

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ, НЕФТЕХИМИИ И БИОТЕХНОЛОГИИ

PROCESSES AND APPARATUS OF CHEMICAL ENGINEERING, PETROLEUM CHEMISTRY AND BIOTECHNOLOGY

Научная статья
УДК 620.97
<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-4-45-53>
EDN JDZSKY

Ортогональные ветроэнергостановки для нефтегазопромысловых объектов на суше и на море

Николай Дмитриевич Шишкин[✉], Марина Александровна Марышева

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, n.shishkin-53@mail.ru[✉]*

Аннотация. Рассмотрены ветро-солнечные энергоустановки для автономного электроснабжения небольших нефтегазопромысловых объектов мощностью не более 20 кВт, ветроэнергостановок в их составе – 10 кВт с коэффициентом мощности (энергетическим КПД) не более 0,35–0,45. Разработана усовершенствованная конструкция ортогональной ветроэнергостановки на основе комбинированного ротора Н-Дарье-Савониуса. Эксперименты на лабораторной установке показали, что максимальные значения коэффициента мощности достигали 0,60, что гораздо выше, чем у роторов известных видов ветроэнергостановок. Рассчитаны значения коэффициента мощности КРДС при различных геометрических размерах входящих в его состав роторов Н-Дарье и Савониуса. С увеличением скорости ветра до номинального для ветроэнергостановок малой и средней мощности значения 9,0 м/с и диаметре ротора 15,0 м мощность комбинированного ротора достигает практически 60 кВт. Предлагаемые ортогональные ветроэнергостановки с номинальной мощностью до 60 кВт смогут совместно с другими энергоустановками применяться для автономного энергоснабжения на нефтегазопромысловых объектах на суше и на море, а в дальнейшем и на интеллектуальных месторождениях.

Ключевые слова: ветро-солнечные энергоустановки, аксиальные ветроэнергостановки, ортогональные ветроэнергостановки, комбинированный ротор Н-Дарье-Савониуса, коэффициент мощности, энергоэффективность

Для цитирования: Шишкин Н. Д., Марышева М. А. Ортогональные ветроэнергостановки для нефтегазопромысловых объектов на суше и на море // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 4. С. 45–53. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-4-45-53>. EDN JDZSKY.

Original article

Orthogonal wind power plants for oil and gas field facilities on land and offshore

Nikolay D. Shishkin✉, Marina A. Marysheva

Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, n.shishkin-53@mail.ru✉

Abstract. Wind and solar power plants for autonomous power supply of small oil and gas facilities with a capacity of no more than 20 kW, wind power plants in their composition – 10 kW with a power factor (energy efficiency) of no more than 0.35–0.45 are considered. An improved design of an orbital wind power plant based on a combined H-Darrieus-Savonius rotor has been developed. Experiments on the laboratory installation showed that the maximum values of the power factor reached 0.60, which is much higher than that of the rotors of known types of wind turbines. The values of the CRDS power factor are calculated for various geometric dimensions of the N-Darrieus and Savonius rotors included in its composition. With an increase in wind speed to the nominal value of 9.0 m/s for small and medium power wind turbines and a rotor diameter of 15.0 m, the combined rotor power reaches almost 60 kW. The proposed orthogonal wind power plants with a nominal capacity of up to 60 kW will be able to be used together with other power plants for autonomous power supply at oil and gas field facilities on land and at sea, and in the future at intelligent fields.

Keywords: wind-solar power plants, axial wind power plants, orthogonal wind power plants, combined H-Darrieus-Savonius rotor, power factor, energy efficiency

For citation: Shishkin N. D., Marysheva M. A. Orthogonal wind power plants for oil and gas field facilities on land and offshore. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2023;4:45-53. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-4-45-53>. EDN JDZSKY.

Введение

Для электроснабжения нефтегазодобывающих промыслов, в частности в ООО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Газпром нефть» и других инфраструктурах удаленных месторождений на суше и на море, чаще всего применяются электростанции, работающие на природном и попутном газе. Однако стали использоваться и экологически чистые возобновляемые источники энергии (ВИЭ), такие как солнечная, ветровая и др., применяются комбинированные ветро-солнечные электростанции (КВСЭС), т. к. они более надежны и стабильны, чем ветровые или солнечные электростанции в отдельности [1, 2]. Успешно прошли испытания автономные блочно-комплектные энергетические установки серии БКЭУ-ВСМ на базе ветро-солнечных модулей (БКЭУ-ВСМ-ДГА) [3, 4]. Все эти ветро-солнечные энергоустановки используются в основном для автономного электроснабжения небольших линейных объектов малой мощности: площадки электроприводных узлов нефте- и газопроводов, станций электрохимической защиты от коррозии, систем обнаружения утечек и др. Как правило, мощность этих установок составляет не более 20 кВт, а мощность ветроэнергоустановок (ВЭУ) в их составе – 10 кВт, причем их коэффициент мощности (энергетический КПД) не превышает 0,45.

Однако на практике уже в настоящее время возникает потребность в применении более мощных и энергетически эффективных ВЭУ, которые совместно с другими энергоустановками смогли бы

использоваться не только в инфраструктуре на небольших линейных объектах, но и для привода скважинных штанговых, центробежных, винтовых, винтовых штанговых и других установок для добычи нефти. В частности, ими могут быть оборудованы полностью автоматизированные, так называемые интеллектуальные скважины [5, 6]. Поэтому достаточно актуальной представляется разработка более мощных и энергетически эффективных ортогональных ветроэнергоустановок (ОВЭУ) и создание на их основе энергокомплексов с использованием ветро-солнечных энергоустановок для нефтегазопромысловых объектов на суше и на море [7, 8].

Целью работы является разработка и оценка параметров модернизированных ОВЭУ для автономного электроснабжения различных нефтегазопромысловых объектов на суше и на море, анализ существующих ВЭУ в блочных ветро-солнечных модулях, экспериментальное исследование основных параметров модернизированного ортогонального ротора и оценка параметров ОВЭУ для добычи нефти.

Краткая характеристика ВЭУ

В настоящее время наиболее широко применяются горизонтально-осевые или аксиальные ветроэнергоустановки (АВЭУ) на основе роторов пропеллерного типа [7, 8]. Такие АВЭУ стали использоваться и в БКЭУ-ВСМ-ДГА производства ОАО «НИПОМ» в шкафом исполнении (рис. 1) [3, 4].



Рис. 1. БКЭУ-ВСМ-ДГА в шкафном исполнении

Fig. 1. BKEU-VSM-DGA in cabinet design

В последние десятилетия наряду с АВЭУ стали активно развиваться и вертикально-осевые или ОВЭУ [7–10]. Несомненным преимуществом всех многочисленных видов ОВЭУ является отсутствие необходимости использовать в их конструкции направляющие вдоль направления ветра устройства, т. к. работа этих энергоустановок не зависит от направления ветра. ОВЭУ имеются 2 основных типа ветроколеса (ротора): быстроходных типа ротора Дарье и тихоходных типа ротора Савониуса. Быстроходный ротор Дарье с криволинейными или вертикальными лопастями крылового профиля, так называемый ротор Дарье, вращается в основном за счет подъемных аэродинамических сил. В качестве примера на рис. 2 показана ОВЭУ на основе ротора Н-Дарье с вертикальными лопастями крылового профиля в составе БКЭУ-ВСМ-ДГА в блок-контейнере производства ОАО «НИПОМ» [3, 4].



Рис. 2. БКЭУ-ВСМ-ДГА в блок-контейнере

Fig. 2. BKEU-VSM-DGA in a block container

Тихоходные роторы Савониуса с лопастями полуцилиндрической формы работают за счет разности сил лобового сопротивления ветровому потоку воздуха. Преимуществами ОВЭУ с роторами Дарье различных конструкций являются их быстроходность с коэффициентом быстроходности $Z = 4-5$, показывающим соотношение между окружной скоростью ротора и скоростью ветра, а также достаточно высокий коэффициент мощности или энергетический КПД, показывающий соотношение между полезной мощностью ротора и мощностью ветрового потока, который достигает значения $\eta = 0,45$. Недостатком ОВЭУ с роторами Дарье является невозможность самозапуска при малых скоростях ветра, что является преимуществом ротора Савониуса. Недостатками ротора Савониуса являются низкий энергетический КПД, не превышающий величины $\eta = 0,20$, и низкий коэффициент быстроходности, не превышающий $Z < 1$.

Наряду с этими группами ОВЭУ, выпускаемых серийно, имеются комбинированные ортогональные ветроэнергоустановки (КОВЭУ), в которых сочетаются два описанных принципа действия. КОВЭУ типа Маглев с классическим ротором Дарье с криволинейными лопастями и ротора Савониуса гораздо меньшего диаметра с номинальной мощностью от 300 Вт до 3,0 кВт при номинальной скорости ветра $v = 9,0$ м/с уже выпускается серийно в ряде стран, в т. ч. и в России, и достаточно широко используется для энергоснабжения небольших объектов [11]. КОВЭУ типа Маглев в составе автономного энергокомплекса в сочетании с солнечной энергостанцией (СЭС) показана на рис. 3.



Рис. 3. КОВЭУ типа Маглев в сочетании с СЭС

Fig. 3. Maglev-type COVEU in combination with SPS

Однако эти установки имеют коэффициент мощности C_p не более 0,30–0,40, т. е. они также недостаточно эффективны. Поэтому актуальным представляется разработка более энергетически эффективных ОВЭУ, которые могли бы быть использованы для автономного электроснабжения

нефтегазопромысловых объектов как на суше, так и на море. Таким образом, целесообразно в нефтегазопромысловых автономных энергокомплексах использовать разработанные в Лаборатории нетрадиционной энергетики Астраханского государственного технического университета (АГТУ) ОВЭУ на основе модернизированных комбинированных роторов Н-Дарье-Савониуса (КРДС).

Экспериментальные исследования

В Лаборатории нетрадиционной энергетики АГТУ была разработана лабораторная установка для экспериментального исследования эффективности модернизированных КРДС, имеющих лопасти с зигзагообразными закрылками [12, 13]. Общий вид этой лабораторной экспериментальной установки показан на рис. 4.

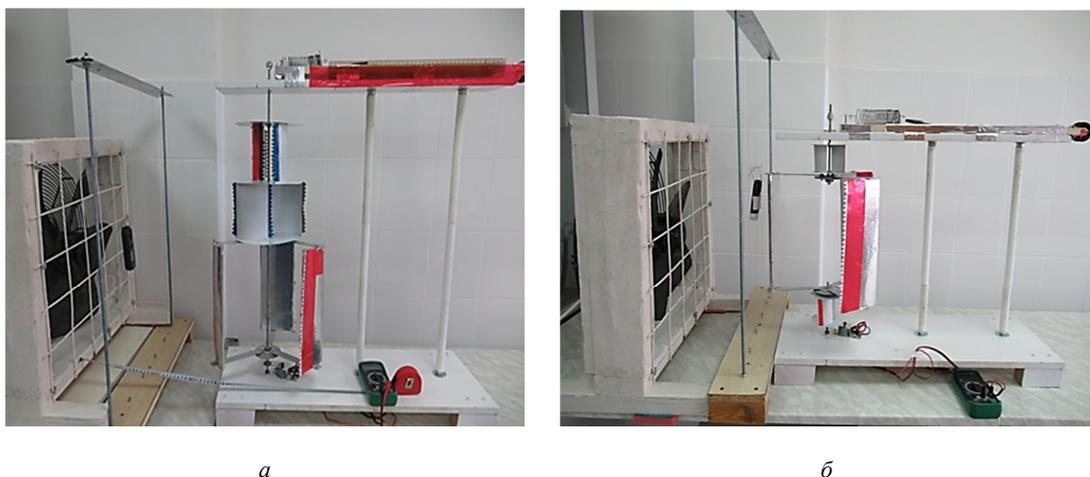


Рис. 4. Лабораторная экспериментальная установка для исследования модернизированных КРДС

Fig. 4. Laboratory experimental setup for research of modernized CRDS

Как видно из рис. 4, ветровой поток в лабораторной экспериментальной установке имитировался вентилятором с диаметром рабочего колеса 0,45 м, который был заключен в квадратный кожух с предохранительной сеткой. Для определения скорости воздушного потока в 18 точках в каждом из сечений использовались цифровой анемометр с погрешностью не более 0,1 м/с и координатное устройство в виде рамки с сеткой из синтетических нитей на 3×6 ячеек размерами 0,10 \times 0,10 м. На расстоянии x от вентилятора определялась средняя скорость воздушного потока V в каждом из сечений на основе осреднения скоростей потока в 18 ячейках. За счет изменения расстояния от вентилятора до оси КРДС осуществлялось изменение средней по сечению скорости воздушного потока. Вращающий момент КРДС уравнивался моментом силы упругости пружины динамометра. Левая неподвижная часть была присоединена к синтетической нити, которая проходила по тормозному шкиву и крепилась к неподвижному стержню. Деформация предварительно протарированной пружины измерялась по соответствующей шкале с погрешностью не более 1 мм. КРДС монтировался на едином валу с тормозным шкивом и шкивом мультипликатора. При помощи электрогенератора постоянного тока с клиноременной

мультипликатором для повышения частоты вращения вала электрогенератора и цифрового вольтметра определялась частота вращения КРДС. Трехлопастной ротор Н-Дарье диаметром $D_D = 0,320$ м имеет лопасти высотой $H_D = 0,300$ м, шириной $b_D = 0,100$ м и толщиной $\delta_D = 0,012$ м. Были использованы 2 двухступенчатых ротора Савониуса оптимальной геометрии различных размеров: диаметром $D_S = 0,185$ м и $D_S = 0,0925$ м, четырьмя лопастями с углом раскрытия $\theta = 135^\circ$ (см. рис. 4, а), а также диаметром $D_{PS} = 0,100$ м и $D_{PS} = 0,050$ м, высотой $H_{PS} = 0,140$ м и $H_{PS} = 0,070$ м (см. рис. 4, б). Все лопасти ротора Н-Дарье и Савониуса имели зигзагообразные закрылки с треугольными элементами.

По показаниям цифрового вольтметра, измеряющего электродвижущую силу электрогенератора E , об/мин, определялась частота вращения КРДС:

$$n = K_n E, \quad (1)$$

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

Полезная мощность экспериментального КРДС определялась по формуле:

$$P_{DS} = \frac{1}{60} \pi n K_f \Delta x d, \quad \text{Вт}, \quad (2)$$

где K_f – тарировочный коэффициент динамометра, н/м; Δx – деформация пружины, м; d – диаметр шкива для измерения силы упругости, м.

Результаты определения основных параметров КРДС показаны на рис. 5 [12, 13].

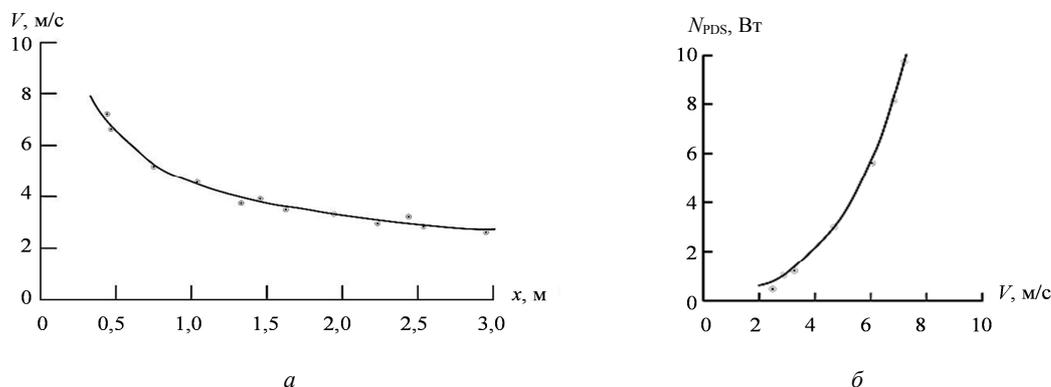


Рис. 5. Основные параметры КРДС:
а – зависимость скорости воздушного потока от расстояния от корпуса вентилятора до оси КРДС;
б – зависимость мощности КРДС от скорости воздушного потока

Fig. 5. Main parameters of the CRDS:
а – dependence of the air flow speed on the distance from the fan housing to the axis of the fan;
б – dependence of the CRDS power on the air flow speed

Как видно из рис. 5, а, с увеличением расстояния от 0,45 до 3,0 м средняя скорость воздушного потока уменьшается с 7,2 до 2,7 м/с, т. е. 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, при которой могут эксплуатироваться КРДС в ОБЭУ малой и средней мощности. Зависимость мощности экспериментального КРДС от скорости воздушного потока приведена на рис. 5, б. С повышением скорости воздушного потока с 2,7 до 7,2 м/с мощность ротора увеличивалась с 0,60 до 9,91 Вт, т. е. в 17 раз. Несколько меньшая степень повышения полезной мощности КРДС с повышением скорости воздушного потока, по сравнению со степенью повышения затраченной мощности воздушного потока от скорости, объясняется снижением коэффициента мощности (энергетического КПД) при более высоких скоростях воздушного потока. Было установлено, что при малых скоростях воздушного потока ротор Савониуса способствует первоначальному страгиванию и раскрутке комбинированного ротора, а при больших скоростях начинает тормозить ротор Н-Дарье. Вопрос об оптимизации соотношения геометрических параметров ротора Н-Дарье и Савониуса в составе комбинированного ротора требует дальнейших исследований. Таким образом, КРДС обладает быстроходностью ротора Н-Дарье и возможностью самозапуска и устойчивой работой из-за ротора Савониуса даже при малых скоростях ветра 2–3 м/с, что обеспечит повышение выработки элект-

троэнергии на 5–15 % при существующих для каждой местности времени работы ВЭУ при каждой градации скоростей.

Были также экспериментально определены коэффициенты мощности (энергетические КПД) нескольких роторов для ОБЭУ, имеющих лопасти с закрылками и коэффициенты быстроходности Z [12, 13]. На рис. 6 показаны зависимости коэффициентов мощности этих роторов от коэффициента быстроходности Z .

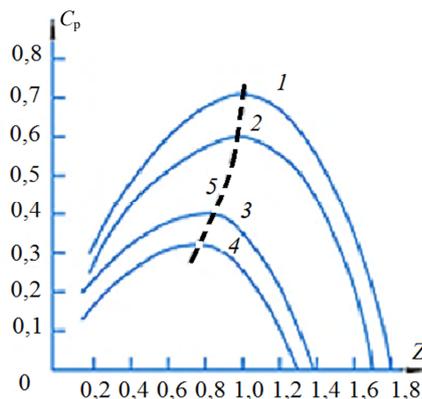


Рис. 6. Зависимости энергетического КПД ротора Н-Дарье (1), КРДС (2, 3) и ротора Савониуса (4) от коэффициента быстроходности Z

Fig. 6. Dependences of the energy efficiency of the H-Darier rotor (1), KRDS (2, 3) and Savonius rotor (4) on the speed coefficient Z

Как видно из рис. 6, все кривые зависимости коэффициентов мощности роторов от коэффициентов быстроходности Z имеют ярко выраженный максимум при различных их значениях, зависящих от конструкции ротора. Полученные максимальные значения коэффициента C_p .

КРДС (кривая 2) составляет: $C_{pDS} = 0,60$ при меньших размерах ротора Савониуса $D_S = 0,0925$ м, $D_{PS} = 0,050$ м, $H_S = 0,070$ м и $C_{pDS} = 0,40$ (кривая 3) при больших размерах ротора Савониуса $D_S = 0,185$ м, $D_{PS} = 0,100$ м, $H_S = 0,140$ м. При малых скоростях воздушного потока ротор Савониуса способствует страгиванию и раскрутке комбинированного ротора, а при больших скоростях ветра начинает тормозить ротор Н-Дарье. Это приводит к значительно большим значениям коэффициента мощности КРДС с меньшими размерами входящего в его состав ротора Савониуса.

Для сравнения показаны также зависимости коэффициентов мощности ротора Н-Дарье (кривая 1) и ротора Савониуса (кривая 4), имеющие лопасти с закрылками от коэффициента быстроходности Z . Максимальное значение коэффициентов мощности составляет для ротора Н-Дарье $C_p = 0,72$ и ротора Савониуса $C_p = 0,32$, что больше, чем полученного для роторов известных типов [7–10, 14, 15]. Максимумы кривых 1–4 соединены кривой 5 и зависят от коэффициентов быстроходности Z , изменяющихся от 0,71 для ротора Савониуса до 1,23 для ротора Н-Дарье. Следует отметить, что при уменьшении относительной ширины лопастей ротора Н-Дарье коэффициент быстроходности может быть увеличен до значения $Z = 4–5$ [7, 8, 14].

Таким образом, разработанный авторами КРДС обладает быстроходностью, характерной для ротора Н-Дарье, и возможностью самозапуска из-за большого пускового момента ротора Савониуса даже при небольших скоростях ветра 2–3 м/с. В отличие от АВЭУ, работа ОВЭУ на основе КРДС не зависит от направления ветра, и поэтому удельная выработка энергии аналогичных по мощности конструкций у этих ВЭУ будет больше. Энергетический КПД КРДС может достигать 0,6, т. е. в 1,3–

1,7 раза выше, чем у известных видов роторов ВЭУ.

Оценка параметров ОВЭУ

Величина полезной мощности КРДС для ОВЭУ при диаметре ротора, равной его высоте ($D = H$), определяется по формуле:

$$N = \frac{1}{2000} C_{pP} D^2 V^3, \text{ кВт}, \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха.

Коэффициент мощности КРДС при вынесении ротора Савониуса за пределы ротора Н-Дарье может быть определен по ранее полученной в [13] формуле:

$$C_{pDS} = \eta_1 \frac{C_{pD} + C_{pS} \frac{N_S D_S H_S}{N_D D_D H_D}}{1 + \frac{N_S D_S H_S}{N_D D_D H_D}}, \quad (4)$$

где η_1 – коэффициент, учитывающий снижение эффективности комбинированного ротора по сравнению с ротором Н-Дарье; C_{pD} , C_{pS} – коэффициенты мощности роторов Н-Дарье и Савониуса; N_D , N_S – количество ступеней роторов Н-Дарье и Савониуса; D_D , D_S – диаметры роторов Н-Дарье и Савониуса; H_D , H_S – высоты роторов Н-Дарье и Савониуса.

Эмпирический коэффициент η_1 учитывает снижение эффективности КРДС по сравнению с ротором Н-Дарье за счет того, что максимальная эффективность роторов Савониуса и Н-Дарье достигается при разных значениях коэффициента быстроходности Z , среднее значение этого коэффициента на основе экспериментальных данных составило $\eta_1 = 0,78$.

Результаты расчета мощности N по формуле (3) с использованием результатов расчета коэффициента мощности по формуле (4) в виде зависимости от скорости ветра V и диаметра КРДС D_{DS} показаны в табл.

Результаты расчета мощности N в зависимости от скорости ветра V и диаметра ротора КРДС D_{PD}

Results of calculation of power N depending on wind speed V and diameter of CRDS rotor D_{PD}

D_{DS} , м	V , м/с						
	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
5,0	0,245	0,581	1,13	1,96	3,11	4,65	6,62
10,0	0,980	2,33	4,54	7,84	12,5	18,6	26,5
15,0	2,20	5,24	10,2	17,64	28,1	41,9	59,6

Анализ таблицы показывает, что с увеличением скорости ветра от 3,0 до 9,0 м/с и диаметра ротора от 5,0 до 15,0 м мощность КРДС увеличивается с 0,245 до 59,6 кВт, т. е. практически пропорционально квадрату диаметра КРДС D_{DS} , а фактически

ротора Н-Дарье D_D и практически пропорционально кубу скорости ветра V .

Оценка технико-экономической эффективности оригинальных ОВЭУ на основе КРДС с лопастями с зигзагообразными закрылками показывает, что

они при серийном производстве будут иметь удельные капитальные затраты не более 160 тыс. руб./кВт (1,68 тыс. \$/кВт, по современному курсу доллара). Срок их окупаемости составит не более 6,6 лет. Поэтому эти ОВЭУ будут вполне конкурентоспособными с другими типами серийно выпускаемых ВЭУ. Кроме того, предлагаемые ОВЭУ будут оказывать минимальный вред окружающей среде, т. е. быть практически экологически чистыми.

Эти ОВЭУ с КРДС с номинальной мощностью до 60 кВт смогут использоваться совместно с другими энергоустановками, такими как СЭС, дизель-генераторными агрегатами (ДГА) и газопоршневыми электрогенераторами (ГПЭГ), работающими на природном и попутном газе. ДГА и ГПЭГ в настоящее время являются самыми доступными, имеют лучшее соотношение цены, надежности и качества, обладают высоким КПД, достигающим 40 %, и ресурсом около 40 тыс. моточасов до капитального ремонта [3, 4]. Эти предлагаемые автономные энергокомплексы с ВИЭ могли бы использоваться не только в инфраструктуре на небольших линейных объектах, но и для привода скважинных центробежных, винтовых, винтовых штанговых и других установок для добычи нефти на суше и на море. Номинальная мощность таких более энергетически эффективных энергокомплексов уже в ближайшие годы могла бы достигнуть мощности 120 кВт, что существенно выше, чем у известных современных энергокомплексов с ВИЭ, используемых на нефтегазопромысловых объектах. В частности, возможно использование таких энергокомплексов на базе ВИЭ для энергоснабжения бытовых модулей морских нефтедобывающих платформ [16]. В перспективе энергокомплексы с использованием ОВЭУ с КРДС смогут бы обеспечить работу интеллектуальных скважин, а затем и полностью автономное энергоснабжение интеллектуальных месторождений на суше и на море.

В дальнейшем будут более детально исследоваться вопросы агрегирования предлагаемых ОВЭУ с КРДС с другими энергоисточниками на основе возобновляемых и топливных энергоресурсов.

Заключение

1. Предложены усовершенствованные ОВЭУ на основе КРДС с зигзагообразными закрылками. В них запуск осуществлялся с помощью роторов Савониуса, работа КРДС – с помощью ротора Н-Дарье, имеющего диаметр и высоту в 3–4 раза больше, чем у ротора Савониуса. Лабораторные эксперименты показали, что с увеличением средней скорости воздушного потока с 2,7 до 7,2 м/с мощность КРДС увеличивалась в 19 раз. Максимальные значения коэффициента мощности (энергетического КПД) КРДС достигали 0,6, что практически в 1,3–1,7 раза выше, чем у серийно выпускаемых ВЭУ, имеющих коэффициент мощности не более 0,35–0,45.

2. Определены значения коэффициента мощности КРДС при различных геометрических размерах входящих в его состав роторов Н-Дарье и Савониуса с различным количеством ступеней роторов. Расчеты показали, что с увеличением скорости ветра от 3,0 до 9,0 м/с и диаметра ротора от 5,0 до 15,0 м мощность КРДС увеличивается с 0,245 до 59,6 кВт.

3. Энергетически, экономически и экологически эффективные ОВЭУ с КРДС будут вполне конкурентоспособными с другими типами ВЭУ. Эти ОВЭУ с КРДС с номинальной мощностью до 60 кВт смогут совместно с другими энергоустановками, работающими на природном и попутном газе, использоваться не только в инфраструктуре нефтегазопромысловых объектов, но и для добычи нефти на суше и на море. В перспективе они могут обеспечить работу интеллектуальных скважин, а в дальнейшем и полностью автономное энергоснабжение интеллектуальных месторождений.

Список источников

1. Туровин О. А., Огнев Е. Н., Кочнев А. Е. Применимость ветро-солнечной энергетики в качестве альтернативного источника электроснабжения нефтяных объектов компании // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2017. № 2 (4). С. 69–74.
2. Голубев С. В. Возобновляемые источники энергии в энергетике газовой отрасли. Перспективы и аспекты применения ВИЭ на объектах ПАО «Газпром» // Газ. пром-сть. 2016. № 12/746. С. 72–76.
3. Голубев С. В. Применение энергоустановок и энергокомплексов на базе возобновляемых и альтернативных источников энергии для объектов газового комплекса // Газ. пром-сть. 2017. № 5. С. 2–6.
4. Автономные блочно-комплектные энергетические установки. URL: <https://nipom.ru/blog/news/massmedia/avtonomnye-blochno-komplektnye-energeticheskie-ustanovki-bkeu-vsm> (дата обращения: 25.09.2023).
5. Закиров Э. С., Закиров С. Н., Индрупский И. М., Аникеев Д. П. Интеллектуальные скважины: преимущества и проблемы // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 2 (21). URL: https://oilgasjournal.ru/issue_21/zakirov-zakirov-indrupskiy-anikeev-1.html (дата обращения: 02.10.2023).
6. Умные скважины и интеллектуальные месторождения. Нефть в цифре. URL: <https://dprom.online/oilgas/umnye-skvazhiny-i-intellektualnye-mestorozhdeniya-neft-v-tsifre> (дата обращения: 02.10.2023).
7. Ляхтер В. М., Шполянский Ю. Б. Аэродинамика ортогональных ветроагрегатов // Сб. науч. тр. Гидропроект. М., 1988. Вып. 129: Ветроэнергетические станции. С. 113–127.
8. Горелов Д. Н. Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения. Омск: Полиграф. центр КАН, 2012. 66 с.

9. Моды Форандо. Характеристики ветродвигателя Савониуса // Современное машиностроение. Серия А. 1988. № 10. С. 139–148.

10. Соломин Е. В. Методология разработки и создания вертикально-осевых ветроэнергетических установок: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. 254 с.

11. Вертикальные ветрогенераторы Маглев. URL: <https://solar.manblan.ru/projects/14060/> (дата обращения: 05.12.2019).

12. Ильин Р. А., Шишкин Н. Д. Экспериментальное исследование параметров вертикально-осевых ветроэнергостановок для привода гребных винтов маломерных судов // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технологии. 2019. № 2. С. 93–100.

13. Shishkin N. D., Ilyin R. A. The energy efficiency research of combined H-Darier-Savonius rotors for autonomous power supply of objects on land and at sea // Journal of

Physics: Conference Series Volume 1652 15th International Scientific and Technical Conference (PESPC) 2020 6-9 October 2020. URL: <https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/1652/1/01> 2028 (дата обращения: 12.11.2020).

14. Баклушин П. Г., Вашкевич К. П., Самсонов В. В. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик ортогональных крыльчатых ветроколес // Сб. науч. тр. Гидропроекта. 1988. С. 98–105.

15. Горелов Д. Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 3. С. 325–333.

16. Шишкин Н. Д., Балтаньязов И. В., Герлов В. Н. Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения нефтедобывающих морских платформ // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2009. № 2. С. 193–197.

References

1. Turovin O. A., Ogniev E. N., Kochnev A. E. Primenimost' vetro-solnechnoi energetiki v kachestve al'ternativnogo istochnika elektrosnabzheniia nef'tianykh ob'ektov kompanii [Applicability of wind and solar energy as an alternative source of electricity supply to the company's oil facilities]. *PRONEFT'*. Professional'no o nef'ti, 2017, no. 2 (4), pp. 69-74.

2. Golubev S. V. Vozobnovliaemye istochniki energii v energetike gazovoi otrasli. Perspektivy i aspekty primeniia VIE na ob'ektakh PAO «Gazprom» [Renewable energy sources in the energy sector of the gas industry. Prospects and aspects of RES application at the facilities of PJSC Gazprom]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2016, no. 12/746, pp. 72-76.

3. Golubev S. V. Primenenie energoustanovok i energokompleksov na baze vozobnovliaemykh i al'ternativnykh istochnikov istochnikov energii dlia ob'ektov gazovogo kompleksa [Application of power plants and power complexes based on renewable and alternative sources of energy sources for gas complex facilities]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2017, no. 5, pp. 2-6.

4. Avtonomnye blochno-komplektnye energeticheskie ustanovki [Autonomous block-complete power plants]. Available at: <https://nipom.ru/blog/news/massmedia/avtonomnye-blochno-komplektnye-energeticheskie-ustanovki-bkeu-vsm> (accessed: 25.09.2023).

5. Zakirov E. S., Zakirov S. N., Indrupskii I. M., Anikeev D. P. Intellektual'nye skvazhiny: preimushchestva i problemy [Intelligent wells: advantages and challenges]. *Aktual'nye problemy nef'ti i gaza*, 2018, vol. 2 (21). Available at: https://oilgasjournal.ru/issue_21/zakirov-zakirov-indrupskiy-anikeev-1.html (accessed: 02.10.2023).

6. Umnye skvazhiny i intellektual'nye mestorozhdeniia. Nef'ti v tsifre [Smart wells and smart deposits. Oil in numbers]. Available at: <https://dprom.online/oilngas/umnye-skvazhiny-i-intellektual'nye-mestorozhdeniya-neft-v-tsifre> (accessed: 02.10.2023).

7. Liakhter V. M., Shpolianskii Iu. B. Aerodinamika ortogonal'nykh vetroagregatov [Aerodynamics of orthogonal wind turbines]. *Sb. nauch. tr. Gidropryekta*. Moscow, 1988, vol. 129: Vetroenergeticheskie stantsii. P. 113-127.

8. Gorelov D. N. Aerodinamika vetrokoles s vertikal'noi os'iu vrashcheniia [Aerodynamics of wind wheels with vertical axis of rotation]. Omsk, Poligraf. tsentr KAN, 2012. 66 p.

9. Modi Forando. Kharakteristiki vetrodvigatel'ia Savoniusa [Characteristics of the Savonius wind turbine]. *Sovremennoe mashinostroenie. Seria: A*, 1988, no.10, pp. 139-148.

10. Solomin E. V. Metodologiya razrabotki i sozdaniia vertikal'no-osevykh vetroenergeticheskikh ustanovok: monografiia [Methodology of development and creation of vertical-axial wind power plants: monograph]. Cheliabinsk, Izd-vo IuUrGU, 2011. 254 p.

11. Vertikal'nye vetrogeneratory Maglev [Vertical wind generators Maglev]. Available at: <https://solar.manblan.ru/projects/14060/> (accessed: 5.12.2019).

12. Il'in R. A., Shishkin N. D. Eksperimental'noe issledovanie parametrov vertikal'no-osevykh vetroenergoustanovok dlia privoda grebnykh vintov malomernykh sudov [Experimental study of the parameters of vertical-axial wind power plants for driving propellers of small vessels]. *Vestn. Astrakhan. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Morskaiia tekhnika i tekhnologii*, 2019, no. 2, pp. 93-100.

13. Shishkin N. D., Ilyin R. A. The energy efficiency research of combined H-Darier-Savonius rotors for autonomous power supply of objects on land and at sea. *Journal of Physics: Conference Series Volume 1652 15th International Scientific and Technical Conference (PESPC) 2020 6-9 October 2020*. Available at: <https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/1652/1/01> 2028 (accessed: 12.11.2020).

14. Baklushin P. G., Vashkevich K. P., Samsonov V. V. Eksperimental'noe issledovanie aerodinamicheskikh kharakteristik ortogonal'nykh kryl'chatykh vetrokoles [Experimental study of aerodynamic characteristics of orthogonal winged wind wheels]. *Sb. nauch. tr. Gidropryekta*, 1988, pp. 98-105.

15. Gorelov D. N. Energeticheskie kharakteristiki rotora Dar'e (obzor) [Energy characteristics of the Darye rotor (overview)]. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 325-333.

16. Shishkin N. D., Baltan'iazov I. V., Gerlov V. N. Ispol'zovanie vozobnovliaemykh istochnikov energii dlia energosnabzheniia nef'tedobyvaiushchikh morskikh platform [The use of renewable energy sources for the energy supply of oil-producing offshore platforms]. *Vestn. Astrakhan. gos. tekhn. un-ta. Seria: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2009, no. 2, pp. 193-197.

Статья поступила в редакцию 09.10.2023; одобрена после рецензирования 18.10.2023; принята к публикации 13.11.2023
The article is submitted 09.10.2023; approved after reviewing 18.10.2023; accepted for publication 13.11.2023

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Дмитриевич Шишкин – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; n.shishkin-53@mail.ru

Nikolay D. Shishkin – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; n.shishkin-53@mail.ru

Марина Александровна Марышева – старший преподаватель кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; vjyuvfhbyf@mail.ru

Marina A. Marysheva – Senior Lecturer of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; vjyuvfhbyf@mail.ru

