

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОЭНЕРГОУСТАНОВОК ДЛЯ ЗАПОВЕДНИКОВ И НАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРКОВ ЮГА РОССИИ

Н.Д. Шишкин, Р.А. Ильин, Д.И. Атдаев

**Саратовский научный центр РАН при Астраханском
государственном техническом университете,
Астраханский государственный технический университет**



Обоснована эффективность применения для национальных парков Юга России оригинальных высокоэффективных вертикально-осевых ветроэнергоустановок (ВО ВЭУ) на основе комбинированных роторов (КР) Н-Дарье-Савониуса. На основе экспериментальных исследований впервые получены значения коэффициента мощности оригинального комбинированного ротора с лопастями, имеющими закрылки зигзагообразной формы. Максимальное значение коэффициента мощности КР достигает $C_p = 0,60$ и превышает теоретически возможные значения для горизонтально-осевых ветроэнергоустановок $C_p = 0,59$. При работе ВО ВЭУ отсутствуют выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, потребление кислорода, тепловое загрязнение, генерирование инфразвука и шума. ВО ВЭУ мощностью 1–10 кВт целесообразно применять для выработки электрической и тепловой энергии в заповедниках и национальных парках.

Ключевые слова: вертикально-осевые ветроэнергоустановки, комбинированные роторы Н-Дарье-Савониуса, загрязнители, национальные парки

The Use of Environmentally Friendly Vertical-Axis Wind Power Plants for Nature Reserves and National Parks in Southern Russia

N.D. Shishkin, R.A. Ilyin, D.I. Atdaev

**Saratov Scientific Center of RAS at Astrakhan State Technical University, 414056 Astrakhan, Russia,
Astrakhan State Technical University, 414056 Astrakhan, Russia**

The efficiency of using original highly efficient vertical-axis wind turbines (VA wind turbines) based on N-Darya-Savonius combined rotors (KR) is substantiated for the national parks of southern Russia. Based on experimental studies, the power factor of the original combined rotor with blades having zigzag flaps was first obtained. The maximum values of the power factor of the CR reaches $CP = 0.6$ exceeding theoretically possible values for horizontal-axis wind power plants $CP = 0.59$. When working in a wind turbine, there are no emissions of pollutants into the atmosphere, oxygen consumption, thermal pollution, generation of infrasound and noise. VA wind turbines with a power of 1–10 kW, it is advisable to apply for the generation of electric and thermal energy in reserves and national parks.

Keywords: vertical-axis wind power plants, combined N-Darier-Savonius rotors, pollutants, national parks

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-11-43-49

Развитие энергетических и природоохранных технологий, динамика демографических и климатических условий уже приводят к изменению объема и структуры, а также к перераспределению потоков энергии в ряде стран мира и отдельных регионах, в том числе и на юге России [1–4]. Бурный рост возобновляемых источников энергии (ВИЭ) — это самый эффективный способ сниже-

ния техногенного влияния на окружающую среду. В настоящее время широкое применение находят децентрализованные системы энергоснабжения с использованием ВИЭ, в частности солнечной и ветровой энергии [5–7]. Особенно актуально для геоэкологии применение ВИЭ для заповедников и национальных парков, к которым предъявляются повышенные экологические требования.

Материал и методы исследования

Цель и задачи работы. Цель работы — обоснование эффективности применения для геоэкологии заповедников и национальных парков Юга России оригинальных высокоэффективных вертикально-осевых ветроэнергоустановок (ВО ВЭУ) на основе комбинированных роторов Н-Дарье-Савониуса. Задачами работы являются анализ

опыта применения ВИЭ в заповедниках и национальных парках, экспериментальное определение энергетической и оценка технико-экономической и экологической эффективности этих установок.

Анализ опыта применения ВИЭ в заповедниках и национальных парках. Рассмотрим кратко опыт практического применения ВИЭ для энергообеспечения заповедников и национальных парков России [8–11]. В настоящее время воздушные линии электропередач (ЛЭП) являются одним из самых простых способов передачи электроэнергии на большие расстояния. Абсолютно вся территория нашей планеты, пригодная для хозяйствования человека, задействована для передачи электроэнергии. Независимо от мощности и назначения, ЛЭП вступают в тесное взаимодействие с элементами живой природы, оказывая на них разностороннее негативное влияние: изменяют рельеф местности; снижают водоохранные, водорегулирующие, противозерозионные, климаторегулирующие, почвозащитные, полезные функции леса; изменяют среду обитания животных и птиц. Акустический шум, исходящий от ЛЭП, вызывает дискомфорт. К тому же электроснабжение заповедников и национальных парков с помощью ЛЭП определяет высокую стоимость электроэнергии и сопровождается постоянными перебоями в электроснабжении.

Директора заповедников и национальных парков всерьез задумались об использовании ВИЭ для электроснабжения этих объектов. Электричество в заповедниках и природных парках обычно используется для перекачивания воды, обеспечения связи, освещения, работы бытовой техники и научного оборудования, а также отопления небольших помещений [8, 9]. Правительство также поддерживает инициативу использования ВИЭ для различных рекреационных зон. В Россий-

ской программе развития ВИЭ отмечены задачи по их освоению на особо охраняемых природных территориях, включая Байкальскую территорию.

Так, например, в Астраханском государственном заповеднике (АГЗ) с 2013 г. стало применяться безопасное и экологически чистое тепло- и электроснабжение от солнечных батарей на фотоэлектрических преобразователях [11]. Таким образом, был решен вопрос бесперебойной работы объектов метеонаблюдений и средств оперативной связи госинспекции этого заповедника на Дамчикском участке. Даже в случае десятидневной пасмурной погоды сохраненной с помощью электроаккумуляторов энергии хватает для обеспечения этих объектов. Кроме того, метеостанция также обогревается и в зимнее время года, а метеоплощадка и дорога на метеостанцию оборудованы прожекторами, получающими энергоснабжение от солнечных батарей. Для освещения в ночное время и бесперебойной радиосвязи установлены солнечные батареи еще на двух небольших кордонах Трехизбинского и Обжоровского участков, что также повышает комфортность проживания и качество связи. Теперь на всех трех кордонах всегда имеется радиосвязь и возможность зарядки сотовых телефонов, что очень важно для поддержания оперативной связи с Управлением заповедника, особенно в пожароопасный период. Еще один плюс от применения солнечных батарей — уличное освещение на кордонах, позволяющее безопасно эксплуатировать на причалах маломерный флот в темное время суток, а также передвигаться по кордону. Следует, однако, отметить, что установка солнечных батарей в АГЗ потребовала больших капитальных затрат, значительная часть которых была компенсирована за счет спонсоров.

В Нижнесвирском заповеднике орнитологической станции Санкт-Петербургского университета, на которой ежегодно

отлавливают для кольцевания тысячи птиц, для обеспечения ловушек электроэнергией также применяются солнечные батареи [8, 9]. На кордоне "Пслух" Кавказского государственного природного заповедника запущена энергосистема "Кордон-12000". Эта электроустановка состоит из сорока двух солнечных батарей мощностью 200 Вт каждая, а также двадцати четырех аккумуляторных батарей емкостью 1695 А/ч. Система оснащена инверторами с суммарной выходной мощностью 12 кВт.

В заповеднике "Брянский лес" применяется автономная солнечная энергосистема "Кордон-3000" [8, 9]. Энергосистема создана на базе лучших комплектующих для возобновляемых источников энергии (Китай, Тайвань): инвертор Outback Power мощностью 3000 Вт, солнечные батареи Sunspare, аккумуляторные батареи Sonnenschein и другие.

Следует отметить опыт американского национального парка Channel Islands, расположенного у берегов южной Калифорнии [8]. Первоначально для обеспечения энергетических потребностей использовали дизельное топливо (до 80 т в год). Однако сейчас в национальном парке используется более 30 солнечных энергетических установок общей мощностью более 30 кВт.

Наиболее эффективным считается комбинирование нескольких различных ВИЭ. Например, использование солнечной, ветровой энергии и мини-ГЭС при наличии рядом водоема [8]. Такие электроустановки компенсируют недостатки друг друга, взаимодополняют и повышают надежность электроснабжения объектов. Так, например, на метеостанции "Джуга" в Кавказском заповеднике установлена ветро-солнечная электростанция мощностью 3 кВт. Совместно с энергосистемой работают солнечные модули Sunspare, общая мощность которых составляет 2,4 кВт, и ветрогенератор Maglev (Китай, Тайвань) мощностью 0,6 кВт.

Выработанная электроэнергия накапливается в аккумуляторных батареях Sonnenschein. Срок службы достигает 8 лет в обычном режиме и не менее 3 лет ежедневной эксплуатации в тяжелых условиях.

Вполне обоснованным является применение солнечных батарей в природном парке "Щербаковка" [8]. Этот парк располагается на территории Волгоградской области с координатами 50° с.ш., где среднегодовая солнечная инсоляция составляет $11,9 \text{ МДж/м}^2$ в день. Административный корпус представляет собой 3-х этажное здание с открытой горизонтальной крышей, на которой можно смонтировать солнечную установку. Среднее годовое потребление административного корпуса составляет $8500 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Для полного вытеснения покупной электроэнергии необходимо 30 солнечных панелей мощностью 230 Вт на номинальное напряжение 48 В , аккумуляторы (8 шт.) емкостью $400 \text{ А}\cdot\text{ч}$, инвертор и контролер заряда аккумулятора. Стоимость установки с учетом разработки технического проекта и строительно-монтажных работ составляет 756 тыс. руб. , а срок окупаемости — $7,5$ лет.

Таким образом, краткий анализ опыта применения ВИЭ в заповедниках, национальных парках и природоохранных зонах показывает, что их электро- и теплоснабжение с помощью ВИЭ имеет ряд преимуществ перед традиционными источниками энергии: практически полное отсутствие влияния на окружающую среду (экологичность), отсутствие электромагнитных помех, создаваемых ЛЭП, отказ от покупной электроэнергии и топлива для электро- и теплогенераторов, автономность энергоснабжения, а также легкость наращивания необходимой мощности. Средний срок окупаемости различных проектов на ВИЭ в России составляет от 8 до 15 лет, т.е., как правило, не превышает срока эксплуатации солнечных батарей, ветроэнергостановок (ВЭУ) и мини-ГЭС, составляю-

щих от 8 до 30 лет. Солнечные батареи и ВЭУ дают возможность устанавливать их практически в любом месте. Это весомое преимущество в случаях, когда объекты в заповедниках, национальных парках и природоохранных зонах находятся на удалении от обжитых мест и не могут снабжаться электрической энергией от других энергоисточников.

Экспериментальное определение энергетической эффективности комбинированных роторов Н-Дарье-Савониуса. В настоящее время наряду с горизонтально-осевыми ветроэнергостановками (ГО ВЭУ) применяются и ВО ВЭУ небольшой мощности [12, 13]. Достоинством всех видов ВО ВЭУ является отсутствие необходимости использовать в их конструкции направляющие механизмы, так как работа этих установок не зависит от направления ветра. Чаще всего используются ВО ВЭУ на основе ротора Н-Дарье (ротора Эванса) с вертикальными лопастями крылового профиля и ротора Савониуса с вертикальными полуцилиндрическими лопастями. Преимуществом роторов Н-Дарье является их быстроходность, а недостатком — невозможность самозапуска из-за малого пускового момента. Преимуществом ротора Савониуса является возможность их самозапуска из-за большого пускового момента, а недостатком — малая скорость вращения.

Вращение роторов Н-Дарье, как и роторов ГО ВЭУ, по мнению большинства исследователей, осуществляется за счет подъемной силы, возникающей в крыловом профиле лопасти, а вращение ротора Савониуса — за счет разности сил лобового сопротивления, действующих на лопасти, расположенные по разным сторонам от оси ротора. Однако в ряде работ Д.Н. Горелова [14, 15] показано, что подъемная сила возникает лишь на небольшой части круговой траектории крыловой лопасти, а на большей части траектории происходит обтекание лопасти

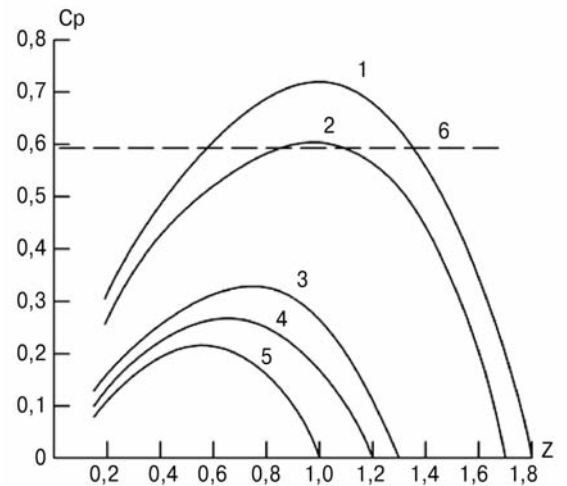


Рис. 1. Зависимость коэффициентов мощности роторов Н-Дарье и Савониуса от коэффициента быстроходности Z для роторов различных конструкций (1–5)

Fig. 1. The dependence of the power factors of the N-Darrie and Savonius rotors on the speed coefficient Z for rotors of various designs (1–5)

пульсирующим потоком, аналогичным тому, который возникает при взаимодействии горизонтального потока воздуха с машущим крылом птиц.

Авторы статьи полагают, что для повышения энергетической эффективности за счет уменьшения потерь от больших вихрей, образующихся на концах лопастей крылового профиля ротора Н-Дарье, а также на концах полуцилиндрических лопастей ротора Савониуса, можно использовать концевые элементы лопастей (закрылки) различной формы, подобные крыльям птиц, которые имеют на задней части треугольные, скругленные или прямоугольные окончания [16]. По-видимому, в результате длительной эволюции такие крылья позволяют благодаря совершенной аэродинамике снизить расходы энергии на полет как при подъеме, так и при парении во встречном потоке. Этот опыт авторы предлагают распространить и на схожие технические объекты, такие как лопасти ротора Н-Дарье и ротора Савониуса.

В Лаборатории нетрадиционной энергетики Отдела энергетических проблем Саратовского научного центра Российской академии наук при

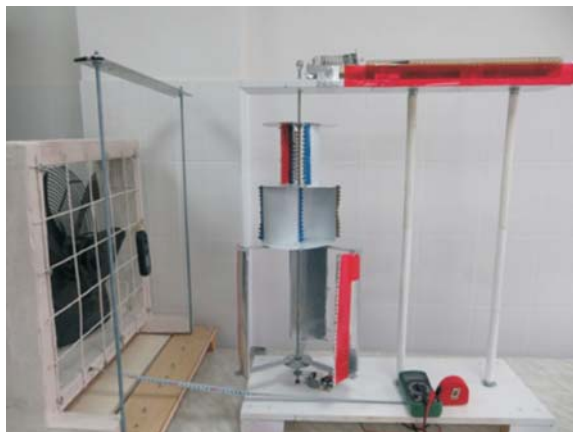


Рис. 2. Экспериментальная лабораторная установка для исследования комбинированных роторов Н-Дарье-Савониуса с закрылками

Fig. 2. An experimental laboratory setup for the study of combined N-Darrie-Savonius rotors with flaps

Астраханском государственном техническом университете (ЛНЭ ОЭП СНЦ РАН при АГУ) в 2018 г. была экспериментально исследована эффективность роторов Н-Дарье и Савониуса [17]. На рис. 1 показаны зависимости коэффициентов мощности роторов Н-Дарье и Савониуса C_p от коэффициента быстроходности Z .

Как видно из рис. 1, все кривые коэффициентов мощности роторов C_p имеют ярко выраженный максимум при различных значениях Z , зависящих от конструкции ротора. Полученные максимальные значения коэффициента мощности ротора Н-Дарье практически оптимальной конструкции, но с коэффициентом заполнения профиля $\sigma \approx 0,65$ при коэффициенте быстроходности $Z = 1,1$ составляет $C_p = 0,60$, а для ротора Н-Дарье, имеющего лопасти с закрылками $C_p = 0,70$. Эти значения превышают величину $C_p = 0,59$ для идеального ротора ГО ВЭУ (линия 6), недостижимую для реально эксплуатирующихся установок этого типа. Видно также, что коэффициент мощности ротора Н-Дарье, имеющего лопасти с закрылками (линия 1) больше, чем у ротора ротора Н-Дарье известной конструкции (линия 2) на 18 % — на столько же, на сколько увеличивается частота вращения. Коэффициент мощности

C_p оригинального ротора Савониуса, имеющего лопасти с закрылками (линия 3), больше коэффициента мощности C_p ротора Савониуса известной конструкции (линия 4) на 18 %, т.е. на столько же, на сколько увеличивается частота вращения. Полученные авторами максимальные значения C_p для ротора Савониуса оптимальной конструкции и оригинального ротора Савониуса с закрылками на лопастях составили $C_p = 0,27$ и $C_p = 0,32$ при коэффициентах быстроходности Z соответственно 0,70 и 0,80. Для сравнения на рис. 1 приведена зависимость $C_p = f(Z)$ (линия 6), полученная при исследовании ротора Савониуса в гидробассейне [14]. Максимальное значение коэффициента мощности в этом случае достигается при коэффициенте быстроходности $Z = 0,65$ и составляет $C_p = 0,20$ (линия 5 на рис. 1).

Авторами была выполнена предварительная оценка параметров ВО ВЭУ на основе комбинированных роторов (КР) Н-Дарье-Савониуса [17]. Однако полученные результаты требовали экспериментальной проверки. Модернизированная в 2019 г. экспериментальная лабораторная установка для исследования КР, имеющих лопасти с закрылками, показана на рис. 2.

Источником воздушного потока служил вентилятор, позволяющий достичь скоростей воздушного потока до 9–10 м/с. Координатное устройство в виде рамки с сеткой из толстых синтетических нитей на 3×6 ячеек размерами $0,10 \times 0,10$ м использовалось для определения скорости воздушного потока в пятнадцати точках (центрах ячеек). Средняя скорость воздушного потока V в каждом из сечений на расстоянии x от вентилятора определялась с помощью цифрового анемометра с погрешностью не более 0,1 м/с на основе осреднения скоростей потока во всех точках. За счёт изменения расстояния до оси ротора осуществлялось измене-

ние средней по сечению скорости воздушного потока. Вращающий момент ротора уравновешивался моментом силы упругости растягиваемой пружины (динамометра). Левая неподвижная часть была присоединена к синтетической нити, которая проходила по тормозному шкиву и крепилась к неподвижному стержню. Деформация пружины измерялась по соответствующей шкале. Комбинированный ротор Н-Дарье-Савониуса монтировался на едином валу с тормозным шкивом и шкивом мультипликатора. Частота вращения ротора измерялась при помощи электрогенератора постоянного тока с клиноременным мультипликатором с передаточным отношением 7,09 для соответствующего повышения частоты вращения вала электрогенератора. Осевой промышленный вентилятор с диаметром рабочего колеса 0,45 м заключен в квадратный кожух с предохранительной сеткой.

Были применены 2 ротора Савониуса различных размеров: диаметром $D_{pc} = 0,185$ м и $0,0925$ м, четырьмя полуцилиндрическими лопастями с углом раскрытия $\theta = 135^\circ$, диаметром $D_l = 0,10$ м и $0,05$ м, высотой $H_{pc} = 0,14$ м и $0,07$ м. Лопасти включают передние и задние образующие с треугольными элементами (закрылками) высотой $0,01$ м. Ротор Н-Дарье диаметром $D_{pd} = 0,55$ м имеет 3 лопасти с шириной профиля $b_d = 0,10$ м, высотой $H_{pd} = 0,30$ м и толщиной профиля $\delta_d = 0,012$ м. Лопасти также включают закрылки с треугольными элементами высотой $0,010$ м.

Эксперименты проводились при изменении средних скоростей воздушного потока от 2,7 до 7,2 м/с. Такой диапазон скоростей воздушного потока практически соответствует реальному диапазону скорости ветра на суше и на море, при которой могут эксплуатироваться ВО ВЭУ на основе комбинированных роторов Н-Дарье-Савониуса. Обработка результатов замеров парамет-

ров комбинированных роторов производилась, как и ранее, по методике, приведенной в работе [17]. На рис. 3 показаны зависимости коэффициентов мощности КР Н-Дарье-Савониуса, имеющих лопасти с закрылками, от коэффициента быстроходности Z .

Как видно из рис. 3, все кривые коэффициентов мощности роторов C_p имеют ярко выраженный максимум при различных значениях Z , зависящих от конструкции ротора.

В результате проведенных исследований установлено, что $C_p = 0,40$ при больших размерах ротора Савониуса — $D_{pc} = 0,185$ м, $D_l = 0,10$ м, $H_{pc} = 0,140$ м (кривая 1) и $C_p = 0,60$ при меньших размерах ротора Савониуса — $D_{pc} = 0,0925$ м, $D_l = 0,050$ м, $H_{pc} = 0,070$ м (кривая 2). Для сравнения на рис. 3 показаны теоретически возможные значения идеального ротора ГО ВЭУ $C_p = 0,59$ (кривая 3). 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 значительному большому значению коэффициента мощности КР Н-Дарье-Савониуса с меньшими размерами входящего в его состав ротора Савониуса. Вопрос об оптимизации соотношения геометрических параметров ротора Н-Дарье и Савониуса в составе КР требует дальнейших исследований.

Разработанный КР Н-Дарье-Савониуса 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 ГО ВЭУ, работа ВО ВЭУ на основе КР Н-Дарье-Савониуса не зависит от направления ветра, и поэтому удельная выработка энергии аналогичных по мощности конструкций у этих ВЭУ будет в 1,5–2,5 раза больше [13].

Энергетически эффективные КР Н-Дарье-Савониуса мощностью 5–10 кВт могут быть применены для автономного энергоснабжения различных небольших объектов, расположенных на территориях заповедников и национальных парков России.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований впервые получены значения коэффициента мощности КР Н-Дарье-Савониуса с лопастями, имеющими закрылки зигзагообразной формы, подобные крыльям птиц. Максимальные значения коэффициента мощности комбинированного ротора достигает $C_p = 0,60$, что превышает теоретически возможные значения идеального ротора ГО ВЭУ $C_p = 0,59$ при относительно малых размерах ротора Савониуса.

Оценка технико-экономической и экологической эффективности оригинальных высокоэффективных ВО ВЭУ на основе комбинированных роторов Н-Дарье-Савониуса. Оценка технико-экономической эффективности оригинальных ВО ВЭУ на основе КР Н-Дарье-Савониуса заключается в определении таких основных технико-экономических показателей (ТЭП), как капитальные вложения, себестоимость получаемой электрической и тепловой энергии и срок окупаемости ВО ВЭУ [17]. За последние 20–30 лет их удельные капитальные затраты уменьшились в 5 раз и составляют в настоящее время $k_p^{ВЭУ} = 65 \div 98$ тыс. руб/кВт (1,0–1,5 тыс. долл/кВт) (в ценах 2018 г.). В качестве прототипа для оценки технико-экономической эффективности могут быть приняты трех-пятилопастные одно- и двухъярусные ВО ВЭУ ООО "ГРЦ-Вертикаль" мощностью 1–5 кВт с вертикальными лопастями крылового профиля [18]. Эти установки обеспечивают реальный КПД (коэффициент мощности до 0,38) при любом направлении ветра. Удельные капитальные затраты на них составляют $k_p^{ВЭУ} =$

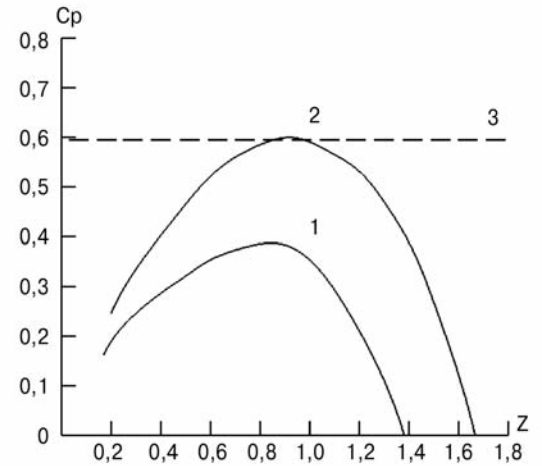


Рис. 3. Зависимости коэффициентов мощности комбинированных роторов Н-Дарье-Савониуса, имеющих лопасти с закрылками от коэффициента быстроходности Z с размерами $D_{pc} = 0,185$ м, $D_l = 0,100$ м, $H_{pc} = 0,140$ м (1) и $D_{pc} = 0,0925$ м, $D_l = 0,050$ м, $H_{pc} = 0,070$ м (2)

Fig. 3. Dependences of the power factor of combined N-Darje-Savonius rotors having blades with flaps on the speed coefficient Z with dimensions $D_{pc} = 0,185$ m, $D_l = 0,100$ m, $H_{pc} = 0,140$ m (1) and $D_{pc} = 0,0925$ m, $D_l = 0,050$ m, $H_{pc} = 0,070$ m (2)

$= 96$ тыс. руб/кВт (1,48 тыс. долл/кВт). Расчеты показывают, что срок окупаемости ВО ВЭУ ООО "ГРЦ-Вертикаль" при среднем тарифе на электроэнергию 4,5 руб/кВт·ч составляют 12,2 лет. При поддержке государства, как показано в работе [19], когда компенсируется доля затрат на электроэнергию, выработанную ВО ВЭУ, в размере 1,0 руб/кВт·ч, срок окупаемости составит 9,5 лет. При серийном производстве предлагаемые ВО ВЭУ на основе комбинированных роторов Н-Дарье-Савониуса с лопастями с зигзагообразными закрылками будут дороже ВО ВЭУ ООО "ГРЦ-Вертикаль" за счет роторов Савониуса, входящих в их состав, не более чем на 10 % (106 тыс. руб/кВт = 1,63 тыс. долл/кВт), а коэффициент мощности может быть достигнут 0,60, т.е. в 1,58 раза больше. Поэтому предлагаемые ВО ВЭУ будут иметь срок окупаемости 8,5 лет, а при соответствующей поддержке государства — 6,6 лет и будут вполне конкурентноспособными с другими типами ВЭУ и солнечными батареями на основе фото-электрических преобразователей.

Оценка экологической эффективности ВО ВЭУ на основе комбинированных роторов Н-Дарье-Савониуса. Как и другие преобразователи ВИЭ (ГО ВЭУ, солнечные батареи), ВО ВЭУ на основе КР Н-Дарье-Савониуса с лопастями, имеющими зигзагообразные закрылки, не имеют при работе таких факторов негативного воздействия энергоисточников на окружающую среду, как выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, ущерб при добыче и переработке топлива, потребление кислорода, тепловое загрязнение от выбросов CO₂ и др. Следует отметить, что работа ГО ВЭУ даже небольшой мощности сопровождается большой вибрацией и значительным шумом. Так, на полевой базе Нижнесвицкого заповедника была установлена ГО ВЭС, но вскоре ее вывели из эксплуатации из-за высокой вибрации и шума при работе. Как отмечается в работе [18], ВО ВЭУ ООО "ГРЦ-Вертикаль" не являются генераторами инфразвука и шума. То же можно сказать и о ВО ВЭУ на основе комбинированных роторов Н-Дарье-Савониуса с лопастями, имеющими закрылки зигзагообразной формы. Поэтому эти ВО ВЭУ целесообразно применять и на объектах, к которым предъявляются повышенные экологические требования, т.е. в заповедниках и национальных парках. Они могут использоваться для выработки электрической и тепловой энергии (совместно с теплоэлектронагревателями), как самостоятельно, так и в сочетании с солнечными батареями. Кроме того, для выработки тепловой энергии предлагаемые КР Н-Дарье-Савониуса могут быть агрегированы с

оригинальными механическими теплогенераторами. Такое техническое решение будет более эффективным с энергетической и технико-экономической точек зрения.

Заключение

Опыт применения ВИЭ в заповедниках, национальных парках и природоохраняемых зонах показывает, что электро- и теплоснабжение с помощью ВИЭ имеет ряд преимуществ: практически полное отсутствие влияния на окружающую среду (экологичность); отсутствие электромагнитных помех, создаваемых ЛЭП; отказ от покупки электроэнергии и топлива для электро- и теплогенераторов, автономность питания; легкость наращивания необходимой мощности. Средний срок окупаемости различных проектов на ВИЭ в России составляет не более 15 лет, т.е. не превышает срока эксплуатации солнечных батарей, ветроэнергостановок и мини-ГЭС, составляющих 20–30 лет.

На основе экспериментальных исследований впервые определены значения коэффициента мощности оригинального КР Н-Дарье-Савониуса с лопастями, имеющими закрылки зигзагообразной формы, подобные крыльям птиц. Максимальное значение коэффициента мощности КР достигает $C_p = 0,60$, превышая теоретически возможные значения идеального ротора ГО ВЭУ $C_p = 0,59$ при относительно малых размерах ротора Савониуса. Энергетически эффективные КР Н-Дарье-Савониуса мощностью 1–10 кВт могут быть применены для энергоснабжения заповедников и национальных парков России.

Оценка технико-экономической эффективности оригинальных ВО ВЭУ на основе КР Н-Дарье-Савониуса с лопастями с зигзагообразными закрылками показывает, что они при серийном производстве будут иметь удельные капитальные затраты не более 106 тыс. руб/кВт (1,63 тыс. долл/кВт). Срок их окупаемости при соответствующей поддержке государства составит 6,6 лет. Поэтому эти ВО ВЭУ будут вполне конкурентноспособными с другими типами ВЭУ и солнечными батареями, ВО ВЭУ мощностью 1–10 кВт смогут быть применены для автономного энергоснабжения заповедников и национальных парков России.

ВО ВЭУ на основе КР Н-Дарье-Савониуса с лопастями, имеющими закрылки зигзагообразной формы, обладают высокой экологической эффективностью. Они не оказывают негативного воздействия на окружающую среду: нет выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, снижается ущерб при добыче и переработке топлива, уменьшается потребление кислорода, снижается тепловое загрязнение от выбросов CO₂. Кроме того, в отличие от ГО ВЭУ предлагаемые ВО ВЭУ не являются генераторами вибрации и шума. Поэтому такие ВО ВЭУ целесообразно применять для выработки электрической и тепловой энергии и на объектах, к которым предъявляются повышенные экологические требования, т.е. в заповедниках и национальных парках. Для получения тепловой энергии целесообразно также применять механические теплогенераторы с приводом от роторов Н-Дарье-Савониуса.

Литература

1. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Митрова Т.А. Влияние изменений климата на региональные энергетические балансы и экспорт энергоресурсов из России. Теплоэнергетика. 2019. № 1. С. 7–20.
2. Шафраник Ю.К., Бушуев В.В., Мастепанов А.М. Потенциал "энергетической цивилизации" и геополитика. Энергетическая политика. 2015. № 5. С. 3–11.

References

1. Klimenko V.V., Klimenko A.V., Tereshin A.G., Mitrova T.A. Vliyaniye izmeneniy klimata na regional'nye energeticheskiye balansy i eksport energoresursov iz Rossii. Teploenergetika. 2019. № 1. S. 7–20.
2. Shafranik Yu.K., Bushuev V.V., Mastepanov A.M. Potentsial "energeticheskoy tsivilizatsii" i geopolitika. Energeticheskaya politika. 2015. № 5. S. 3–11.

3. Бушуев В.В., Первухин В.В. О геополитическом изменении новой энергетической цивилизации. Экологический вестник России. 2017. № 2. С. 7–13.
4. Дудников В.В. Определение действительной возможной выработки энергии на основе использования солнечных установок в Нижне-Волжском регионе. Промышленная энергетика. 2017. № 6. С. 34–37.
5. Марченко О.В., Соломин С.В. Анализ совместного использования энергии солнца и ветра в системах автономного электроснабжения. Промышленная энергетика. 2016. № 9. С. 39–43.
6. Лукутин Б.В., Муравьев И.О., Плотников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2015. 128 с.
7. Булычева Е.А., Киселев К.О., Сафорзода А.Х. Интеллектуальный научно-исследовательский комплекс альтернативной энергетики. Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 5. С. 71–78.
8. Атрашенко О.С., Галушак В.С., Сошинов А.Г. Альтернативная энергетика для электроснабжения заповедников и природных парков. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12. С. 383–386. [Электронный ресурс] URL: <http://applied-research.ru/ru/article/view?id=10843> (дата обращения: 29.04.2019).
9. Атрашенко О.С., Галушак В.С., Сошинов А.Г. Возобновляемые источники энергии для электроснабжения заповедников и природных парков. APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. 2015. № 4. С. 1–8. [Электронный ресурс] URL: <http://www.apriori-journal.ru/journal-estestvennie-nauki/id/843> (дата обращения: 29.04.2019).
10. Современные возобновляемые источники энергии начинают активно внедрять в российских заповедниках и национальных парках. [Электронный ресурс] URL: <http://www.megadomoz.ru/article/362/91/> (дата обращения: 29.04.2019).
11. Астраханский заповедник начал использовать солнечную энергию. [Электронный ресурс] URL: <http://astrakhanzapoved.ru> (дата обращения: 26.04.2019).
12. Чивенков А.И., Лоскутов А.Б., Михайличенко Е.А. Анализ применения и развития ветроустановок. Промышленная энергетика. 2012. № 5. С. 57–63.
13. Ветрогенератор Маглев-400. [Электронный ресурс] URL: http://solana99.ru/vetrogenerator_maglev400 (дата обращения: 26.04.2019).
14. Горелов Д.Н. Проблемы аэродинамики ветроколеса Дарье. Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10. № 1. С. 47–51.
15. Горелов Д.Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор). Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 3. С. 325–333.
16. Схематичные рисунки крыльев птиц 2018. [Электронный ресурс] URL: <https://yandex.ru/images/search?text> (дата обращения: 26.04.2019).
17. Шишкин Н.Д., Ильин Р.А. Разработка и оценка параметров комбинированной ветроэнергетической установки на основе роторов Н-Дарье и Савониуса. Промышленная теплоэнергетика. 2018. № 8. С. 51–56.
18. Кирпичникова И.М., Кривоспицкий В.П., Соломин Е.В. Ветроэнергетические установки "ГРЦ-Вертикаль". Вестник МАНЭБ. Приложение по Матер. I Междунар. науч.-практ. конф. "Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: экономика, экология, опыт применения". СПб, Чита, 2008. Т. 13. № 3. С. 129–134.
19. Рожкова А.А. Модернизация системы электроснабжения города Островной за счет использования ветроэнергетических установок. Промышленная энергетика. 2019. № 2. С. 50–53.
3. Bushuev V.V., Pervukhin V.V. O geopoliticheskom izmerenii novoi energeticheskoi tsivilizatsii. Ekologicheskii vestnik Rossii. 2017. № 2. S. 7–13.
4. Dudnikov V.V. Opredelenie deistvitel'noi vozmozhnoi vyrabotki energii na osnove ispol'zovaniya solnechnykh ustanovok v Nizhne-Volzhskom regione. Promyshlennaya energetika. 2017. № 6. S. 34–37.
5. Marchenko O.V., Solomin S.V. Analiz sovmevnogo ispol'zovaniya energii solntsa i vetra v sistemakh avtonomnogo elektrosnabzheniya. Promyshlennaya energetika. 2016. № 9. S. 39–43.
6. Lukutin B.V., Murav'ev I.O., Plotnikov I.A. Sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami. Tomsk: izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2015. 128 s.
7. Bulycheva E.A., Kiselev K.O., Saforzoda A.Kh. Intellektual'nyi nauchno-issledovatel'skii kompleks al'ternativnoi energetiki. Energoberezhnie i vodopodgotovka. 2018. № 5. S. 71–78.
8. Atrashenko O.S., Galushchak V.S., Soshinov A.G. Al'ternativnaya energetika dlya elektrosnabzheniya zapovednikov i prirodnykh parkov. Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2016. № 12. S. 383–386. [Elektronnyi resurs] URL: <http://applied-research.ru/ru/article/view?id=10843> (data obrashcheniya: 29.04.2019).
9. Atrashenko O.S., Galushchak V.S., Soshinov A.G. Vozobnovlyayemye istochniki energii dlya elektrosnabzheniya zapovednikov i prirodnykh parkov. APRIORI. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2015. № 4. S. 1–8. [Elektronnyi resurs] URL: <http://www.apriori-journal.ru/journal-estestvennie-nauki/id/843> (data obrashcheniya: 29.04.2019).
10. Sovremennye vozobnovlyayemye istochniki energii nachinayut aktivno vnedryat' v rossiiskikh zapovednikakh i natsional'nykh parkakh. [Elektronnyi resurs] URL: <http://www.megadomoz.ru/article/362/91/> (data obrashcheniya: 29.04.2019).
11. Astrakhanskii zapovednik nachal ispol'zovat' solnechnuyu energiyu. [Elektronnyi resurs] URL: <http://astrakhanzapoved.ru> (data obrashcheniya: 26.04.2019).
12. Chivenkov A.I., Loskutov A.B., Mikhailichenko E.A. Analiz primeneniya i razvitiya vetroustanovok. Promyshlennaya energetika. 2012. № 5. S. 57–63.
13. Vetrogenerator Maglev-400. [Elektronnyi resurs] URL: http://solana99.ru/vetrogenerator_maglev400 (data obrashcheniya: 26.04.2019).
14. Gorelov D.N. Problemy aerodinamiki vetrokolesa Dar'e. Teplofizika i aeromekhanika. 2003. T. 10. № 1. S. 47–51.
15. Gorelov D.N. Energeticheskie kharakteristiki rotora Dar'e (obzor). Teplofizika i aeromekhanika. 2010. T. 17. № 3. S. 325–333.
16. Shkematichnye risunki kryl'ev ptits 2018. [Elektronnyi resurs] URL: <https://yandex.ru/images/search?text> (data obrashcheniya: 26.04.2019).
17. Shishkin N.D., Il'in R.A. Razrabotka i otsenka parametrov kombinirovannoi vetroenergeticheskoi ustanovki na osnove rotorov N-Dar'e i Savoniusa. Promyshlennaya teploenergetika. 2018. № 8. S. 51–56.
18. Kirpichnikova I.M., Krivospitskii V.P., Solomin E.V. Vetroenergeticheskie ustanovki "GRTs-Vertikal". Vestnik MANEB. Prilozhenie po Mater. I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Resursosberezhnie i vozobnovlyayemye istochniki energii: ekonomika, ekologiya, opyt primeneniya". SPb, Chita, 2008. T. 13. № 3. S. 129–134.
19. Rozhkova A.A. Modernizatsiya sistemy elektrosnabzheniya goroda Ostrovnoi za schet ispol'zovaniya vetroenergeticheskikh ustanovok. Promyshlennaya energetika. 2019. № 2. S. 50–53.