительно устанавливался диск с круговой канавкой, центр которой имел некоторый эксцентриситет  $\varepsilon$  относительно оси вала ротора (в этой серии экспериментов эксцентриситет был неизменен и равен  $0.7 \cdot 10^{-2}$  м, а соотношение  $\varepsilon/R = 0,08$ ). Диск крепился жестко к нижней поперечине рамки так, что линия, соединяющая центр вращения ротора и центр круговой канавки, была параллельна направлению потока, причем центр вращения ротора располагался впереди центра круговой канавки (относительно набегающего потока). Лопасти на нижнем торце имели две оси (длина хорды лопасти  $b = 5 \cdot 10^{-2}$  м, толщина симметричного профиля  $NACA-0015$   $c = 0.75 \cdot 10^{-2}$  м, расстояние между осями  $= 0.36 b$ ), причем передняя ось устанавливалась шарнирно на нижней траверсе, а задняя – проходила свободно сквозь щель в нижней траверсе и имела на конце шарикоподшипник, который размещался в канавке нижнего диска. Этот механизм обеспечивал угловое колебание лопасти и в течении одного оборота ротора угол установки лопасти изменялся от  $-14$  до  $+25$  градусов [5].

## 2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, во время эксперимента определялись скорость потока  $V_{cp}$  перед ротором, число

оборотов ротора  $n$  и рабочий (нагрузочный) момент на оси ротора  $M$ . С увеличением нагрузочного момента  $M$  на валу ротора (при  $V_{cp} = const$ ) у всех роторов происходило уменьшение величины его угловой скорости вращения  $n$ , но степень этого уменьшения зависела от конструкции ротора (рис. 1 и 2).

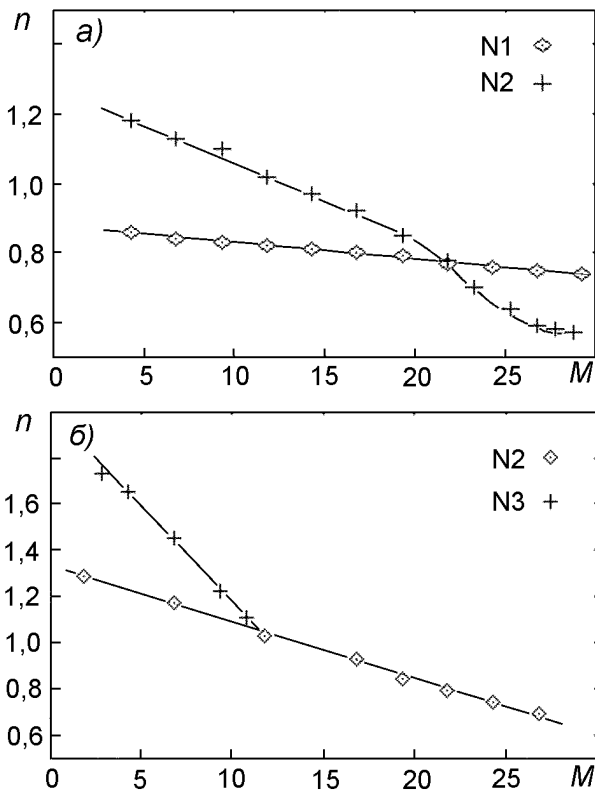


Рис. 1. Зависимости  $n = f(M)$  моделей ветроротора с колеблющимися лопастями: а - 4-х лопастные роторы N1 и N2; б - 3-х лопастные роторы N2 и N3

На рис. 1 показано при средней скорости потока  $V_{cp} = 0,58$  м/с, как влияет на зависимость  $n = f(M)$  изменение вдвое величины радиуса вращения лопастей (а) либо длины лопастей (б). Размерность  $n - [1/с]$ ,  $M - [1 \cdot 10^{-3} \text{ кГм}]$ . В обоих случаях уменьшение одного из характерных размеров ротора ведет к более быстрому снижению скорости вращения ротора  $n$  при последовательном увеличении нагрузочного момента  $M$  на валу.

Следует отметить, что роторы с колеблющимися лопастями при равных скоростях набегающего потока являются более тихоходными, чем аналогичные роторы с жестко закрепленными лопастями (рис. 2), однако они могут развить при той же скорости потока значительно больший рабочий момент  $M$  на валу. Здесь же можно увидеть, что уменьшение количества лопастей у ротора с

колеблющимися лопастями, в частности, у ротора N2 с 4-х до 3-х (рис. 1), ведет, при равных скоростях набегающего потока, к весьма незначительному увеличению скорости вращения ротора (примерно на 8-10%). Причем характер кривой  $n(M)$  практически не меняется, в то время как для такого же ротора с жестко закрепленными лопастями это приводит при небольших нагрузочных моментах к увеличению  $n$  на 15-20%, и кривая зависимости  $n(M)$  при этом более крутая. Уже при  $M = (6...7) \cdot 10^{-3} \text{ кГм}$  кривые зависимостей  $n(M)$  моделей ротора N2 с жестко закрепленными 4-мя и 3-мя лопастями пересекаются и практически сразу же (при  $M = 8 \cdot 10^{-3} \text{ кГм}$ ) ротор с 3-мя лопастями останавливается, а ротор с 4-мя лопастями работает до  $M = 12 \cdot 10^{-3} \text{ кГм}$ .

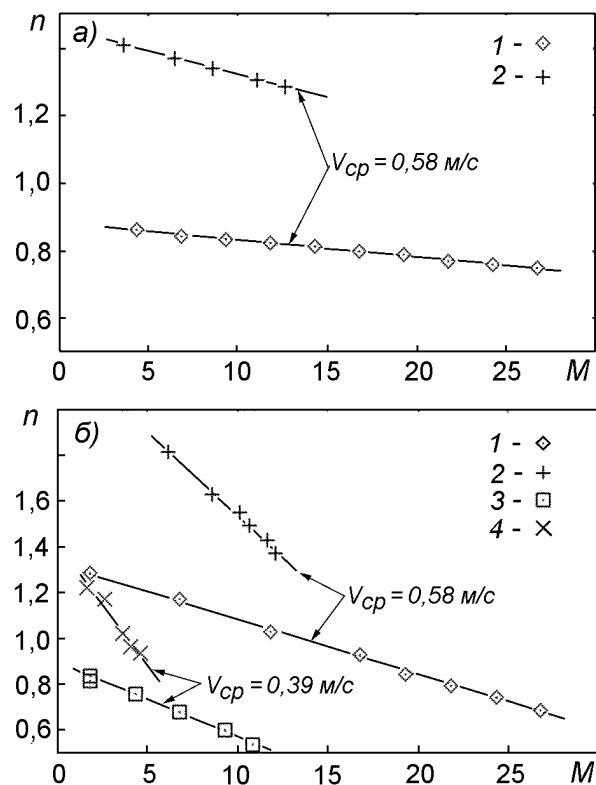


Рис. 2. Влияние способа закрепления лопастей на величину зависимости  $n = f(M)$ : а - 4-х лопастной ротор N1 с колеблющимися (1) и жестко закрепленными (2) лопастями; б) - 3-х лопастной ротор N2 с колеблющимися (1 и 3) и жестко закрепленными (2 и 4) лопастями

Далее по зарегистрированным экспериментально величинам  $V$ ,  $M$  и  $n$  вычисляли такие параметры как коэффициент быстроходности ветроротора  $Z = \omega R/V$ , развиваемую ротором полезную мощность  $P = M\omega$ , площадь гидродинамического сечения ротора  $S = 2Rh$  ( $h$ -длина лопасти)

и коэффициенты использования мощности потока  $C_p = 2P/\rho V^3 S$  (где  $\rho$  – плотность воды) и крутящего момента  $C_m = C_p/Z$ .

Влияние изменения величины скорости набегающего на ротор потока  $V_{cp}$  и количества лопастей у самой большой модели ротора с колеблющимися лопастями на величину коэффициента использования мощности потока  $C_p$  представлено на рис. 3.

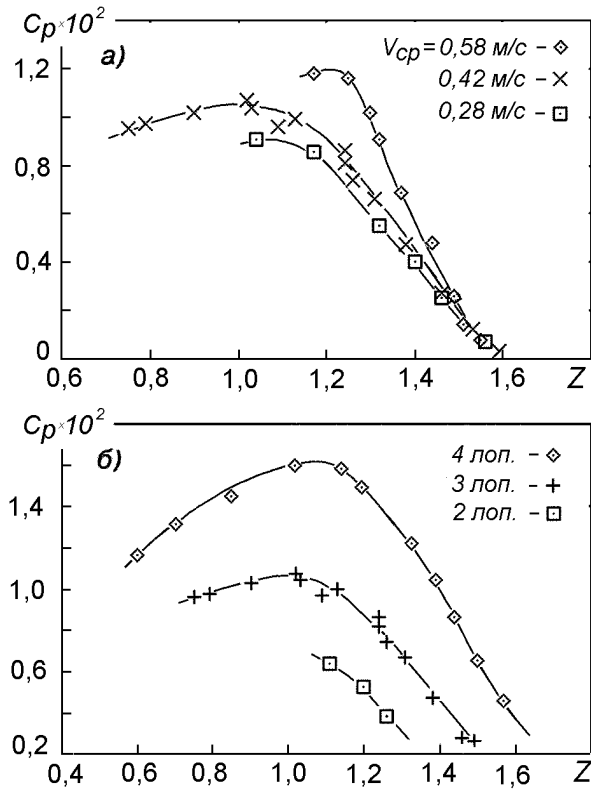


Рис. 3. Влияние скорости потока (а) и количества лопастей (б) на величину зависимости  $C_p = f(Z)$  модели ветроротора N1 с колеблющимися лопастями.

У всех моделей ветроротора с увеличением скорости потока в гидротлке наблюдалось возрастание величин коэффициентов  $C_p$  и  $C_m$  (рис. 3, а) причем у больших моделей (N1 и N2) этот прирост выражен более явно. Это, по-видимому, было связано с условиями эксперимента, так как рабочее сечение гидротлка, в котором находилась модель, по площади было соизмеримо с площадью гидродинамического сечения модели ротора ( $B \times H = 0,61 \times 0,58$  м,  $S_{раб.сеч.} = 0,355$  м<sup>2</sup>,  $S_{N1} = 0,105$  м<sup>2</sup>).

Зависимость  $C_p(Z)$  для ротора N1 с 2-мя, 3-мя и 4-мя лопастями при средней скорости потока  $V_{cp} = 0,42$  м/с представлена на рис. 3, б. Оказалось, что взаимное расположение кривых  $C_p(Z)$  роторов с различным числом лопастей на графиче

ке в корне отличается от взаимного расположения таких кривых для ротора с жестко закрепленными лопастями. У традиционных роторов увеличение числа лопастей приводит к сдвигу правой части куполообразной кривой влево (т. е. снижает быстроходность колеса), у ротора с перекладкой крыла все наоборот. Наиболее быстроходным является как раз ротор с 4-мя лопастями, на нем же и достигается наибольшая величина как коэффициента использования энергии потока  $C_p$ , так и коэффициента крутящего момента  $C_m$ . Сравнение полученных величин коэффициентов  $C_p$  и  $C_m$  для роторов с жестко закрепленными лопастями и для аналогичных роторов с колеблющимися лопастями представлено на рис. 4 и 5.

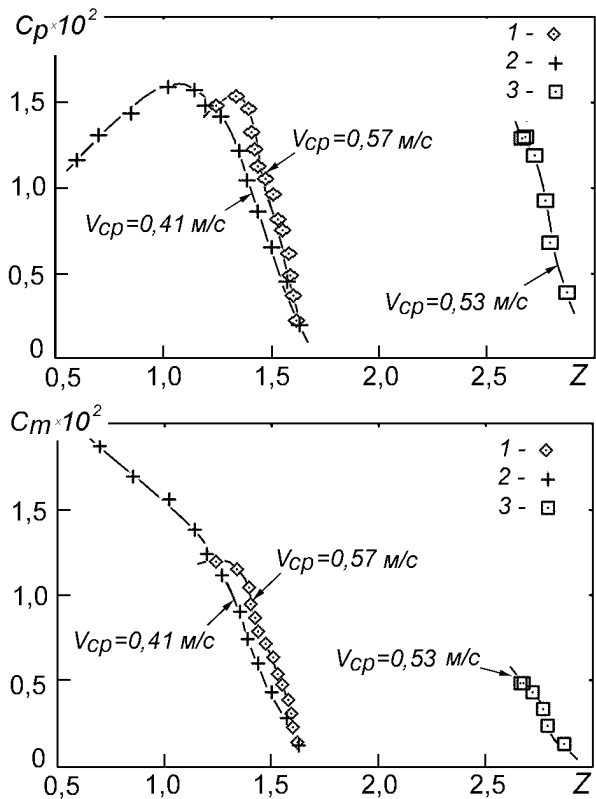


Рис. 4. Зависимости мощностных и моментных характеристик  $C_p = f(Z)$  и  $C_m = f(Z)$  модели 4-х лопастного ветроротора N1 с колеблющимися (1-2) и жестко закрепленными (3) лопастями

Главным отличием роторов с колеблющимися лопастями оказалось то, что на всех скоростях потока в гидротлке, при которых проводились исследования, роторы самозапускались, в то время как роторы с жестко закрепленными лопастями приходилось раскручивать, т. е. прикладывать к валу ротора определенный момент  $M$ , и только после этого ротор начинал вращаться с постоянной угловой скоростью. Так, для модели ротора

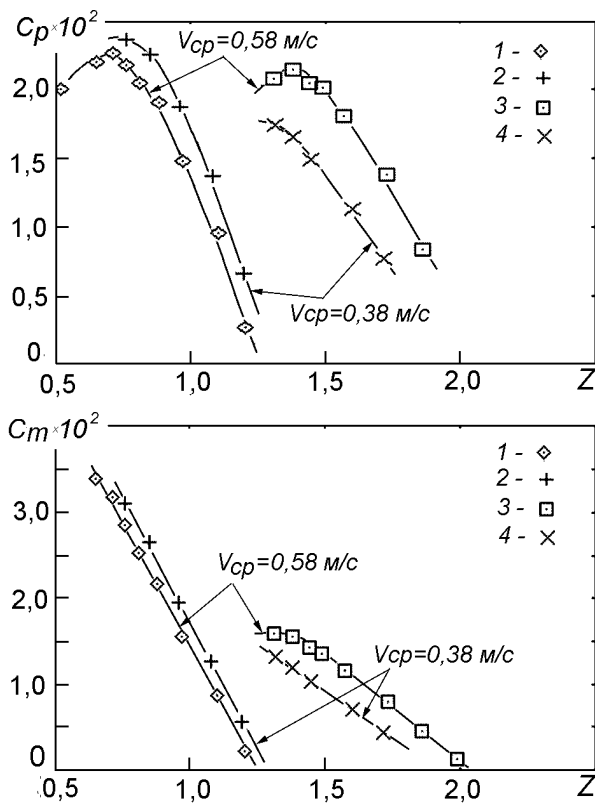


Рис. 5. Зависимости мощностных и моментных характеристик  $C_p = f(Z)$  и  $C_m = f(Z)$  модели 3-х лопастного ветрогенератора N2 с колеблющимися (1-2) и жестко закрепленными (3-4) лопастями

N1 при  $V_{cp} = 0,53$  м/с потребовалось приложить  $M = 8,5 \cdot 10^{-3}$  кгГм, а максимальный полезный момент, который был получен затем на валу модели, составлял лишь 12,6 кгГм.

Кроме того, роторы с колеблющимися лопастями оказались менее скоростными (обнаружено, что при равных условиях эксперимента коэффициент быстроходности  $Z$  у них в 1,5 – 2 раза меньше, чем у аналогичных роторов с жестко установленными лопастями). Однако максимальный рабочий момент  $M$ , который развивали эти роторы, оказался в несколько раз больше, чем у роторов с

жестко установленными лопастями, превышение же по величине коэффициента  $C_p$  выражено хоть и явно, но не значительно (рис. 4 и 5).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что коэффициенты  $C_p$  и  $C_m$  вычислялись при плотности набегающего потока  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, что примерно в 750 раз больше, чем плотность воздуха, поэтому неправомерно будет сравнивать полученные в работе результаты с другими известными в литературе экспериментами, проводившимися в воздушной среде. Здесь можно сравнивать только результаты, полученные нами, с точки зрения преимуществ одной схемы над другой, одного ротора над другим. Перспективность применения такого механизма управления колебанием лопастей ветрогенератора подтверждается получением патента Украины [6].

1. Васько П. Ф. Питомі характеристики енергетичного потенціалу вітру на території України // Енергетика і електрифікація. – 1995. – N 2. – С. 48–51.
2. Довгий С. А. Задачи гидроаэродинамики деформируемых и упругих колеблющихся крыльев. Учебное пособие. – К.: Министерство образования Украины, 1997. – 141 с.
3. Малышев Н. А., Лятхер В. М. Ветроэнергетические станции большой мощности // Гидротехническое строительство. – 1983. – N 12. – С. 38–44.
4. Гулий С. В., Еремеев И. Д., Крашаница Ю. А., Усик Ю. Ф., Чмовж В. В. Аэродинамическая оптимизация масштабной модели вертикальноосевого ветродвигателя. Т.1. Вплив вітру на будинки і споруди // Вісник Донбаської ДАБА. – 2001. – N 4(29). – С. 149–153.
5. Пархісенко В. М., Циганюк А. І., Шеховцов О. В. Експериментальні дослідження кінематичних та динамічних характеристик роторних перетворювачів енергії потоків з активною перекладкою лопатей. Т.2. Інженерні питання впливу вітру на споруди // Вісник Донбаської ДАБА. – 1999. – N 99-6. – С. 110–113.
6. Бойко П. М., Глушко В. М., Довгий С. А., Каян В. П., Пархісенко В. М., Циганюк А. І. Ротор вітросилової установки // Патент України, МКІ F03D 7/06. - 2003. - N 58189A. - Опубл. 15.07.03. Бюл. N7.