

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОЭНЕРГОУСТАНОВОК ДЛЯ ПРИВОДА ГРЕБНЫХ ВИНТОВ МАЛОМЕРНЫХ СУДОВ

*Н. Д. Шишкин, Р. А. Ильин*

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Российская Федерация*

Обосновано применение децентрализованных систем энергоснабжения с использованием ветровой энергии в настоящее время. Перечислены положительные качества всех видов вертикально-осевых ветроустановок. Разработана экспериментальная установка для исследования комбинированных вертикально-осевых ветродвигателей (КВОВД) на основе роторов Н-Дарье и Савониуса. Исследования проводились в Лаборатории нетрадиционной энергетики Отдела энергетических проблем Саратовского научного центра Российской академии наук при Астраханском государственном техническом университете в 2018 г. Представлена схема экспериментальной установки для исследования КВОВД. Приведены варианты расположения роторов Н-Дарье и Савониуса в КВОВД на судах-ветроходах: одноярусный трёхлопастной ротор Н-Дарье с расположенным сверху двухъярусным ротором Савониуса и одноярусный трёхлопастной ротор Н-Дарье с расположенным сверху и снизу одноярусными роторами Савониуса. Источником воздушного потока служит мощный промышленный вентилятор, позволяющий достигать средних скоростей воздушного потока до 7,2 м/с. На экспериментальной установке определены основные параметры КВОВД. В результате экспериментов определили, что с увеличением расстояния от 0,45 до 3,0 м средняя скорость воздушного потока уменьшается с 7,2 до 2,7 м/с, то есть в 2,7 раза, что приводит к изменению мощности воздушного потока в 19 раз. С повышением скорости воздушного потока с 2,7 до 7,2 м/с, то есть в 2,7 раза, мощность ротора увеличивалась с 0,60 до 9,91 Вт, то есть в 17 раз. Предложена формула для расчёта мощности КВОВД. Расчёты подтвердили, что при скорости ветра 10 м/с для КВОВД на основе роторов Н-Дарье и Савониуса диаметром 5,0 и 2,0 м его мощность составит 14,6 кВт. Предлагаемые модернизированные КВОВД на основе оптимальных соотношений параметров роторов Н-Дарье и Савониуса с лопастями с закрылками могут быть применены для привода гребных винтов маломерных судов-ветроходов. Применение комбинированного ротора Н-Дарье-Савониуса позволит экономить до 50 % топлива резервной энергетической установки.

**Ключевые слова:** вертикально-осевые ветроэнергоустановки, роторы Н-Дарье, роторы Савониуса, комбинированные ветроэнергоустановки, суда-ветроходы.

**Для цитирования:** Шишкин Н. Д., Ильин Р. А. Экспериментальное исследование параметров вертикально-осевых ветроэнергоустановок для привода гребных винтов маломерных судов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 2. С. 93–100. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-93-100.

### Введение

В настоящее время широкое применение находят децентрализованные системы энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии, в частности ветровой энергии [1–3]. В 1980-х гг. наряду с горизонтально-осевыми ветроэнергоустановками (ГО ВЭУ) начали достаточно широко применять и вертикально-осевые ветроэнергоустановки (ВО ВЭУ) [4–15]. Достоинством всех видов ВО ВЭУ является отсутствие необходимости использовать в их конструкции направляющих механизмов, т. к. работа этих установок не зависит от направления ветра. Особенно важно это для судов, на которых ВО ВЭУ могут быть применены для привода гребных винтов в дополнение к основному двигателю [12–15]. В современных условиях наиболее реалистичным представляется использование ВО ВЭУ на маломерных судах с главными двигателями мощностью менее 55 кВт, вместимостью не более 80 т [16, 17]. Ранее нами были выполнены оценки параметров ВО ВЭУ на основе роторов Н-Дарье, Савониуса и комбинированного ротора Н-Дарье-Савониуса (КРДС) на их основе [17]. Полезная мощность этого ветро-

двигателя при скорости ветра 10 м/с и ометаемой площади комбинированного ротора 80 м<sup>2</sup> составляет 13 кВт. При размещении 2–4 КРДС мощность может достичь 26–52 кВт, а скорость судна-ветрохода – 14 уз. Применение КРДС позволит сэкономить до 50 % топлива резервной энергетической установки на основе двигателя внутреннего сгорания. Поэтому достаточно актуальным представляется уточнить энергетические и геометрические параметры КРДС посредством проведения экспериментальных исследований роторов КРДС на основе усовершенствованных роторов Н-Дарье и Савониуса [18].

*Цель* работы – экспериментальное исследование параметров наиболее эффективных ВО ВЭУ для применения на судах-ветроходах. Задачами работы являются экспериментальное исследование усовершенствованных роторов комбинированных вертикально-осевых ветродвигателей (КВОВД) на основе роторов Н-Дарье и Савониуса, а также определение на их основе основных параметров КВОВД для судов-ветроходов.

### Методика проведения экспериментов

В Лаборатории нетрадиционной энергетики Отдела энергетических проблем Саратовского научного центра РАН при Астраханском государственном техническом университете в 2018 г. была разработана лабораторная установка для экспериментального исследования эффективности роторов Н-Дарье и Савониуса. Экспериментальная установка источником воздушного потока имела трёхскоростной бытовой вентилятор, который направляет свободную струю воздуха, имитирующую ветер, со скоростью от 2,8 до 5,1 м/с на расстоянии от 0,25 до 0,50 м от защитной сетки вентилятора до оси ротора [18].

Схема модернизированной в 2019 г. экспериментальной установки для исследования КВОВД на основе роторов Н-Дарье и Савониуса представлена на рис. 1.

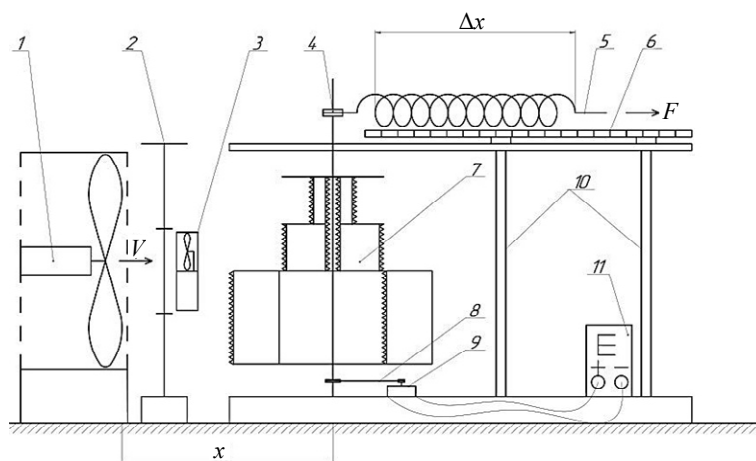


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования КВОВД на основе ротора Н-Дарье и Савониуса: 1 – вентилятор; 2 – корпус вентилятора с сетками; 3 – координатная сетка 5 × 5; 4 – цифровой анемометр; 5 – тормозной шкив; 6 – пружина; 7 – шкала; 8 – КРДС; 9 – мультипликатор; 10 – электрогенератор; 11 – стойки

Источником воздушного потока служил мощный промышленный вентилятор 1, позволяющий достигать скоростей воздушного потока до 9–10 м/с. Координатное устройство 2 в виде рамки с сеткой из толстых синтетических нитей на 3 × 6 ячеек размерами 0,10 × 0,10 м использовалось для определения скорости воздушного потока в шестнадцати точках (центрах ячеек). Средняя скорость воздушного потока  $V$  в каждом из сечений на расстоянии  $x$  от вентилятора определялась с помощью цифрового анемометра 3 с погрешностью не более 0,1 м/с на основе осреднения скоростей потока в восемнадцати точках. За счёт изменения расстояния до оси ротора осуществлялось изменение средней по сечению скорости воздушного потока. Вращающий момент ротора уравнивался моментом силы упругости растягиваемой пружины (динамометра) 5. Левая неподвижная часть была присоединена к синтетической нити, которая проходила по тормозному шкиву 4 и крепилась к неподвижному стержню. Деформация пружины измерялась по шкале 6.

Комбинированный вертикально-осевой ветродвигатель на основе роторов Н-Дарье 7 и Савониуса 8 монтировался на едином валу с тормозным шкивом 4 и шкивом мультипликатора 9. Частота вращения ротора измерялась при помощи электрогенератора 10 постоянного тока с клиноременным мультипликатором 9 с передаточным отношением 7,09 для соответствующего повышения частоты вращения вала электрогенератора. Общий вид экспериментальной лабораторной установки с КВОВД на основе роторов Савониуса и Н-Дарье с лопастями, имеющими закрывки зигзагообразной формы, представлен на рис. 2.

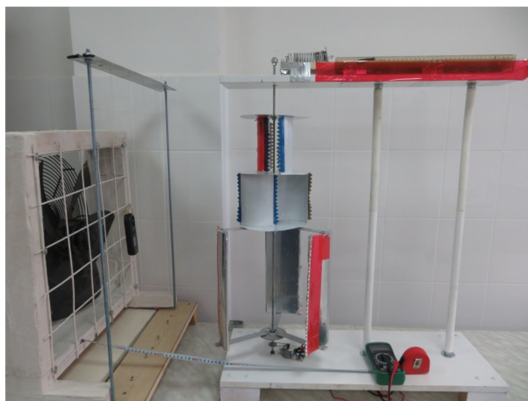


Рис. 2. Общий вид экспериментальной лабораторной установки для исследования КВОВД на основе роторов Савониуса и Н-Дарье, имеющих лопасти с закрывками

Осевой промышленный вентилятор с диаметром рабочего колеса 0,45 м заключен в квадратный кожух с предохранительной сеткой. Ротор Савониуса оптимальной геометрии имеет диаметр  $D_{pc} = 0,185$  м, четыре полуцилиндрические лопасти с углом раскрытия  $\theta = 135^\circ$ , диаметром  $D_l = 0,100$  м. Лопасти высотой  $H_{pc} = 0,140$  м прикрепляются к общему валу КВОВД с резьбой диаметром  $D = 6$  мм с помощью горизонтальных дисков диаметром  $D = 0,246$  м, гаек и шайб. Лопасти включают передние и задние образующие с треугольными элементами (закривками) высотой 0,010 м. Ротор Н-Дарье диаметром  $D_{pd} = 0,550$  м имеет 3 лопасти с шириной профиля  $b_D = 0,100$  м, высотой  $H_{pd} = 0,300$  м и толщиной профиля  $\delta_D = 0,012$  м. Лопасти также включают закрывки с треугольными элементами высотой 0,010 м.

Результаты определения средней скорости воздушного потока и мощности КВОВД (КРДС) приведены на рис. 3.

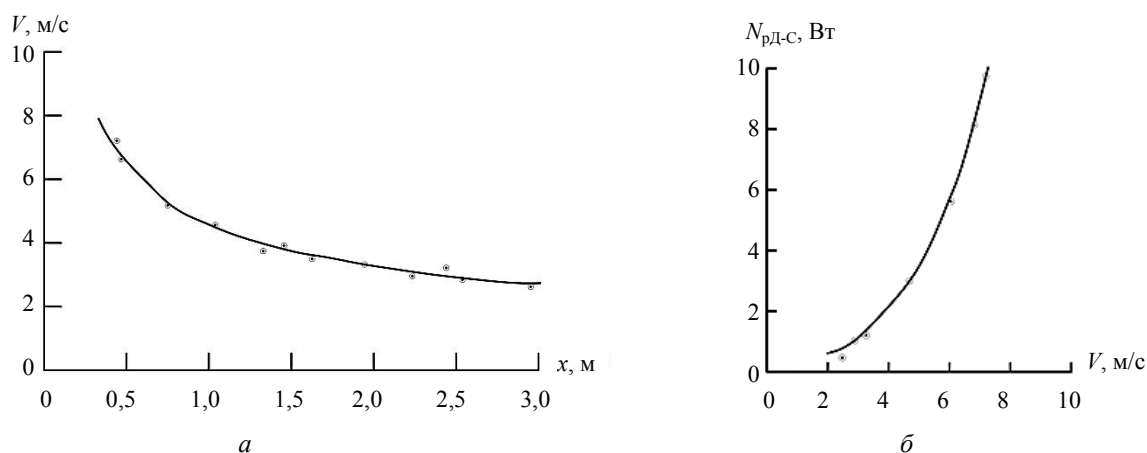


Рис. 3. Основные параметры КВОВД: а – зависимость средней скорости воздушного потока от расстояния от оси КВОВД до корпуса вентилятора; б – зависимость мощности КВОВД от скорости воздушного потока

Согласно рис. 3, а с увеличением расстояния от 0,45 до 3,0 м средняя скорость воздушного потока уменьшается с 7,2 до 2,7 м/с, то есть в 2,7 раза, что приводит к изменению мощности воздушного потока, пропорциональной скорости в третьей степени в 19 раз. Такой диапазон скоростей воздушного потока практически соответствует реальному диапазону изменения скорости ветра на суше и на море, при которой могут эксплуатироваться КВОВД.

Обработка результатов замеров параметров КВОВД, как и ранее в работе [18], проводилась в следующей последовательности. По показаниям цифрового вольтметра, измеряющего электродвижущую силу электрогенератора  $E$ , определялась частота вращения КВОВД, об/мин:

$$n = K_n E,$$

где  $K_n$  – тарировочный коэффициент, об/мин·В.

Полезная мощность, Вт, определялась по формуле

$$P_{\text{рД-С}} = M_{\text{рД-С}} \omega = \frac{1}{60} K_G \Delta x D_S \pi n,$$

где  $M_{\text{рД-С}}$  – вращающий момент ротора, уравниваемый моментом силы упругости растягиваемой пружины (динамометра), Н·м;  $\omega$  – угловая частота вращения ротора,  $\text{с}^{-1}$ ;  $K_G$  – тарировочный коэффициент динамометра, Н/м;  $D_S$  – диаметр шкива для измерения силы упругости, м.

Зависимость мощности экспериментального ротора Н-Дарье-Савониуса от скорости воздушного потока приведена на рис. 3, б. С повышением скорости воздушного потока с 2,7 до 7,2 м/с, то есть в 2,7 раза, мощность ротора увеличивалась с 0,60 до 9,91 Вт, то есть в 17 раз. Несколько меньшая степень повышения полезной мощности ротора Н-Дарье-Савониуса с повышением скорости воздушного потока, по сравнению со степенью повышения затраченной мощности воздушного потока от скорости, объясняется снижением коэффициента мощности (энергетического КПД) при высоких скоростях. При малых скоростях воздушного потока ротор Савониуса способствует страгиванию и раскрутке комбинированного ротора, а при больших скоростях ветра начинает тормозить ротор Н-Дарье [11, 12]. Вопрос об оптимизации соотношения геометрических параметров ротора Н-Дарье и Савониуса в составе комбинированного ротора требует дальнейших исследований.

#### Определение основных параметров КВОВД для судов-ветроходов

Возможно использование множества вариантов расположения роторов Н-Дарье и Савониуса в КВОВД на судах-ветроходах, два из которых представлены на рис. 4.

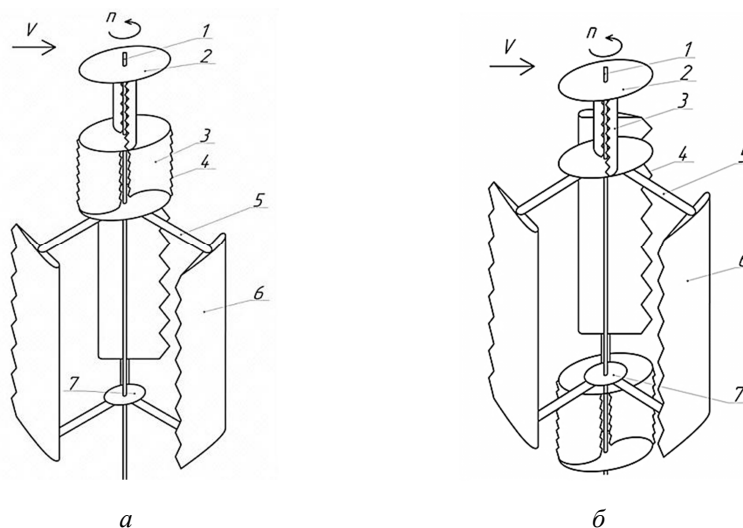


Рис. 4. Варианты расположения роторов Н-Дарье и Савониуса в КВОВД:

- а – одноярусный трёхлопастной ротор Н-Дарье с расположенным сверху двухъярусным ротором Савониуса; б – одноярусный трёхлопастной ротор Н-Дарье с расположенными сверху и снизу одноярусными роторами Савониуса; 1 – вал; 2 – диск ротора Савониуса;
- 3 – полуцилиндрическая лопасть ротора Савониуса; 4 – зигзагообразный закрылок лопасти;
- 5 – траверса ротора Н-Дарье; 6 – лопасть ротора Н-Дарье крылового профиля;
- 7 – диск для крепления траверса ротора Н-Дарье

В первом варианте (рис. 4, а) двухъярусный ротор Савониуса расположен сверху, над одноярусным трёхлопастным ротором Н-Дарье. Во втором варианте (рис. 4, б) одноярусные роторы Савониуса расположены сверху и снизу одноярусного трёхлопастного ротора Н-Дарье, при этом лопасти ротора Савониуса ориентированы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Возможны и другие варианты взаимного расположения роторов Н-Дарье и Савониуса в КВОВД, с другим количеством лопастей и ярусов в роторах Н-Дарье и Савониуса. Вопрос о предпочтении той или иной конструкции требует дальнейших, более детальных исследований.

На основе принципа суперпозиции лопастей роторов Н-Дарье и Савониуса мощность КРДС может быть определена по предлагаемой нами формуле:

$$P_{\text{рд-с}} = \frac{1}{2} \rho V^3 \eta_a (n_{\text{сд}} C_{P\text{рд}} D_{\text{рд}} H_{\text{рд}} + n_{\text{сс}} C_{P\text{рс}} D_{\text{рс}} H_{\text{рс}}), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_a$  – коэффициент, учитывающий снижение эффективности комбинированного ротора по сравнению с ротором Н-Дарье (в первом приближении можно принять  $\eta_a = 0,80$ );  $n_{\text{сд}}$ ,  $n_{\text{сс}}$  – количество ступеней ротора Н-Дарье и Савониуса;  $C_{P\text{рд}}$ ,  $C_{P\text{рс}}$  – коэффициенты мощности ротора Н-Дарье и Савониуса.

Расчёты по формуле (1) подтверждают, что при скорости ветра  $V = 10$  м/с для КРДС на основе двухъярусных роторов Н-Дарье и Савониуса ( $n_{\text{сд}} = 2$ ;  $n_{\text{сс}} = 2$ ), диаметрах роторов Н-Дарье и Савониуса  $D_{\text{рд}} = 5,0$ ;  $D_{\text{рс}} = 2,0$  м и высотах роторов Н-Дарье и Савониуса  $H_{\text{рд}} = 5,0$ ;  $H_{\text{рс}} = 3,0$  м мощность одного КВОВД составит 14,6 кВт. В дальнейшем будут более детально исследованы параметры КВОВД и, в частности, уточнены значения параметра  $\eta_a$  в зависимости от скорости ветра и соотношения основных размеров роторов Н-Дарье и Савониуса.

Предлагаемые нами модернизированные КВОВД на основе оптимальных соотношений параметров роторов Н-Дарье и Савониуса с лопастями с закрылками могут быть применены для энергоснабжения речных и морских судов, а также для привода гребных винтов маломерных судов-ветроходов.

### Выводы

1. Разработана экспериментальная установка для исследования КВОВД на основе роторов Н-Дарье и Савониуса. Источником воздушного потока послужил мощный промышленный вентилятор, позволяющий достичь средних скоростей воздушного потока до 7,2 м/с. Координатное устройство в виде рамки с сеткой из толстых синтетических нитей использовалось для определения скорости воздушного потока с помощью цифрового анемометра в восемнадцати точках. Вращающий момент ротора уравнивался моментом силы упругости динамометра. На этой установке были определены основные параметры КВОВД.

2. Эксперименты доказали, что с увеличением расстояния от 0,45 до 3,0 м средняя скорость воздушного потока уменьшается с 7,2 до 2,7 м/с, то есть в 2,7 раза, что приводит к изменению мощности воздушного потока в 19 раз. С повышением скорости воздушного потока с 2,7 до 7,2 м/с, то есть в 2,7 раза, мощность ротора увеличивалась с 0,60 до 9,91 Вт, то есть в 17 раз. Несколько меньшая степень повышения полезной мощности ротора Н-Дарье-Савониуса с повышением скорости воздушного потока объясняется снижением коэффициента мощности при высоких скоростях. При малых скоростях воздушного потока ротор Савониуса способствует страгиванию и раскрутке комбинированного ротора, а при больших скоростях ветра начинает тормозить ротор Н-Дарье.

3. На основе принципа суперпозиции роторов Н-Дарье и Савониуса предложена формула для расчёта мощности КВОВД. Расчёты подтвердили, что при скорости ветра  $V = 10$  м/с для КВОВД на основе двухъярусных роторов Н-Дарье и Савониуса, при диаметрах роторов Н-Дарье и Савониуса  $D_{\text{рд}} = 5,0$  и  $D_{\text{рс}} = 2,0$  м и высотах роторов Н-Дарье и Савониуса  $H_{\text{рд}} = 5,0$  и  $H_{\text{рс}} = 3,0$  м его мощность составит 14,6 кВт. Предлагаемые модернизированные КВОВД на основе оптимальных соотношений параметров роторов Н-Дарье и Савониуса с лопастями с закрылками могут быть применены для привода гребных винтов маломерных судов-ветроходов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семкин Б. В., Стальная М. И., Свит П. П. Использование возобновляемых источников энергии в малой энергетике // Теплоэнергетика. 1996. № 2. С. 6–7.

2. Чивенков А. И., Лоскутов А. Б., Михайличенко Е. А. Анализ применения и развития ветроустановок // Пром. энергетика. 2012. № 5. С. 57–63.
3. Шишкин Н. Д., Ильин Р. А. Анализ направлений повышения конкурентоспособности конструкций энергоэффективных ВЭУ различных типов // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2017. № 2 (64). С. 42–50.
4. Ляхтер В. М., Шполянский Ю. Б. Аэродинамика ортогональных ветроагрегатов // Сб. науч. тр. Гидропроекта. 1988. Вып. 129. Ветроэнергетические станции. С. 113–127.
5. Волков Н. И. Аэродинамика ортогональных ветродвигателей: учеб. пособие. Сумы: ВВП «Мрия-1» ЛТД, 1996. 198 с.
6. Горелов Д. Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 3. С. 325–333.
7. Горелов Д. Н. Проблемы аэродинамики ветроколеса Дарье // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10. № 1. С. 47–51.
8. Горелов Д. Н. Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения. Омск: Полиграф. центр КАН, 2012. 68 с.
9. Транспортные суда могут использовать энергию ветра и солнца для экономии топлива. URL: [https://rodovid.me/ecotransport/transportnye\\_sudna\\_s\\_parusami.html](https://rodovid.me/ecotransport/transportnye_sudna_s_parusami.html) (дата обращения: 08.05.2018).
10. Роторные ветроходы становятся реальностью. URL: [http://www.barque.ru/shipbuilding/1983/rotary\\_wind\\_walker\\_becomes\\_reality](http://www.barque.ru/shipbuilding/1983/rotary_wind_walker_becomes_reality) (дата обращения: 10.05.2018).
11. Ветровая установка на корабле. URL: <https://alternativenergy.ru/vetroenergetika/98-vetryak-nasudne.html> (дата обращения: 17.05.2018).
12. Шишкин Н. Д., Ильин Р. А. Анализ аэродинамических параметров и энергетической эффективности вертикально осевых ветродвигателей // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2018. № 1 (65). С. 76–84.
13. Шишкин Н. Д., Терентьев И. С. Оценка основных параметров комбинированных вертикально-осевых установок для судов и нефтедобывающих платформ // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2015. № 2. С. 56–63.
14. Шишкин Н. Д., Ильин Р. А. Оценка параметров вертикально-осевых ветродвигателей для энергоустановок маломерных судов // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 3. С. 93–100.
15. Shishkin N. D., Ilyin R. A. The design, estimation of the parameters of the vertical-axial wind-mill electric generating unit for the self-generated power supply of the objects // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. Vol. 1111. P. 012055.
16. Shishkin N. D., Ilyin R. A. Savonius rotors research for the self-generated power supply by land, by sea // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. Vol. 1111. P. 012056.
17. Shishkin N., Ilyin R. Experimental determination of the energy efficiency of rotors of vertical-axis wind turbines for autonomous power supply on land and at sea // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018) (Saint-Petersburg, November 19-20, 2018). MATEC Web of Conferences. Vol. 245. P. 06016. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824506016>.
18. Шишкин Н. Д., Ильин Р. А. Разработка и оценка параметров комбинированной ветроэнергетической установки на основе роторов Н-Дарье и Савониуса // Пром. теплоэнергетика. 2018. № 8. С. 51–56.

Статья поступила в редакцию 05.03.2019

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Шишкин Николай Дмитриевич** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; зав. лабораторией нетрадиционной энергетики Саратовского научного центра РАН при АГТУ; n.shishkin-53@mail.ru.

**Ильин Роман Альбертович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; старший научный сотрудник лаборатории нетрадиционной энергетики Саратовского научного центра РАН при АГТУ; kaften.astu@mail.ru.



## EXPERIMENTAL STUDY OF PARAMETERS OF VERTICAL-AXIAL WIND-POWER PLANTS FOR PROPELLER DRIVES ON SMALL SHIPS

*N. D. Shishkin, R. A. Ilyin*

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russian Federation*

**Abstract.** The article gives arguments in favor of using decentralized power supply systems operating on wind energy. The positive qualities of all types of vertical-axial wind turbines have been listed. An experimental unit has been developed for the investigation of combined vertical-axial wind turbines (CVAWTs) on the basis of H-rotors of Darrieus and Savonius. The studies were held in the laboratory of non-conventional energy of the department of energy problems under the Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences at Astrakhan State Technical University in 2018. The experimental unit diagram has been presented for studying CVAWTs. Variants of arrangement of H-rotors of Darrieus and Savonius in CVAWTs on board wind walkers have been presented: a single-storied three-bladed Darrieus H-rotor with two-storied Savonius rotor overhead; a single-storied three-bladed Darrieus H-rotor with single-storied Savonius rotors on the top and bottom of it. The source of the air flow is a powerful industrial fan which reaches average speeds of air flow up to 7.2 m/s. On the experimental unit there have been determined the CVAWT main parameters. The experimental results have shown that with increasing distance from 0.45 m to 3.0 m, the average speed of the air flow decreases from 7.2 m/s to 2.7 m/s, i.e. by 2.7 times, which leads to a change in the air flow strength by 19 times. With increasing the rate of the air flow from 2.7 to 7.2 m/s, i.e. by 2.7 times the rotor power increased from 0.60 to 9.91 W, i.e. by 17 times. For calculating CVAWT power there has been proposed a formula. Calculations proved that at a wind speed of 10 m/s for CVAWT based on the H-rotors of Darrieus and Savonius with a diameter of 5.0 m and 2.0 m, its capacity makes 14.6 kW. The proposed upgraded CVAWT are based on the optimal ratios of the parameters of H-rotors of Darrieus and Savonius with blades with flaps can be used on the propeller drives of small-sized wind-walkers. The use of the combined H-rotors of Darrieus and Savonius saves up to 50% fuel of the backup power plant.

**Key words:** vertical axial wind power plants, Darrieus H-rotors, Savonius rotors, combined vertical-axial wind turbines, wind-walkers.

**For citation:** Shishkin N. D., Ilyin R. A. Experimental study of parameters of vertical-axial wind-power plants for propeller drives on small ships. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019;2:93-100. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-93-100.

### REFERENCES

1. Semkin B. V., Stal'naia M. I., Svit P. P. Ispol'zovanie vozobnovliaemykh istochnikov energii v maloi energetike [Using renewable energy resources in low energy production]. *Teploenergetika*, 1996, no. 2, pp. 6-7.
2. Chivenkov A. I., Loskutov A. B., Mikhailichenko E. A. Analiz primeneniia i razvitiia vetroustanovok [Analysis of use and development of wind turbines]. *Promyshlennaia energetika*, 2012, no. 5, pp. 57-63.
3. Shishkin N. D., Il'in R. A. Analiz napravlenii povysheniia konkurentosposobnosti konstruksii energo-effektivnykh VEU razlichnykh tipov [Analysis of ways to improve the competitiveness of designs of energy-efficient wind turbines of various types]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 2 (64), pp. 42-50.
4. Liakhter V. M., Shpolianskii Iu. B. Aerodinamika ortogonal'nykh vetroagregatov [Aerodynamics of orthogonal wind generators]. *Sbornik nauchnykh trudov Gidroproekta*, 1988, iss. 129: Vetroenergeticheskie stantsii, pp. 113-127.
5. Volkov N. I. *Aerodinamika ortogonal'nykh vetrodvigatelei: uchebnoe posobie* [Aerodynamics of orthogonal wind turbines: teaching guide]. Sumy, VVP «Mriia-1» LTD, 1996. 198 p.
6. Gorelov D. N. Energeticheskie kharakteristiki rotora Dar'e (obzor) [Energy characteristics of Darrieus rotor (review)]. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 325-333.
7. Gorelov D. N. Problemy aerodinamiki vetrokolesa Dar'e [Aerodynamic problems of Darrieus wind propeller]. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2003, vol. 10, no. 1, pp. 47-51.
8. Gorelov D. N. *Aerodinamika vetrokoles s vertikal'noi os'iu vrashcheniia* [Aerodynamics of windwheels with a vertical axis of rotation]. Omsk, Poligraficheskii tsentr KAN, 2012. 68 p.

9. *Transportnye suda mogut ispol'zovat' energiiu vetra i solntsa dlia ekonomii topliva* [Transport ships can use wind and solar energy to save fuel.]. Available at: [https://rodovid.me/ecotransport/transportnye\\_sudna\\_s\\_parusami.html](https://rodovid.me/ecotransport/transportnye_sudna_s_parusami.html) (accessed: 08.05.2018).
10. *Rotornye vetrokhody stanoviatsia real'nost'iu* [Rotor wind walkers come true]. Available at: [http://www.barque.ru/shipbuilding/1983/rotary\\_wind\\_walker\\_becomes\\_reality](http://www.barque.ru/shipbuilding/1983/rotary_wind_walker_becomes_reality) (accessed: 10.05.2018).
11. *Vetrovaia ustanovka na korable* [Wind power plant on board a ship]. Available at: <https://alternativenergy.ru/vetroenergetika/98-vetryak-nasudne.html> (accessed: 17.05.2018).
12. Shishkin N. D., Il'in R. A. Analiz aerodinamicheskikh parametrov i energeticheskoi effektivnosti vertikal'no osevykh vetrodvigatelei [Analysis of aerodynamic parameters and energy efficiency of vertical-axial wind turbines]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, no. 1 (65), pp. 76-84.
13. Shishkin N. D., Terent'ev I. S. Otsenka osnovnykh parametrov kombinirovannykh vertikal'no-osevykh ustanovok dlia sudov i nefte dobyvaiushchikh platform [Analysis of main parameters of combined vertical-axial units for ships and oil rigs]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2015, no. 2, pp.56-63.
14. Shishkin N. D., Il'in R. A. Otsenka parametrov vertikal'no-osevykh vetrodvigatelei dlia energoustanovok malomernykh sudov [Estimation of parameters of vertical-axis wind turbines for power plants on small vessels]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2018, no. 3, pp. 93-100.
15. Shishkin N. D., Ilyin R. A. The design, estimation of the parameters of the vertical-axial wind-mill electric generating unit for the self-generated power supply of the objects. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2018. Vol. 1111. P. 012055.
16. Shishkin N. D., Ilyin R. A. Savonius rotors research for the self-generated power supply by land, by sea. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2018. Vol. 1111. P. 012056.
17. Shishkin N., Ilyin R. Experimental determination of the energy efficiency of rotors of vertical-axis wind turbines for autonomous power supply on land and at sea. *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018) (Saint-Petersburg, November 19-20, 2018)*. MATEC Web of Conferences. Vol. 245. P. 06016. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824506016>.
18. Shishkin N. D., Il'in R. A. Razrabotka i otsenka parametrov kombinirovannoi vetro-energeticheskoi ustanovki na osnove rotorov N-Dar'e i Savoniusa [Development and evaluation of parameters of a combined wind power unit using H-rotors of Darrieus and Savonius]. *Promyshlennaia teploenergetika*, 2018, no. 8, pp. 51-56.

The article submitted to the editors 05.03.2019

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Shishkin Nikolay Dmitrievich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Laboratory of Alternative Energy under the Saratov Science Centre of RAS at ASTU; [n.shishkin-53@mail.ru](mailto:n.shishkin-53@mail.ru).

**Ilyin Roman Albertovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Senior Researcher of the Laboratory of Alternative Energy under the Saratov Science Centre of RAS at ASTU; [kaften.astu@mail.ru](mailto:kaften.astu@mail.ru).

