



■ Адигейская ВЭС (мощность 150 МВт) — самая большая российская ветроэлектростанция

Российская ветроэнергетика: научно-конструкторские школы, этапы развития, перспективы

Рецензия эксперта на статью получена 31.05.2021 [The expert review on the article received on May 31, 2021].

Вступление

По данным Всемирной ассоциации ветроэнергетики (WWEA), в 2019 году установленная мощность всех ветровых электрических установок (ВЭУ) в мире составляла 650,7 ГВт. В России по состоянию на 1 сентября 2020 года установленная мощность наиболее крупных 22-х сетевых ВЭС достигла 336 МВт. Самая большая российская ветростанция мощностью 150 МВт была построена в 2020 году в Республике Адыгея. Определённое развитие в изолированных энерго районах Крайнего Севера и Камчатки получили ветродизельные станции. Ускорение темпов развития российской ветроэнергетики с 2019 года определялось государственной поддержкой и созданием необходимой законодательной базы, участием мощных финансовых структур — ГК «Росатом», ГК «Роснано» и ПАО «ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЕ РОССИИ» — с организацией в России на шести заводах производства оборудования ВЭУ.

Россия имеет столетнюю историю развития научных и конструкторских ветроэнергетических школ, большой опыт серийного производства и эксплуатации ветровых электрических установок, в том числе для арктических и антарктических условий. В ближайшие годы в нашей стране предстоит воссоздать утерянные после распада СССР научные и инженерные ветроэнергетические организации.

Научно-техническая школа Н. Е. Жуковского

Теоретические основы ветроэнергетики в России в начале XX века были заложены членом-корреспондентом Российской Императорской академии наук, профессором Императорского технического училища (ИМТУ) Николаем Егоровичем Жуковским (1847–1921) и его учениками: докторами технических наук В. П. Ветчинкиным, Н. В. Красовским, Г. Х. Сабининым и Г. Ф. Проскурой.

УДК 621.311.24. Научная специальность: 05.14.08.

Российская ветроэнергетика: научно-конструкторские школы, этапы развития, перспективы

В. А. Бутузов, д.т.н., Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина (КубГАУ, г. Краснодар); **П. П. Безруких**, д.т.н., Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); **С. В. Грибков**, к.т.н., НИЦ «Виндэк» (г. Москва)

В 2019 году ветроэнергетика занимала первое место (650,7 ГВт) в мировой возобновляемой энергетике. В России мощность ветроэлектрических станций (ВЭС) в том же году составила 630,5 МВт. Указаны финансовые механизмы для стимулирования строительства ВЭС, основные инвесторы и изготовители оборудования. Представлен анализ 100-летнего развития отечественных научных школ, реализации их концепций, основные конструкции ветроэлектрических установок (ВЭУ). Отмечена роль основателя российской ветроэнергетики Н. Е. Жуковского и его учеников, деятельность институтов ЦАГИ, ЦВЭИ, ВИМЭ-ВИЭСХ, НПО «Ветроэн». Указаны основные достижения советской ветроэнергетики: ВЭС в Балаклаве (100 кВт, 1931 год), ветродвигатели ВД-8 (1300 шт., 1936 год), арктические ВЭУ ЦВЭИ Д-12 (15 кВт, 1936 год), ветродизельная станция (ВДЭС) в Казахстане (400 кВт, 1957 год). Описаны первые ВЭУ в странах СНГ, а также в Крыму общей мощностью 110 МВт на основе ВЭУ КБ «Южное» (г. Днепродзержинск) и в посёлке Куликово Калининградской области (5,1 МВт). Приведён перечень основных ВЭУ и ВДЭС РФ. Дана оценка перспектив развития российской ветроэнергетики.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветровая электрическая установка (ВЭУ), ветровая электростанция (ВЭС), ветродвигатель, ветроколесо, ветродизельная станция (ВДЭС), ветряные мельницы, лопасти, мачта, электрогенератор, инерционный аккумулятор, Центральный аэродинамический институт (ЦАГИ), Северный морской путь (СМП).

UDC 621.311.24. Scientific specialty number: 05.14.08.

Russian wind power: scientific and design schools, stages of development, prospects

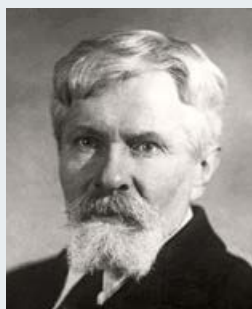
V. A. Butuzov, Doctor of Technical Sciences, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (Krasnodar city); **P. P. Bezrukhikh**, Doctor of Technical Sciences, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI); **S. V. Gribkov**, PhD, "Windek" Scientific and Engineering Center, LLC (Moscow city)

In 2019, the global wind energy sector ranked first (total 650.7 GW) in the renewable energy sector. In Russia, the capacity of wind power plants (WPP) in the same year was 630.5 MW. The financial mechanisms for stimulating the construction of wind farms, the main investors and equipment manufacturers are indicated. The article presents an analysis of the 100-year development of domestic scientific schools, the implementation of their concepts, the main designs of wind turbine (WT). The role of the founder of the Russian wind power industry — N. E. Zhukovsky and his students, the activities of the Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), the Central Wind Energy Institute (TsVEI), the All-Union Institute of Electrification and Mechanization of Agriculture (VIMJe-VIJeSKh), the "Vetroen" Research and Production Association, are described. The main achievements of the Soviet wind power industry are indicated: wind turbines in Balaklava city (100 kW, 1931), VD-8 WT (1300 units, 1936), TsVEI D-12 Arctic WT (15 kW, 1936), wind diesel power plant (WDPP) in Kazakhstan (400 kW, 1957). The first wind turbines in the Commonwealth of Independent States, in the Crimea with a total capacity of 110 MW based on the wind turbine of the "Yuzhnoye Design Bureau" (Dnepropetrovsk city) and in the village of Kulikovo, Kaliningrad region (5.1 MW), are described. The list of the main WT and WDPP of the Russian Federation is given. The assessment of the prospects for the development of the Russian wind power industry is given.

Key words: wind power, wind turbine (WT), wind power plants (WPP), wind engine, wind wheel, wind diesel station (WDS), windmills, blades, mast, electric generator, inertial accumulator, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Northern Sea Route (NSR).



:: Н. Е. Жуковский



:: В. П. Ветчинкин



:: Н. В. Красовский



:: Г. Х. Сабинин



:: Г. Ф. Проскура

Владимир Петрович Ветчинкин (1888–1950) являлся самым близким учеником Н. Е. Жуковского. Его отличала широта научного кругозора: аэрогидродинамика, ветроэнергетика, теория ракетного движения и космических полётов. В. П. Ветчинкин в 1914 году на основе теории «идеального» гребного винта Н. Е. Жуковского ввёл понятие коэффициента преобразования энергии ветра и предложил теорию «идеального ветряка», а в 1920 году Н. Е. Жуковский в статье «Ветряные мельницы НЕЖ» («НЕЖ» — инициалы автора) и двух других статьях дополнил её до «классической» теории ветряка [1]. В созданном Н. Е. Жуковским 1 декабря 1918 года Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ, город Москва) В. П. Ветчинкин возглавил отдел №1 по общетеоретическим исследованиям. Д. т. н. В. П. Ветчинкин был главным экспертом СССР по ветроэнергетике и блестящим её популяризатором.

Д. т. н., профессор Николай Валентинович Красовский (1891–1957), выпускник ИМТУ, в 1919 году как инженер-механик возглавил отдел ветряных двигателей (ОВД) ЦАГИ. В 1923-м он завершил сооружение ветряной испытательной станции в ЦАГИ [2]. Н. В. Красовский, Г. Х. Сабинин и В. Р. Секторов в 1930 году разработали проект первой советской сетевой Балаклавской ВЭС мощностью 100 кВт. В отделе ветряных двигателей ЦАГИ под руководством Н. В. Красовского А. И. Макаревским были разработаны методы расчёта на прочность лопастей и башен ветродвигателей [3].

Д. т. н., профессор Григорий Харлампиевич Сабинин (1884–1968) участвовал в разработках всех конструкций ветряных двигателей ЦАГИ. Основное направление его деятельности — разработка систем регулирования частоты вращения ветродвигателей, создание поворотных лопастей и управление ими с помощью вспомогательного руля-стабилизатора (1922 год), одновременно исполняющего функцию регулирующего органа [4]. В 1926 году

он опубликовал статью о расчёте поворотных лопастей, а в 1927–1928 годах испытал их в натурных условиях. Результаты исследования «идеального ветряка» были изложены Г. Х. Сабининым в 1929-м, а в 1931 году теория аэродинамического расчёта ветряных двигателей была описана им в работе, согласно которой максимальный коэффициент использования энергии ветра ветроколесом равен 0,687.



:: Верхняя часть башни ветряной испытательной станции ЦАГИ. 1923 год



:: Оригинальная ветряная мельница, предназначенная для орошения полей, на Всероссийской сельскохозяйственной и кустарно-промышленной выставке в Москве. 1923 год

Ветроустановки ЦАГИ: концепции и конструкции

В основу создаваемых ветроустановок ЦАГИ легли результаты теоретических и экспериментальных работ. В 1923 году был построен ветросиловой испытательный стенд ЦАГИ, а в 1924-м под руководством Н. В. Красовского была спроектирована, изготовлена и установлена на бакинских нефтяных промыслах первая работающая ветроустановка ЦАГИ с самоустанавливающимися лопастями и регулятором, предложенным Г. Х. Сабининым, с диаметром рабочего колёса 14 м и мощностью 36,8 кВт [4]. Установка предназначалась для привода глубинных насосов нефтяных скважин.

В последующие годы работа ЦАГИ по ветроэнергетике велась по двум основным направлениям. Для сельскохозяйственного назначения (привод насосов, мельниц) были созданы тихоходные многолопастные ветродвигатели ТВ-5, ТВ-8, УВД-8 с диаметрами рабочих колёс 5 и 8 м, соответственно. Ветродвигатель ТВ-5 при мощности 1,8 кВт имел 18–24 лопастей и обеспечивал подъём воды на высоту 70 м с расходом 3,5 м³/ч. Наибольшим спросом пользовались ветродвигатели ТВ-8, производство которых в 1936 году достигло 1300 шт.

Второе направление деятельности Центрального аэрогидродинамического института — создание быстроходных трёхлопастных ветродвигателей и ветроустановок с регулированием числа оборотов за счёт изменения углов поворота лопастей с помощью вспомогательного руля-стабилизатора разработки Г. Х. Сабинина.

По заказу дирекции Северного морского пути (СМП) ЦАГИ [а с 1930 года — его преемник, Центральный ветроэнергетический институт (ЦВЕИ)], разработали несколько конструкций ВЭУ, которые эксплуатировались на десятках полярных станций от Баренцева моря до Чукотки при аномальных атмосферных условиях: скорость ветра до 40 м/с, температура воздуха до –40 °С.

Были разработаны, изготовлены и испытаны трёхлопастные быстроходные ветроустановки: ЦВЭИ Д-8, ЦВЭИ Д-10 с диаметром рабочих колёс 8 м. В 1935 году была создана ветроустановка ЗЦВИЭ Д-12 с диаметром ветроколеса 12 м и мощностью генератора до 15 кВт. Конструкция этих агрегатов предусматривала вертикальную червячную трансмиссию от ветроколёс к электрогенераторам у основания башни [5]. Практическое применение этих ВЭУ с 1932 по 1945 годы позволило определить, что они обладают наилучшими эксплуатационными показателями. В СССР больше всего было произведено ветродвигателей Д-12 разных типов — 1500 шт. Были созданы полярные ветродизельные станции (ВДЭС) в составе ветроустановки с генератором мощностью 15 кВт, дизельной станции такой же мощности, электрических аккумуляторов из расчёта времени запуска резервной дизельной станции. Срок эксплуатации таких ВДЭС в арктических условиях превышал 12 лет [5].

В 1931 году по чертежам ЦАГИ была построена первая в СССР сетевая Балаклавская ВЭС под городом Севастополем, работающая параллельно с тепловой электростанцией, мощностью 100 кВт, которая до 1940 года была самой мощной ВЭС мира. Главным теоретиком аэродинамической схемы ВЭС был В. П. Ветчинкин, а испытателем являлся В. Р. Секторов. Технические решения оказались удачными и обеспечили работу установки до 1942 года (11 лет) — до её разрушения во время войны. Конструкция данной ВЭС предвосхитила современную концепцию создания ветроэлектростанций: трёхлопастное рабочее колесо с возможностью регулирования углов поворота лопастей, соосное расположение рабочего колеса, редуктора и генератора в гондоле. В статье [6] представлены результаты опытной эксплуатации Балаклавской ВЭС с 1931 по 1933 годы, в том числе при скоростях ветра 30 м/с. В статье [7] В. Р. Секторов приводит результаты опытной эксплуатации ВЭС, на многие годы определившей развитие мировой ветроэнергетики.

В 1931 году под руководством В. П. Ветчинкина и при финансовой поддержке ЦАГИ было завершено сооружение Курской ВЭУ мощностью 3,5 кВт с первым в мире инерционным аккумулятором. Русский изобретатель Анатолий Георгиевич Уфимцев (1880–1936) получил охранное свидетельство СССР на эту установку ещё в 1918 году. Её строительство с участием государственных и частных средств, в том числе советского писателя Максима Горького, длилось с 1923 по 1931 годы.



Ветроустановка ЦВЭИ Д-30 в Балаклаве в Крыму. 1931 год

У своего дома в центре города Курска А. Г. Уфимцев построил башню высотой 42 м с трёхлопастным колесом диаметром 10 м. Лопасты имели регулируемые углы поворота. Перед генератором постоянного тока мощностью 3,5 кВт впервые в мире был установлен инерционный аккумулятор в виде стального диска диаметром 950 мм и весом 328 кг, размещённого в вакуумированном корпусе.



Ветроэлектрическая установка изобретателя А. Г. Уфимцева (Курская ВЭС) в наши дни

Это устройство позволяло сглаживать пульсации ветра и обеспечивать работу генератора при его отсутствии. Данная ВЭУ обеспечивала электроснабжение и отопление дома, мастерской А. Г. Уфимцева и уличного освещения до 1936 года и при скорости ветра 4 м/с выдавала мощность 1,5 кВт, причём при отсутствии ветра могла работать до 16 часов.

На Первой Всесоюзной ветроэнергетической конференции 1932 года (в городе Харькове) отмечалось, что в СССР разработкой ветроустановок занимаются в основном ЦВЭИ (Москва) и харьковский Украинский институт промышлен-

ной энергетики (руководитель лаборатории — д.т.н., а впоследствии академик УАН Г. Ф. Проскура). В 1931 году в СССР работало 100 тыс. ветряных мельниц единичной мощностью от 2 до 8 кВт, с общей установленной мощностью 515 МВт [8].

По ряду причин деятельность ЦВЭИ в 1935 году была прекращена, а отдел ветроэнергетики в ЦАГИ был воссоздан только в 1946-м по инициативе В. П. Ветчинкина. В последующие годы ЦАГИ, несмотря на наличие ведущих специалистов в области ветроэнергетики, не удалось восстановить свой былой научный потенциал и возглавить возрождение ветроэнергетики в Советском Союзе.

Проекты мегаваттных ВЭС

По результатам успешной работы Балаклавской ВЭС и по инициативе руководителя тяжёлой промышленности (Наркомтяжпром СССР) Г. К. Орджоникидзе (1886–1937) в 1932 году был объявлен конкурс на разработку эскизного проекта ВЭС мощностью 5 МВт.

В конкурсе участвовали три организации. Институт ЦВЭИ (ведущий конструктор В. В. Уткин-Егоров) был представлен проект ВЭС типа ЦВЭИ Д-100 мощностью 5 МВт с высотой мачты 65 м



Фото пользователя slava4ka_011 в сообществе technoments.ru

и диаметром трёхлопастного ветроколеса 100 м. Такая станция имела свой аналог — как указывает В. Р. Секторов в статье [7], Балаклавская ВЭС была уменьшенной копией ЦВЭИ Д-100. Ранее этот же институт разработал проект ВЭС ЦВЭИ Д-50 мощностью 1 МВт для электрификации местности в районе горного массива Хибины Кольского полуострова и ирригации территории Заволжья.

Второй участник конкурса — Украинский институт промышленной энергетики (город Харьков) — представил проект ВЭС мощностью 4,5 МВт с высотой мачты 150 м и четырёхлопастным ветроколесом.

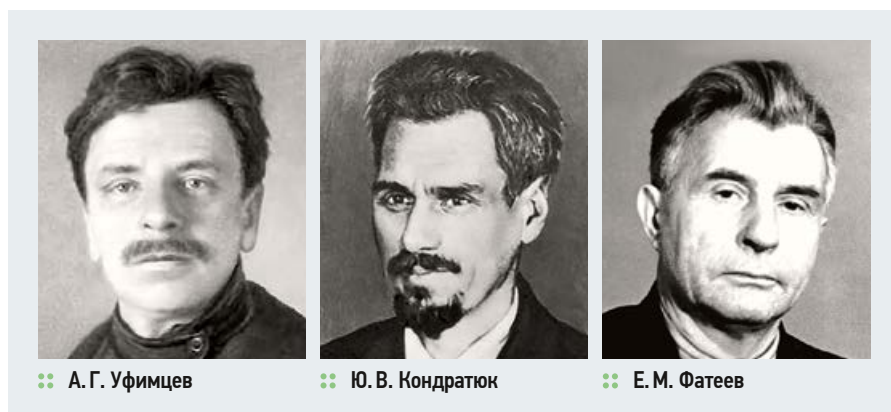
Победителем конкурса в 1933 году стал эскизный проект «Икар» далёкого от ветроэнергетики Проектного бюро №14 угольной промышленности, авторами которого являлись Ю.В. Кондратюк (1897–1941) и П.К. Горчаков.

Проект ВЭС-2-Д-60 предусматривал строительство железобетонной башни высотой 165 м, сооружаемой методом скользящей опалубки, с тросами растяжки (конструктором этой и будущей Останкинской телевизионной башни стал Н.В. Никитин). На башне одно под другим располагались два трёхлопастных ветроколеса диаметром 60 м и мощностью 5 МВт каждый. Разворот ВЭУ «на ветер» производился всем стволom с опорой на гидравлический подпятник фундамента основания. Между рабочими колёсами и генераторами были предусмотрены гидравлические мультипликаторы для повышения числа оборотов с 20 до 600 мин⁻¹. Расчётные параметры, описание конструкции ВЭС приведено в статье [9].

Проект ВЭС-2-Д-60 («Икар») предусматривал строительство методом скользящей опалубки железобетонной башни (высотой 165 м) с тросами растяжки

При решении вопроса о победителе конкурса большое значение имела поддержка конструкции Ю.В. Кондратюка ведущим экспертом СССР по ветроэнергетике В.П. Ветчинкиным.

В 1936 году в Крыму в 4 км от горы Ай-Петри был построен железобетонный фундамент ВЭУ глубиной 5 м. Работа над проектом ВЭС-2-Д-60 продолжалась до апреля 1938 года, когда было принято решение о разработке и изготовлении уменьшенной модели ВЭС-2-Д-20 мощностью 100 кВт с двумя ветроколесами

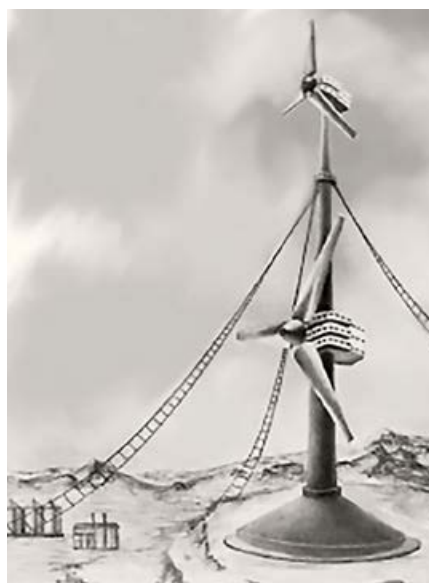


А. Г. Уфимцев

Ю. В. Кондратюк

Е. М. Фатеев

диаметром по 20 м. ВЭС-2-Д-20 была изготовлена в 1941 году на Перовском механическом заводе (Москва), однако начало войны и гибель на ней Ю.В. Кондратюка прекратили дальнейшее развитие этого проекта. Фундамент и мачта ВЭС-2-Д-20 высотой 60 м была смонтирована у платформы Перловка на экспериментальной базе Проектно-экспериментальной конторы треста «Теплоэлектропроект», разработавший рабочий проект ВЭС в Крыму.



Эскизный проект «Икар». 1933 год

Ветроустановки ВНИИ механизации сельского хозяйства (ВИМЭ)

После ликвидации ЦВЭИ развитие его идей и конструкций в СССР осуществлялось в основном в ВНИИ механизации и электрификации сельского хозяйства (ВИМЭ), куда в 1936 году был назначен руководителем лаборатории ветроэнергетики Ефим Михайлович Фатеев (1890–1965), работавший в 1925–1930 годах инженером в ЦАГИ, а в 1930–1932-х — в ЦВЭИ. Под его руководством, с учётом опыта эксплуатации в арктических условиях, в 1930-е годы была создана ветроустановка ЦВЭИ-ВИМЭ Д-12, мощностью 10 кВт, а после войны совместно с В.И. Сидоровым — ветроустановка ВИМЭ Д-18 с вертикальной трансмиссией, мощностью 28 л.с. (20,6 кВт) при скорости ветра 8 м/с, показавшая хорошие эксплуатационные показатели, как в арктических условиях, так и при использовании в сельском хозяйстве [10].

После завершения войны в 1945 году в ВИМЭ были разработаны новые конструкции ветроустановок типа Д-8, Д-10, Д-12. ВИМЭ (а с 1957 года — ВИЭСХ) имел опытный завод в Москве, испытательный полигон в Армавире был основным разработчиком зарядных ВЭУ малой мощности. Данным НИИ в 1938 году были созданы зарядные ветроустановки ВИМЭ Д-3 мощностью 300 Вт и ВИМЭ Д-5 мощностью 2 кВт с регулируемыми лопастями. Аналогичные ВЭУ Д-3 мощностью 1 кВт разрабатывал и производил Всесоюзный институт сельскохозяйственного машиностроения в Москве (ВИСХОМ).

В табл.1 представлены данные об основных разработчиках ветроэлектрических установок в СССР.

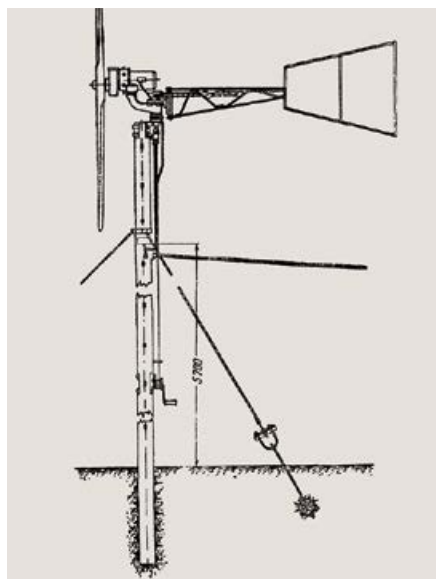
В 1946 году был разработан ветродвигатель ВИМЭ Д-18 ГУСМП с трёхлопастным рабочим колесом со стабилизатором регулирования с вертикальной трансмиссией, и на его основе была создана ВЭУ с синхронным генератором мощностью 25 кВт и генератором постоянного тока мощностью 40 кВт.

Основные институты — разработчики ветроэнергетики СССР с 1920 по 1991 годы табл. 1

Годы	Институты-разработчики	Марки серийных ветродвигателей, ветроустановок, ветроэлектростанций
1920–1930	Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ, г. Москва)	ВЭУ: Д-14 (Баку), Д-30 (Балаклава), Курская ВЭУ. Ветродвигатели: ТВ-5; ТВ-8
1930–1935	Центральный ветроэнергетический институт (ЦВЭИ, г. Москва)	ВЭУ: ЦВЭИ Д-8, 3ЦВЭИ Д-12, ЦВЭИ Д-30, ЦВЭИ Д-50, ЦВЭИ Д-100
1932–1941	Украинский институт промышленной энергетики (г. Харьков)	Крымская ВЭС: ВЭС-2-Д-60
1935–1945	Всесоюзный институт сельскохозяйственного машиностроения (ВИСХОМ, г. Москва)	ВЭУ: ВИСХОМ Д-3
1935–1967	Всесоюзный институт механизации и электрификации сельского хозяйства (ВИМЭ, г. Москва, с 1957 г. ВИЭСХ)	ВЭУ: 3ЦВЭИ-ВИМЭ Д-12, ВИМЭ Д-18
1954–1975	Истринский филиал ВНИИ электромеханики (ВНИИЭМ, Московская область)	ВЭУ: Д-18-СУ-3
1975–1991	НПО «Ветроэн» (г. Истра Московской области)	ВЭУ: АВЭУ-6-4, АВЭС-16, АВЭС-100, АВЭС-250

Всесоюзный институт сельскохозяйственного машиностроения

Научно-исследовательский институт сельскохозяйственного машиностроения им. В.П. Горячкина (ВИСХОМ) был создан в 1928 году. В нём был разработан ряд ветроэлектрических установок малой мощности, в том числе ВИСХОМ Д-3,5 и Д-3, причём последняя изготавливалась из менее дефицитных материалов и обеспечивала возможность массового выпуска [11]. ВЭУ комплектовалась генератором постоянного тока (1 кВт).



Ветроустановка ВИСХОМ Д-3,5

В 1940 году была разработана ветроэлектрическая установка ВИСХОМ РД-1,5, отличавшаяся простотой конструкции. ВЭУ имела центробежный регулятор частоты вращения ветроколеса. В 1941-м по заданию Главного управления Северного морского пути (ГУ СМП) для электроснабжения арктической автоматической радиометеостанции была разработана ветроустановка с прямым приводом магнитоэлектрического многополюсного генератора от ветроколеса ВИСХОМ УД-1,9 с центробежным регулятором, который мог работать в широком диапазоне ветров вплоть до 50 м/с. Автором разработки был В.В. Уткин-Егоров [10].

Арктический опыт эксплуатации ВЭУ

После сельскохозяйственных объектов вторым по объёмам применения рынком ветроэлектроустановок в СССР были полярные станции СМП в Арктике. Инициатором их массового применения был советский исследователь Арктики, начальник Главсевморпути И.Д. Папанин. Внедрением и обслуживанием ВЭУ руководил Владимир Иосифович Сидоров,



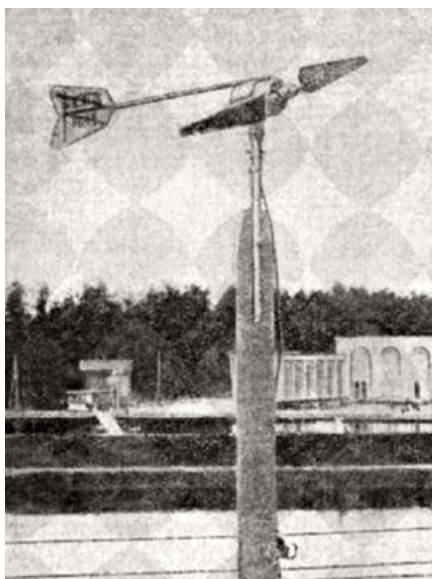
В.В. Уткин-Егоров



И.Д. Папанин



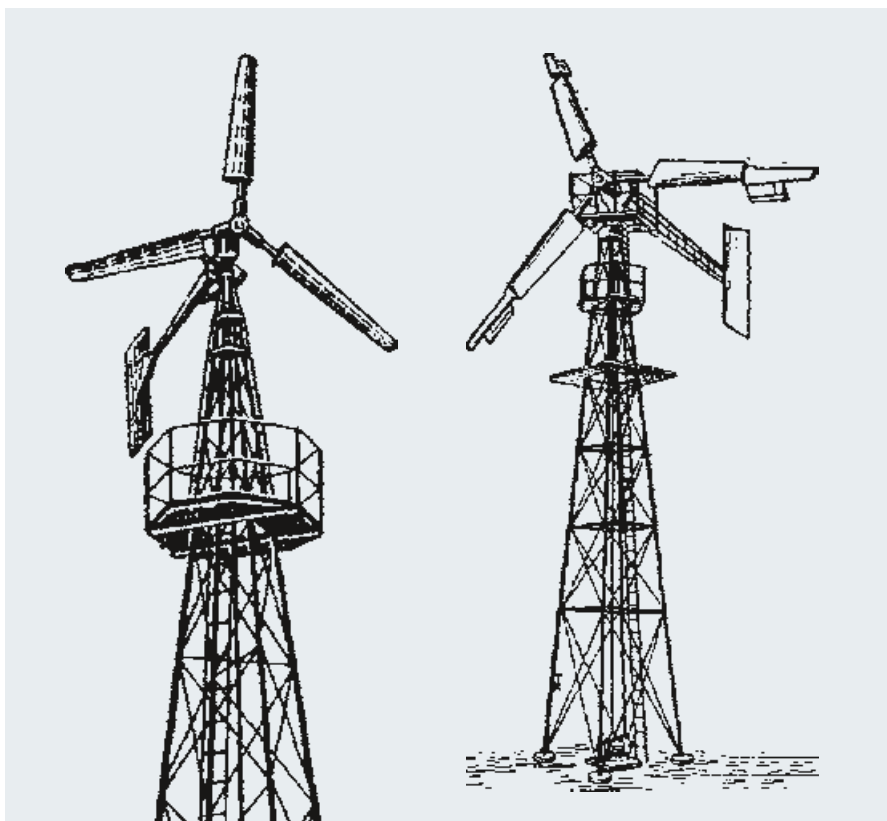
В.И. Сидоров



Ветроустановка ВИСХОМ РД-1,5

который с 1934 года занимался эксплуатацией арктических ВЭУ, а на полярной станции на острове Новая Земля в 1936-м проводил эксперименты по получению водорода методом электролиза на ВЭУ и работе на нём поршневой электростанции взамен бензина (в течение часа).

В его книге [5] представлен анализ результатов эксплуатации ветроэлектроустановок на станциях СМП с 1932 по 1945 годы. После войны там работали 49 ветроэлектроустановок, в том числе 17 ВЭУ Д-12 мощностью по 15 кВт, 22 ВЭУ Д-5 мощностью по 2,6 кВт и десять ВЭУ ВИСХОМ Д-3 мощностью по 1 кВт каждая. При этом ВЭУ Д-12 работали по 12 лет, а ВЭУ типа ВИСХОМ УД-1,9 мощностью 100 Вт для электропитания радиостанций функционировали без обслуживания по 20 месяцев.



Ветроэлектрические установки Д-5 и Д-12, работавшие в арктических условиях СМП [10]

Иллюстрация: [10]

Срок окупаемости ВЭУ составлял от четырёх до пяти лет. С 1932 по 1940 годы за счёт эксплуатации ВЭУ количество завозимого топлива уменьшилось в три раза. Интерес представляют рекомендации по устройству фундаментов, борьбе с инееобразованием и прочее. Приведена десятилетняя статистика отказов и экономических показателей эксплуатации ВЭУ.

Практика арктической эксплуатации показала следующую конфигурацию энергоустановки: ВЭУ мощностью 15 кВт, резервная дизельная электростанция, ёмкость электрических аккумуляторов выбиралась из расчёта времени запуска резервной дизельной электростанции.

В 1946 году на полярных станциях СМП были установлены ВЭУ ВИМЭ Д-18 с синхронным генератором (40 кВт) и вертикальной трансмиссией. Был сделан вывод, что для бесперебойной надёжной работы ветроустановок любой мощности требуется грамотное техническое обслуживание, что весьма актуально и в наши дни. В.И. Сидоров в 1947 году на научно-технической конференции доложил результаты создания и многолетней эксплуатации ветроводородной системы в арктических условиях.

Истринский филиал ВНИИ электромеханики

В 1948 году в составе СМП под руководством В.И. Сидорова была организована Научно-исследовательская лаборатория (НИЛ), а в 1949-м на её базе Постановлением Правительства СССР в городе Истра Московской области, также под руководством В.И. Сидорова, была создана Центральная научно-исследовательская лаборатория по ветродвигателям и ветроустановкам (ЦНИЛВ) с подчинением союзному Министерству тракторного и сельскохозяйственного машиностроения.

В 1949-м в Истре была построена ветроэлектрическая установка мощностью 50 кВт с полным циклом получения водорода по новой технологии электролиза воды. Дальнейшее развитие водородной энергетики В.И. Сидоров связывал со строительством пятимегаваттных ВЭУ конструкции Ю.Н. Кондратюка.

В 1954 году научно-исследовательская лаборатория во главе с В.И. Сидоровым была преобразована в Истринский филиал ВНИИ электромеханики (ИФ ВНИИЭМ), в котором было создано конструкторское бюро и опытное производство.

В 1957 году ИФ ВНИИЭМ построил в совхозе «Авангард» Целиноградской области Казахской ССР ветродизельную электростанцию мощностью 400 кВт. Она состояла из 12-ти трёхлопастных ветро-

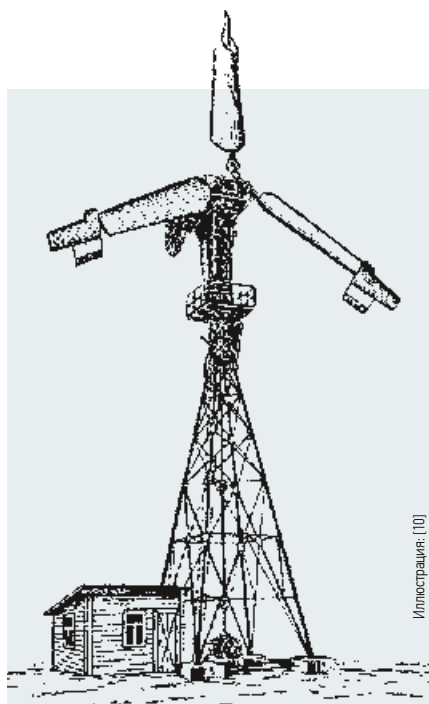
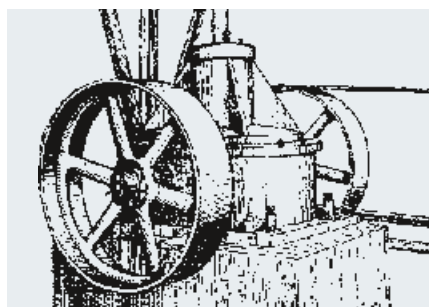


Иллюстрация: [10]

ВЭУ ВИМЭ Д-18 [10]



Редуктор ВЭУ ВИМЭ Д-18 [10]

электрических установок типа Д-18-СУ-3, с соосным расположением генераторов постоянного тока и лопастей, единичной мощностью по 40 кВт, которые были установлены на расстоянии 200–260 м друг от друга. Ветроэлектрические установки работали совместно с двумя дизель-генераторами мощностью по 200 кВт каждый. Их совмещение обеспечивалось преобразователями постоянного тока. Данная ВДЭС успешно работала семь лет — с 1957 по 1964 годы. В отдельные месяцы выработка ВЭУ достигала 55 % [10, 11].

В Истринском филиале ВНИИЭМ под руководством лауреата Государственной премии В.И. Сидорова велись работы по созданию серии новых ветроэнергетических установок мощностью от 1 до 30 кВт вплоть до 1975 года.

Объединение «Ветроэн»

В конце 1950-х годов в СССР научные и конструкторские работы продолжались в ЦАГИ, ВИМЭ (с 1957 года — ВИЭСХ), ВИСХОМ и ВНИИЭМ. Ветроустановки производились 44-я заводами, а максимальное их количество (9142 шт.) было выпущено в 1955 году.

В 1956 году в стране работали 3000 шт. тихоходных зарядных ВЭУ (ВЭ-2) мощностью по 100 Вт. В регионах, например, в Краснодарском крае ветроустановки ТВ-8 обеспечивали до 30 % энергопотребления животноводства.

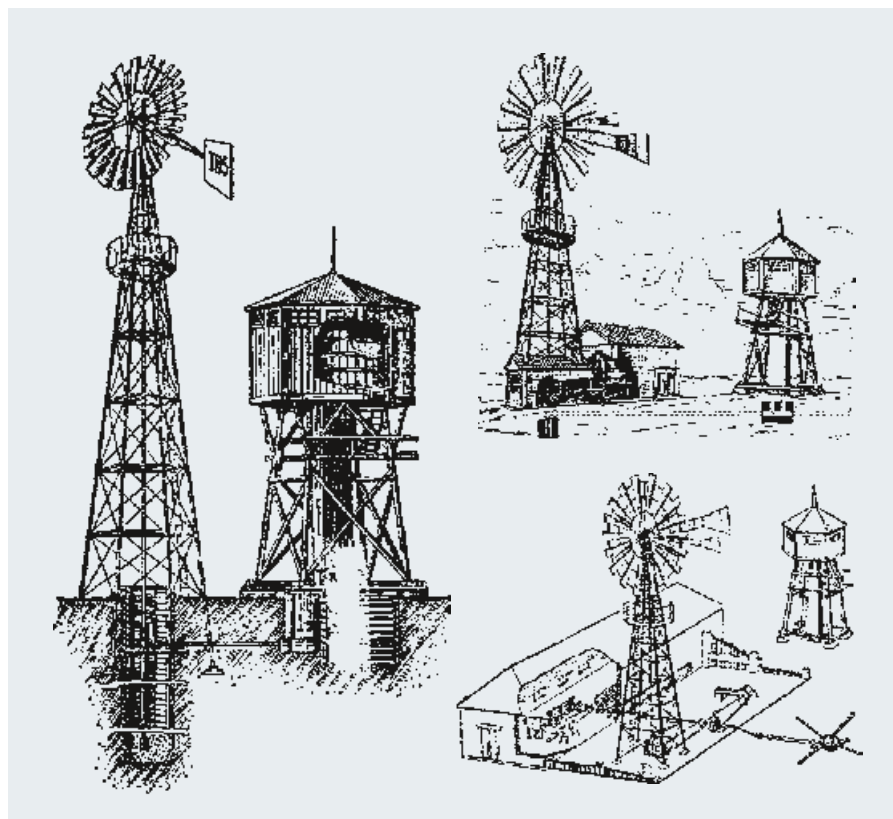


Иллюстрация: [10]

Применение тихоходных ВЭУ ТВ-5 и ТВ-8 в сельском хозяйстве: водоснабжение, полив, обмолочивание, помол, работа кормоцеха и поилки для скота [10]

В 1950-е годы, в связи с массовой электрификацией колхозов и совхозов вследствие их подключения к расширяющейся системе централизованного электроснабжения, началось сворачивание ветроэнергетики. В стране остались практически только две-три организации разработчиков ветродвигателей и ветроэлектростанций: ЦАГИ, ВИАЭХ в Москве и ВНИИЭМ в городе Истра. Эти организации в 1960–1970-х годах разработали для сельского хозяйства более пяти новых ветряных водоподъёмных установок [11].

В 1975 году, на базе коллектива отдела ветроэнергетики Истринского филиала ВНИИ электромеханики, В.И. Сидоровым было организовано НПО «Ветроэн» Министерства водного хозяйства СССР, в задачи которого входили: научные и конструкторские разработки, выполнение проектов привязки ВЭУ, их серийное производство, обслуживание и ремонт. По существу, это было единственное в советском государстве предприятие полного цикла изготовления оборудования для ветроэнергетики. Производство ВЭУ было организовано в ряде филиалов НПО «Ветроэн»: в городах Астрахани и Уфе, а также в Киргизской ССР (город Фрунзе) и в Казахской ССР (город Караганда).

Самой работоспособной конструкцией ветродвигателя НПО была АВЭУ-6-4 мощностью 4 кВт, разработанная к.т.н. В.Е. Федотовым в Истринском филиале ВНИИЭМ и представленная на государственные испытания в 1970 году. Она имела рабочее колесо с двумя лопастями диаметром 6 м. Высота опорной мачты — 9 м, диапазон рабочих скоростей ветра — 5–40 м/с, виндовый механизм разворачивал двигатель «на ветер». Главное достоинство этого агрегата — надёжность и устойчивость в работе, высокое качество работы центробежно-аэродинамического регулятора частоты вращения ветроколеса.

Длительные испытания АВЭУ-6-4 на Мархотской испытательной базе НПО (посёлок Кабардинка, город Геленджик) показали, что при скорости ветра 40 м/с частота тока генератора чётко ограничивается верхним пределом частоты 52,5 Гц [11]. В 1972 году производство данных ВЭУ было начато на заводе «Тяжэлектромаш» в городе Фрунзе, а с 1977-го — на заводе «Ветроэнергомаш» (город Астрахань). В 1980-е годы на этом заводе ежегодно производились до 500 таких ВЭУ. В 1990 году в РСФСР только в сельском хозяйстве эксплуатировались 2000 АВЭУ-6-4.

Положительный пятилетний опыт эксплуатации этих агрегатов был накоплен на Новолазаревской антарктической стан-



Ветроустановка АВЭУ-6-4

ции при температурах до -50°C и скорости ветра до 40 м/с. В 1981–1985 годах там работали на обогрев помещений четыре агрегата, а с 1986 года — шесть, каждый из которых в год замещал четыре тонны дизельного топлива. Наибольшее количество АВЭУ-6-4 — 26 шт. на одном объекте (рыбзавод) — было установлено в 1980-х годах на острове Сааремаа в Эстонии, они обеспечивали подогрев воды. Новое, некомпетентное руководство НПО «Ветроэн» додумалось объединить большинство этих ветроэлектростанций в параллельную работу, в результате чего большинство из них довольно быстро вышло из строя. Этим было серьёзно подорвано доверие к малой ветроэнергетике.

НПО «Ветроэн» также серийно производило зарядные ветроустановки мощностью 100–250 Вт и водоподъёмные установки механического типа производительностью до $1\text{ м}^3/\text{ч}$.

Удачными конструкциями отличались ВЭУ Рыбинского завода приборостроения с приводом электродизельной опреснительной установки УВЭО-0,5 со среднесуточной производительностью 4 м^3 , а также двухлопастная ВЭУ «Шексна-0,5» мощностью 500 Вт.

В 1990-е годы главным конструктором НПО «Ветроэн» Л.И. Терентьевым были разработаны перспективные модели ВЭУ АВЭУ-16, АВЭС-100, АВЭС-250. Двухлопастная ветроустановка АВЭУ-16 (16 кВт) предназначалась к производству на заводе в городе Уфе, однако производство так и не было начато. АВЭС-100 мощностью 100 кВт была разработана для автономного режима работы, а АВЭС-250 мощностью 250 кВт — для параллельной работы с энергосистемой. В этих установках применялось ветроколесо с тремя стеклопластиковыми лопастями, гидравлический привод разворота лопастей, устройство автоматической раскрутки кабеля. В 1992 году производство АВЭС-250 было начато в НПО «Южное» (город Днепрпетровск, Украина).

На Воркутинской ВЭС (на водозаборе в 32 км от города Воркуты) в экспериментальном режиме с 1995 по 2006 годы работали пять из шести установленных АВЭС-250.

В сооружении и эксплуатации в первые годы Воркутинской и Анадырской ветроэлектростанций определяющую роль сыграли руководитель «Ветроэна» тех лет Юрий Иванович Новак и главный инженер Василий Яковлевич Шеин. Следует отметить очень сильный в те годы коллектив научно-исследовательского и проектного института «ПечорНИИпроект» (город Воркута), специалисты которого в сотрудничестве с Северным отделением НИИ оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеева (СНИИОПС, Воркутинский филиал бывшего Всесоюзного института мерзлотоведения) разработали и запатентовали уникальную конструкцию сборного железобетонного «надземного» фундамента ВЭУ для вечномёрзлых грунтов. Конструкция этого фундамента была применена и на Анадырской ВЭС.



Воркутинская (Заполярная) ВЭС в наши дни

Фото: wikipedia.org



Анадырская ВЭС на мысе Обсервация, Чукотский АО

В 2001 году на мысе Обсервация Чукотского автономного округа НПО «Ветроэн» совместно с ГKB «Южное» (город Днепрпетровск) была построена Анадырская ВЭС мощностью 2,5 МВт, на которой были установлены десять ветроагрегатов АВЭ-250 СМ в северном исполнении, произведённые ГKB «Южное». На первом этапе до 2002 года ВЭС работала параллельно с ДЭС посёлков Шахтёрский и Угольные Копи. Были опробованы режимы поагрегатной остановки двигателей ДЭС до полного замещения при порывах ветра до 40 м/с и температуре воздуха до -40°C [12].

В 2002 году данная ВЭС была переключена на совместную работу с Анадырской ТЭЦ мощностью 10 МВт. В 2016–2018 годах шесть агрегатов АВЭ-250 СМ заменили на шесть датских установок Micon-530 единичной мощностью по 250 кВт, а также была выполнена модернизация четырёх АВЭ-250 СМ.

К середине 1980-х годов относится наиболее серьёзная попытка возродить на новом техническом уровне ветроэнергетику Советского Союза, предпринятая Бюро Совета Министров СССР по топливно-энергетическому комплексу. Результатом сложнейшей аналитической, согласовательной и организационной работы учёных, сотрудников министерств, комитетов и бюро по ТЭК явилось Постановление Совета Министров СССР от 17 сентября 1987 года №1052 «Об ускоренном развитии ветроэнергетической техники в 1989–1995 годах».

На одного из авторов этих строк были возложены обязанности «выпускающего» этого Постановления и контроль за его выполнением. Как единственный из оставшихся в живых свидетель «борьбы» за утверждение постановления, автор свидетельствует о решающей роли в продвижении Постановления председателя Бюро Совета Министров СССР по ТЭК, заме-

стителя председателя СМ СССР Б.Е. Щербины. С его непосредственной помощью были преодолены основные трудности в согласовании документа на уровне Президиума Совмина СССР. Всего в Постановлении было задействовано девять министерств и комитетов, Академия наук СССР, пять союзных республик.

Нельзя не отметить комплексный характер постановления, в котором были предусмотрены государственные цели по выпуску ветроустановок, определена производственная база, предусмотрено соответствующее финансирование, названы конкретные исполнители, а также предусмотрены меры по преодолению существующих в то время организационных и экономических барьеров.

В соответствии с Постановлением на НПО «Ветроэн» Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР возлагались функции головной организации по созданию и внедрению в народное хозяйство автономных ветроэнергетических установок мощностью до 100 кВт, а на Министерство энергетики и электрификации СССР возлагались функции головного министерства по проектированию, строительству и эксплуатации ветроэлектрических станций мощностью более 100 кВт, предназначенных для работы в энергосистемах, а также разработка технических требований на оборудование таких станций.

В 1980-х годах имела место серьёзная попытка возродить на новом техническом уровне советскую ветроэнергетику — в 1987 году было принято Постановление Совета Министров СССР №1052 «Об ускоренном развитии ветроэнергетической техники в 1989–1995 годах»

К тому времени существовало небольшое производство автономных ВЭУ. В Постановлении было предусмотрено его масштабное расширение, а именно было предписано «произвести ветроэлектрические установки единичной мощности до 100 кВт в 1988–1990 годах 14,3 тыс. комплектов общей мощностью 67 МВт, а в 1991–1995 годах — 43 тыс. комплектов общей мощностью 217 МВт».

Что касается «системных» ВЭУ, то на момент выпуска постановления не было серьёзных исследований по возможному размещению ВЭС, а также отсутствовали серьёзные работы по конструкции ВЭУ, отсутствовала и производственная база, то есть весь научный и производственный потенциал был фактически потерян.

Здесь следует сказать, что руководство НПО «Ветроэн» оказалось неспособным ни технически, ни организационно к выполнению планируемых к решению задач, хотя и выступало одним из инициаторов подготовки Постановления. Оно решило спрятаться за факт непоставки Минэлектротехпромом СССР генераторов мощностью 4, 8, 16 и 30 кВт и таким образом уйти от ответственности, фактически «утробив» порученное дело.

В Министерстве энергетики и электрификации СССР под руководством заместителя министра А.Ф. Дьякова были разработаны проекты системных ветроэнергетических установок единичной мощностью 250 и 1000 кВт и проект Калмыцкой ВЭС мощностью 22 МВт. В МКБ «Радуга» (город Дубна Московской области) под руководством академика РАН И.С. Селезнёва был разработан, изготовлен и впоследствии смонтирован на упомянутой выше Анадырской ВЭС первый агрегат мощностью 1000 кВт. Однако из-за недофинансирования довести до воплощения ветроустановку не удалось, и работы были прекращены на долгие годы.

Крымские ВЭС

Ветроэлектростанции на территории Республики Крым в составе Украины начали строиться в 1993 году. Первая Донузлавская ВЭС мощностью 6,78 МВт была построена в 1993-м в Сакском районе с 63-я ветроагрегатами USW-56-100, изготовленными в ГKB «Южное» (город Днепрпетровск, Украина) по лицензии фирмы Kenetech Windpower Inc. (США), единичной мощностью 107,5 кВт. Судакская ВЭС мощностью 3,76 МВт была построена в 2001-м и состояла из 36 агрегатов USW-56-100. В 1996 году ГKB «Южное» по лицензии бельгийской фирмы Turbowind освоило производство ветроустановок единичной мощностью 600 кВт.

В 1996–2000 годах была построена Сакская ВЭС с Мироновскими и Воробьёвскими ветростанциями суммарной мощностью 20,82 МВт в составе 177 ветроустановок USW-56-100 и трёх Т600-48. На Тарханкутской ВЭС мощностью 22,45 МВт в 2001 году были установлены 127 ВЭУ USW-56-100 и шесть Т600-48. Восточно-Крымская ВЭС мощностью 2,81 МВт имеет 15 ВЭУ USW-56-100 и две Т600-48. На Пресноводненской ВЭС мощностью 7,39 МВт в 2009 году были установлены 52 ВЭУ USW-56-100 и три AN Bonus 600.



Донузлавская ВЭС (Республика Крым) в 2008 году



Мироновский участок Сакской ВЭС в Республике Крым

В 2014-м была построена самая мощная в то время в Крыму Останинская ВЭС мощностью 25 МВт с десятью ВЭУ WTU-2,5 немецкого концерна Fuhrländer единичной мощностью 2,5 МВт. Производство этих ветроэлектроустановок было локализовано в городе Краматорске Донецкой области Украины на ООО «Фурлендер Винд Технолоджи», с изготовлением башен, анкерных корзин, стеклопластиковых гондол.

Таким образом, на Крымских ВЭС в 1993–2005 годах было установлено 469 ВЭУ типа USW-56-100 общей мощностью 46,9 МВт. Из них в 2020 году отработали расчётный ресурс и в большей своей части требуют замены 402 ВЭУ. Из 11 ВЭУ типа Т600-48 общей мощностью 6,6 МВт отработали расчётный ресурс девять ВЭУ.

Сетевая ветроэлектростанция в Калининградской области

Первая сетевая ветроэлектростанция в современной РФ — Куликовская ВЭС — была построена по инициативе и при активном участии на всех этапах тогдашнего генерального директора АО «Янтарьэнерго» (город Калининград) Бориса Семеновича Затоплиева (1937 г.р.) [13]. В 1998–2000 годах около посёлка Куликово Калининградской области были уста-

новлены 20 агрегатов V27-225 датской фирмы Vestas единичной мощностью по 225 кВт каждая, проработавшие ранее в Дании семь лет, и один новый агрегат той же фирмы мощностью 600 кВт. Максимальная выработка ВЭС была достигнута в 2003-м — 6,604 млн кВт·ч, при этом коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) составил 16,2%. В настоящее время 20 ветроагрегатов V27-225 демонтированы, семь из них после реновации найдут «третью жизнь».



Ветроагрегаты Куликовской ВЭС в 2015 году

Ветроустановка же мощностью 600 кВт находится в рабочем состоянии, но не эксплуатируется. Земля, занимаемая ранее 20-ю ветроустановками Куликовской ВЭС, ныне рекультивирована. Получен опыт демонтажа оборудования устаревшей ВЭС, который не хотелось бы использовать в ближайшие 20–25 лет.

В 2018 году взамен устаревшей Куликовской ВЭС вблизи посёлка Ушаково Гурьевского района Калининградской области была построена Ушаковская ВЭС мощностью 6,9 МВт, с тремя агрегатами немецкой фирмы Enercon E70/2300, а так как она строилась взамен Куликовской, то её мощность в настоящее время ограничена до 5,1 МВт.

Российская сетевая ветроэнергетика

Опыт создания ЦАГИ в 1931 году первой в СССР и самой мощной (до 1940-го) сетевой Балаклавской ВЭС мощностью 100 кВт не получил дальнейшего развития в последующие годы. Разработанные НПО «Ветроэн» и изготовленные КБ «Южмаш» сетевые ветроагрегаты АВЭ-250 СМ с 1995 по 2000 годы были установлены на Воркутинской ВЭС мощностью 1,5 МВт и на Анадырской ВЭС мощностью 2,5 МВт.

В Крыму с 1993 по 2005 годы были построены девять сетевых ветростанций, на которых установили 469 ветроагрегата USW-56-100 общей мощностью 46,9 МВт, 11 установок Т600-48 общей мощностью 6,6 МВт, три агрегата AN Bonus 600 KW общей мощностью 1,8 МВт, а также десять ветроагрегатов WTU-2,5 общей мощностью 25 МВт.

Современный российский рынок ветроэнергетики был создан после принятия Постановления Правительства РФ от 23 января 2015 года №47-ПП, которое обеспечивает субсидирование сооружение ВЭС мощностью свыше 5 МВт.

Инвесторы таких электростанций получают долгосрочные договоры о предоставлении мощности (ДПМ) на российском оптовом рынке после отбора их проектов на конкурсной основе. В отличие от европейских тендерных условий, данная схема предлагает победителям плату за мощность в мегаваттах и выработку электроэнергии в МВт·ч.

В соответствии с условиями ДПМ потребители оптового рынка обязаны в течение 15 лет (срок действия договоров) выплачивать регулируемые вознаграждения за отпущенную ВЭС электроэнергию по льготным тарифам.

Такие конкурсы проводятся регулирующим органом — Администратором торговой системы (АТС) — ежегодно при участии Совета рынка и «СО ЕЭС». В первом туре проекты отбираются по двум критериям: максимально допустимые капитальные затраты на 1 кВт и по требованиям локализации. В 2020 году максимально допустимые капитальные затраты ВЭС составляли 109 451 руб. за 1 кВт. На 2020 год степень локализации



Фото: АО «Янтарьэнерго», uanlarenrgo.ru

■ Ушаковская ВЭС около посёлка Ушаково, Калининградская область

была установлена в 65%. Постановление №47-ПП обязывает региональные сетевые компании закупать электроэнергию, произведённую ВЭС, для компенсации до 5% прогнозируемых потерь в электросетях. Во втором туре отбор производится по минимальным капитальным затратам на реализацию проекта.

Победившая организация получает гарантии стабильной рентабельности 12% и выгодные тарифы на электроэнергию, но обязана завершить строительство ВЭС и обеспечить выполнение требований по локализации производства их оборудования. Ветроэлектрическая станция должна иметь коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) в течение года не менее 0,15.

В России в настоящее время самой крупной организацией по сооружению ВЭС является Фонд развития ветроэнергетики (ФРВ) на основе редукторных конструкций ВЭС фирмы Vestas (Дания), созданный УК «Роснано» и ПАО «Фортум», с программой строительства до 2024 года ВЭС суммарной мощностью 1,8 ГВт.

ФРВ в 2019 году развернул производство с годовой программой 300 МВт в год (в том числе гондол — в городе Нижний Новгород), включая 300, а в перспективе и 500 лопастей — в городе Ульяновске, башен — в городе Таганроге. Вторым по масштабам строительству ВЭС является АО «НовоВинд» (ГК «Росатом»), создавшее совместное предприятие RedWind B.V. — 51% Windar Renovables (Испания), 24,5% ГК «Роснано» и 24,5% ПАО «Северсталь», на основе безредукторной ВЭУ по лицензии фирмы Lagenway (Дания), с программой строительства до 2024 года ВЭУ суммарной мощностью 1 ГВт.

АО «НовоВинд» в 2020 году развернуло производство с годовой программой до 300 МВт в год, в том числе генераторов, кожухов, гондолы, ступиц и обтекателей на заводе «Атоммаш» и башен на заводе «Ветростройдеталь» в городе Волгодонске. Третьим игроком на российском рынке ветроэнергетики является партнёрство ПАО «ЭНЕРЛ Россия» и фирмы «Сименс Гамеса Реньюэбл Энержи», на основе редукторных ВЭС Siemens Gamesa, с программой строительства до 2024 года ВЭС суммарной мощностью 0,3 ГВт с годовой программой 300 МВт и производством в Санкт-Петербурге.

В табл. 2 представлены основные характеристики современных сетевых ВЭС.

■ Современные российские сетевые ВЭС

табл. 2

Название, адрес	Установленная мощность, МВт	Год ввода в экпл.	Оборудование	Собственник
«Ульяновск-1» (с. Красный Яр, Чердаклинский район, Ульяновская область)	35	2018	DongFang Electric Co. DF 2,5 MW (КНР) [2,5 МВт, 14 шт.]	ПАО «Фортум»
«Ушаковская» (пос. Ушаково, Гурьевский район, Калининградская область)	5,1 (6,9)	2018	Enercon E70/2300 [2,3 МВт, 3 шт.]	АО «Янтарьэнерго»
«Ульяновск-2» (с/п Октябрьский, Чердаклинский район, Ульяновская область)	50	2019	Vestas (Дания) [3,6 МВт, 14 шт.]	ПАО «Фортум»
«Адыгейская» (Шовгенковский и Гиангинский районы, Республика Адыгея)	150	2020	Lagerwey L 100-2,5 [2,5 МВт, 60 шт.]	АО «НовоВинд»
«Сулинская» (Красносулинский район, Ростовская область)	100	2020	Vestas V126-3.45 MW (Дания) [3,8 МВт, 26 шт.]	ООО «Второй ветропарк ФРВ»
«Гуковская» (Ростовская область)	100	2020	Vestas V126-3.45 MW (Дания) [3,8 МВт, 26 шт.]	ООО «Второй ветропарк ФРВ»
«Каменская» (Каменский район, Ростовская область)	100	2020	Vestas V126-3.45 MW (Дания) [3,8 МВт, 26 шт.]	ООО «Второй ветропарк ФРВ»
«Юстинская» (Республика Калмыкия)	15	2020	600 кВт, 25 шт.	ВЭС «Бриз»

Ветродизельные электростанции

Как было указано выше, в СССР имелись апробированные многолетней эксплуатацией примеры реализации ВДЭС. В 1930-е годы на полярных арктических станциях работали ВДЭС в составе ветродвигателя Д-12 с электрогенератором мощностью 15 кВт, дизель-генератором той же мощности, электрическими аккумуляторами, а с 1947 года — с ветродвигателями Д-18 мощностью 25 кВт.

В 1949 году на днепровском острове Хортица (Украинская ССР) на базе ветродвигателя Д-18 мощностью 25 кВт с вертикальной трансмиссией была построена ВДЭС с синхронным генератором и дизель-генератором той же мощности. В 1956 году в Акмолинской области Казахской ССР на базе ветродвигателя Д-18-СХ-3 с электрогенератором на одной оси с ветроколесом была построена ВЭУ мощностью 50 кВт. В 1957 году также в Казахстане с 12-ю такими же ветроагрегатами общей мощностью 400 кВт была построена ВДЭС с двумя дизель-генераторами мощностью по 200 кВт [11].



Ветродизельный комплекс в посёлке Усть-Камчатское, Камчатский край

Доля (замещения) ВЭС в 2018 году — 7,24%, а годовая экономия топлива достигла 363 т.н.т. (18 млн руб.). За период с 2015 год по первый квартал 2019 года выработка ДЭС составила 14 510 тыс. кВт·ч; выработка ВЭУ — 1562 тыс. кВт·ч; доля замещения ВЭУ — 10,8%; экономия топлива — 344 т.н.т. стоимостью 14 млн руб.

В 1996 году в селе Никольское на острове Беринга (Командорские острова, Алеутский район Камчатского края) были установлены две ВЭУ Micon М 600-250/50 (Дания) мощностью по 250 кВт [14]. После их выхода из строя в 2013 году там же смонтировали две ВЭУ Vergnet GEV-MP-C мощностью по 275 кВт каждая, а для сглаживания нагрузок были установлены электробойлеры и АСУ для совместной работы ВЭУ и ДЭС Danvest.

В 2019 году в работе были две ВЭУ типа Vergnet суммарной установленной мощностью 550 кВт, а также ДЭС мощностью 292 кВт. По данным собственника ВДЭС ПАО «Передвижная энергетика», доля замещения ВЭУ в 2018 году составила 14%, а годовая экономия топлива — 111 т.н.т. стоимостью 5,2 млн руб. За период с 2015 года по первый квартал 2019-го при установленной мощности 550 кВт выработка ДЭС составила 14 510 тыс. кВт·ч; выработка ВЭС — 1560 тыс. кВт·ч; доля замещения ВЭУ — 10,8%; экономия топлива — 344 т.н.т. стоимостью 14 млн руб. [15].



Старая часть села Никольское на острове Беринга, Камчатский край

В табл. 3 представлены характеристики современных российских ветродизельных электростанций (ВДЭС).

Наибольший российский опыт эксплуатации ВДЭС в северных условиях имеется на Камчатке.

В 2014 году в посёлке Усть-Камчатское Камчатского края ПАО «Передвижная энергетика» была установлена ветроэлектрическая установка Vergnet GEV-MP-C (Франция) мощностью 275 кВт, которая за 2018 год выработала 129 430 кВт·ч. В 2016-м там же по заказу правительства Камчатского края смонтировали три ВЭУ фирмы Komaihaltek (Япония) мощностью по 300 кВт, которые за 2018 год выработали 1 516 820 кВт·ч электроэнергии. Суммарная мощность Усть-Камчатской ВЭС составляет 1175 кВт.

Современные российские ветродизельные электростанции (ВДЭС)

табл. 3

Название, адрес	Установленная мощность, МВт	Год ввода в экспл.	Оборудование	Собственник
«Никольская» (с. Никольское, о-в Беринга, Алеутский район Камчатского края)	0,55	1996/2013	Vergnet (Франция) [275 кВт, 2 шт.], ДЭС — 292 кВт, АСУ ВДЭС — Danvest	АО «Южные электрические сети Камчатки»
«Усть-Камчатская» (пос. Усть-Камчатский, Камчатский край)	1,175	2013–2015	Vergnet (Франция) [275 кВт, 1 шт.], Komaihaltek 300 [300 кВт, 3 шт.]	АО «Южные электрические сети Камчатки»
«Октябрьская» (пос. Октябрьский, Усть-Большерецкий район, Камчатский край)	3,3	2008–2014	0,3 МВт [1 шт.], 2,4 МВт [0,6 МВт, 4 шт.], Nicon-400 по 400 кВт	АО «Камчатские электрические сети им. И.А. Пискунова»
«Новиковская» (с. Новиковское, о. Кунашир, Сахалинская область)	0,45	2015	ВЭУ — 225 кВт (2 шт.)	ПАО «Передвижная энергетика»
«Амдерма» (пос. Амдерма, Ненецкий АО), ДЭС — 460 кВт	0,2	2016	Vetrox Arctic CE-5050 компании Ghrepower (КНР) [50 кВт, 4 шт.]	Департамент ЖКХ МО «Поселок Амдерма»
«Тикси» [пос. Тикси, Республика Саха (Якутия)], ВЭС — 3 МВт	0,9	2018	Komaihaltek [0,3 МВт, 3 шт.], 3 дизель-генератора мощностью 3 МВт	ПАО «Передвижная энергетика»

По данным опыта эксплуатации ВДЭС АО «Южные электрические сети Камчатки» в селе Никольское и в посёлке Усть-Камчатск, выявлены следующие проблемы ВЭУ фирмы Vergnet: запуск в работу при температуре воздуха ниже -17°C невозможен; регулярный самопроизвольный переход в режим тестирования с последующим срабатыванием защиты с отключением агрегата; неоднократный выход из строя датчиков ветровой турбины; необходимость постоянного контроля вертикальности опор ВЭУ; регулярные сбои системы удалённого доступа ВДЭС; внеочередная замена программного обеспечения ВЭУ (в 2015 году).

Для ВЭУ фирмы Komaihaltek указаны следующие проблемы: разгерметизация гидравлики одного агрегата (износ манжеты масляного фильтра); периодическая остановка ВЭУ из-за загрязнения тормозного диска поворота гондолы вулканической пылью; регулярные сбои системы удалённого доступа ВДЭС [14].

Одной из первых современных ветродизельных электростанций, возведённых на вечной мерзлоте в Арктике, является ВДЭС в посёлке Амдерма (Заполярный район Ненецкого автономного округа, побережье Карского моря), построенная в 2017 году [16]. Численность населения посёлка около 350 человек; среднегодовая / максимальная скорости ветра — $8/42$ м/с; зимняя температура до -42°C ; обледенения, интенсивная метель/пурга.

Научно-техническое сопровождение проектирования объекта было выполнено коллективом НОЦ ВИЭ СПбПУ (директор В.В. Елистратов), проектирование и авторский надзор — компания «ВТР Инжиниринг» (директор М.А. Конищев). При реконструкции существующей ДЭС и её интеграции с ВЭУ была создана ВДЭС: три ранжированных по мощности ДЭС (в сумме 600 кВт) и четыре ВЭУ по 50 кВт с мачтами высотой по 26 м, китайского производства, адаптированные под местные климатические и логистические условия. В проекте была применена оригинальная модульная конструкция фундамента для вечной мерзлоты и система самоподъёма ВЭУ без применения крана.

Внедрение ВЭУ позволило снизить: годовой расход электроэнергии на собственные нужды — с 510 тыс. до 160 тыс. кВт·ч (более чем в три раза); годовой расход дизельного топлива — с 719 тыс. до 416 тыс. л (на 40%), то есть на 303 тыс. л в год (экономия — 12,5 млн руб. в год); объёмы выбросов углекислого газа — на 600 тонн, отсюда доход за счёт снижения экономически обоснованного тарифа составил 45 млн руб. в год.



ВЭУ V3C Ghrepower-50 (мощностью 50 кВт, в арктической версии) около посёлка Амдерма

В посёлке городского типа Тикси в Республике Саха (Якутия) в 2007 году была установлена «реанимированная» немецкая ВЭУ мощностью 250 кВт, которая через несколько лет вышла из строя. В 2018 году были установлены три ветроагрегата японской фирмы Komaihaltek мощностью по 300 кВт, адаптированных для работы в полярных условиях. Разработан проект ВДЭС, включающий ВЭУ общей мощностью 3 МВт и систему аккумулирования электрической энергии.

Российский рынок ВДЭС может быть сформирован в первую очередь для регионов Крайнего Севера, где проживает около 10 млн человек и куда ежегодно за-

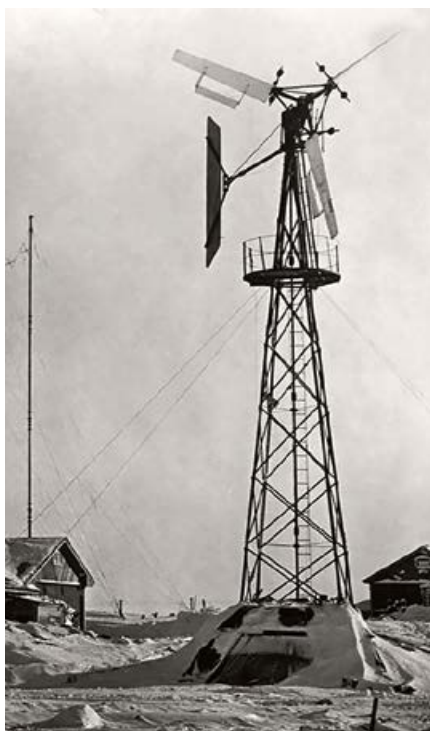
возится около 1 млн тонн дизельного топлива общей стоимостью около 100 млрд руб. («северный завоз») для 900 эксплуатируемых ДЭС, по данным Российского энергетического агентства (РЭА).

При средней установленной мощности 0,5 МВт суммарная мощность ДЭС составляет 450 МВт. Суммарные расходы бюджетов всех уровней регионов Крайнего Севера с изолированными энергосистемами в 2016 году составили 150 млрд руб., а перекрёстное субсидирование — 80 млрд руб., по данным Центра энергоэффективных технологий региона.

При условии перспективного сооружения ВДЭС в регионах Крайнего Севера для 20% ДЭС суммарная потенциальная мощность ВЭУ составит 90 МВт, а при средней единичной мощности 0,3 МВт их количество превысит 300 шт. При замещении ВЭУ всего лишь 10% ежегодно расходуемого топлива на ДЭС регионов Крайнего Севера экономия может составить 23 млрд руб.

Ветроэнергетические характеристики

Для проектирования ВЭУ принципиальное значение имеет получение достоверной информации об энергетических характеристиках ветра в месте сооружения станции. В России академическая наука систематически стала заниматься ветроэнергетикой в 1916 году, когда в составе Комиссии по изучению естественных производительных сил (КЕПС) Императорской Академии наук был создан энергетический отдел. В 1919 году им был издан том I «Ветер как двигательная сила», в котором был оценён ветроэнергетический потенциал России. В 1935 году д.т.н. Н.В. Красовским был разработан Атлас ветроэнергетических ресурсов СССР.



Ветроустановка Д-12 на полуострове Диксон в Арктике. 1930-е годы

Ветроэнергетический кадастр представляет собой совокупность аэрологических и энергетических характеристик ветра. Основными характеристиками ветроэнергетического кадастра являются: среднегодовая скорость ветра, годовой и суточный ход ветра, повторяемость скоростей, типы и параметры функций распределения скоростей, максимальная скорость ветра, распределение ветровых периодов и периодов энергетических затихий по длительности, удельная мощность и удельная энергия ветра, ветроэнергетические ресурсы региона. Информационную основу кадастра составляют данные многолетних (1940–1990) измерений на государственной сети метеорологических (3500) и аэрологических (150) станций. Рекомендуются данные прошли многократную и всестороннюю методическую и многолетнюю практическую апробацию и опубликованы в справочниках [17–19], в атласе [20].

Первым признанием необходимости развития возобновляемой энергетики на уровне Правительства РФ явилось поручение от 7 июня 1993 года министра топлива и энергетики России Ю.К. Шафранника, которое стоит процитировать: «Костюнину В. Н., Бушуеву В. В. (Это заместители министра. — Прим. авт.). Прошу вас организовать разработку концепции развития и использования возможностей малой и нетрадиционной энергетики в энергетическом балансе России. В концепции должны быть отражены региональные по значению запасы угля, нефти, газа, торфа, использование малых электростанций, энергии ветра, солнца, термальных вод... Данная концепция должна быть увязана с общей программой. О начале работы и первых выводах проинформируйте до 10 июля 1993 года...».

Выполнение поручения было возложено на П.П. Безруких, в то время первого заместителя начальника Главного управления энергоресурсосбережения и нетрадиционных видов энергии. Задача явилась принципиально новой, фактически был поставлен вопрос: «Сколько тонн условного топлива или киловатт-часов электроэнергии может дать возобновляемая энергетика?». Из ответа на него предполагалось сделать вывод — стоит ли ей заниматься? Оказалось, что к такой постановке вопроса учёные не были готовы, в том числе и члены рабочей группы, организованной для выполнения поручения министра. Тем не менее, в результате бурных дискуссий и оценки энергетических соотношений между приходящей на землю солнечной энергией (с одной стороны) и определяемой ею ветровой и гид-

Первым общепринятым в современных научных разработках принципом является использование энергии ветра в ветроэнергетических системах на определённой высоте H над поверхностью Земли

равлической энергией и биомассой (с другой стороны) удалось согласовать оценки валового, технического и экономического потенциала всех видов возобновляемых источников, за исключением геотермальной энергии, образование которой определялось другими закономерностями.

Концепция была подготовлена в указанный срок, обсуждена на заседании коллегии Минтопэнерго по докладу П.П. Безруких и утверждена министром Ю.К. Шафранником 3 ноября 1994 года [21].



Необходимо отметить, что для написания концепции, а также последующих работ в качестве основы были использованы данные о ветре из справочников по климату СССР, публикуемые Главной геофизической обсерваторией имени А.И. Воейкова. Данные этих справочников были обобщены в атласах ветрового и солнечного климатов России, разработанных сотрудниками указанной выше обсерватории, под редакцией д.г.н. М.М. Борисенко и к.г.н. В.В. Стадника (атлас опубликован в 1997 году) [22].

Далее, в 2000 году НПО «Российско-Датским институтом энергоэффективности» был разработан «Атлас ветров России», в котором нашли отражение последние данные по ветру различных метеостанций РФ и отмечены территории страны с различными скоростями ветра и удельной мощностью ветра на высоте 50 м [20]. Однако для перехода от скорости ветра к ресурсам ветровой энергии требовалось разработать методику опре-

деления валового, технического и экономического ресурсов. Это было выполнено в докторской диссертации П.П. Безруких, защищённой в 2002 году, основные результаты которой изложены в [23].

Для оценки валового потенциала были приняты и развиты существующие принципы использования ветра. Первым общепринятым в современных научных разработках принципом является использование энергии ветра в ветроэнергетических системах на определённой высоте H над поверхностью Земли.

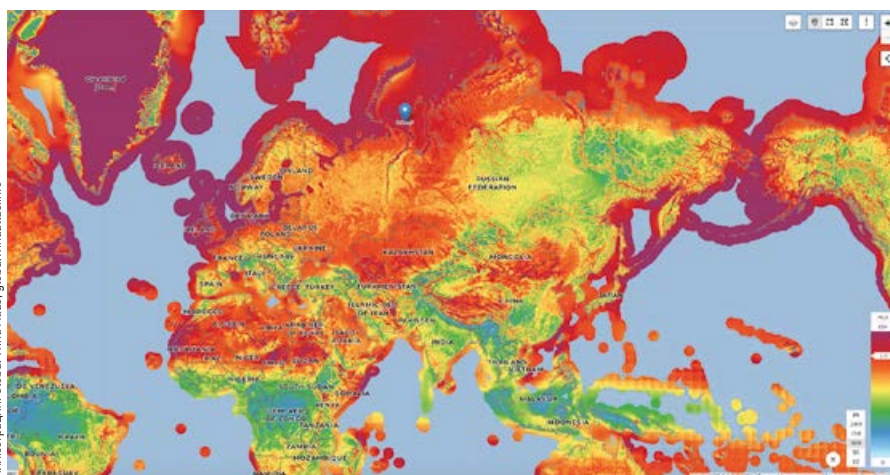
В соответствии с определением, валовый потенциал рассчитывается как суммарная энергия воздушных масс, использование которой возможно современными ветроэлектрическими установками с максимально большой высотой захватываемого приземного слоя H и соответственной высотой оголовка ветротурбины h . На современных ветроустановках мощностью 750 кВт высота оголовка составляет 60–80 м, а диаметр ветроколеса равен 50–80 м. Серийными установками стали ВЭУ мощностью 1000–1500 кВт с ещё большими высотами башен и диаметром ветроколеса. Поэтому в работе принимается значение $h = 75$ м, при этом толщина используемого слоя воздушных потоков H составляет примерно в два раза большую величину, то есть 150 м.

Вторым принципом, принятым на основании имеющихся исследований, является утверждение, что при обтекании воздушными потоками препятствия («воздушной плотины») высотой H возмущённый поток полностью восстанавливается на расстоянии $20H$ после препятствия.

На основании изложенных принципов устанавливается, что максимально полное использование энергии ветра осуществляется ветроэнергетической системой «воздушных плотин» высотой H , ориентированных перпендикулярно направлению ветра и отстоящих друг от друга на расстоянии $20H$, так что полная ветровая энергия, захватываемая установками по площади территории S в год, представляет валовый потенциал территории W_B [Вт·ч/(м³·год)], который при удельной энергии ветра E_B [кВт·ч/(м²·год)] равен:

$$W_B = E_B \frac{S}{20} = \frac{1}{40} \rho T S \sum_{i=1}^n (v_i^3 p_i),$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м³; T — число часов в году, $T = 8760$; S — площадь территории, м²; v_i — среднемноголетняя скорость ветра в i -м диапазоне; p_i — вероятность нахождения скорости в i -м диапазоне. Получается, казалось бы, парадоксальный результат: валовый потенциал не зависит от высоты приземного слоя.



❖ Среднегодовые скорости ветра по данным Мирового ветрового атласа (Global Wind Atlas)

Вопрос в том, какую скорость необходимо взять для расчёта валового потенциала. Вообще, следует учесть профиль скорости ветра по высоте от 0 до H . В первом приближении следует рассчитать скорость ветра по высоте, определить среднее значение и по этому значению вычислить необходимые для расчёта v_i и p_i .

Однако для оценочных расчётов валового потенциала с достаточной точностью можно принять скорость ветра равной скорости ветра на высоте h , составляющей примерно половину H . При этом технический потенциал определялся как часть валового с учётом известных ограничений по площади размещения ВЭС. Далее работа по определению ресурсов ВИЭ была проведена большим коллективом авторов и опубликована в справочнике под редакцией П. П. Безруких [24]. Дальнейшее совершенствование методики определения технического потенциала было выполнено д.т.н. В. Г. Николаевым, который предложил определять потенциал по произведённой электроэнергии модельного ВЭУ на площади субъекта РФ, с учётом технических и экологических ограничений, а также выполнил ряд ТЭО сооружений ВЭС и программ использования ветровой энергии в регионах России. Также представляют практический интерес работы д.т.н. В. В. Елистратова и д.ф.м.н. А. А. Соловьёва, предложивших при определении технического потенциала учитывать ограничения технического и географического характера.

По предложению д.т.н. В. В. Елистратова [16, 25] оценку ветроэнергетических ресурсов в условиях ограниченной исходной климатической информации, для повышения точности и достоверности результатов, целесообразно проводить по трёхуровневой методике. На первом уровне, на основании атласа ветров России, климатических справочников, кадастровых и других интегральных оценок

ветрового режима, производится предварительная крупномасштабная оценка ВЭР и выбор перспективного региона.

На втором (региональном) уровне оценки ВЭР, после выбора перспективного района, производится мезомасштабное численное моделирование ветрового потока на произвольной высоте над уровнем земли. При моделировании используются: спутниковые данные о скорости и направлении ветра, мезомасштабная цифровая модель рельефа с разрешением до 10 км, цифровая модель шероховатости с разрешением 0,5–10 км. В качестве исходных данных ветрового режима используются многолетние (30 лет и более) расчётные почасовые данные по скорости и направлению ветра, полученные в результате численного прогнозирования погоды. На основании данных региональных климатических наблюдений (давление, температура, влажность) вычисляется поле ветров и экстраполируется вниз к высотам 10–50 м, генерируя статистические данные ветрового режима в расчётных узлах сетки с размером ячейки до 20 км в северных регионах, создавая тем самым так называемые «виртуальные метеостанции».

На третьем уровне предлагается микромасштабное моделирование ветрового потока с использованием данных реанализа специализированных баз данных MEPA, CFSR и др., баз данных спутниковых наблюдений NCEP/NCAR и баз цифровых моделей рельефа и шероховатости поверхности земли — GlobalMapper, NASA SRTM, European Environment Agency и др.

В качестве модели для широкомасштабного моделирования на третьем уровне принимается модель национальной лаборатории Risø Датского технического университета (DTU) — равнинный рельеф. Микромасштабное моделирование производится в программном комплексе WindPRO, общепринятом в мировой практике для проектирования ВЭУ. Ре-

зультатами расчётов на третьем уровне являются карты высокого разрешения (до 50–200 м) для конкретного места размещения ВЭУ на различных высотах.

Малые ВЭУ

В России в 2020 году было девять основных разработчиков и производителей малых ВЭУ [26, 27].

ООО «НИЦ «Виндэк». Всего разработано восемь конструкций ВЭУ, в том числе четыре с вертикальной осью турбинного типа с направляющим аппаратом: «Виндэк-01В» мощностью 100 Вт (опытный образец); МВТЭУ-1 «Виндэк» (1 кВт); МВТЭУ-5 «Виндэк» (5 кВт); МВТЭУ-10 «Виндэк» (10 кВт); четыре ВЭУ с горизонтальной осью: двухлопастная «Виндэк-ВЕТЭН-02» (200 Вт, выпущено 30 шт.); однолопастные ВЭУ «Виндэк-05» (850 Вт, выпущено 10 шт.); «Виндэк-1» (1,5 кВт, опытный образец); двухлопастная ВЭУ «Виндэк-5» (5 кВт). НИЦ «Виндэк» разрабатывает и производит для ВЭУ вентильные генераторы обращённой и необращённой конструкции мощностью от 100 Вт до 20 кВт.

ООО «Ветро-Свет» (г. Санкт-Петербург) разработало ВЭУ типа ВА-250 мощностью 200 Вт (мелкосерийное производство) и ВА-900 мощностью 900 Вт.

ООО «Сальбомаш» (г. Гатчина Ленинградской области) разработало четыре конструкции с вертикальной осью типа «ОСА300-12» мощностью 300 Вт (мелкосерийное производство) и 500 Вт, а также 2 кВт и 3 кВт.

ООО «ГРЦ-Вертикаль» (г. Миасс Челябинской области) разработало ВЭУ с вертикальной осью ВЭУ-1 (1 кВт, мелкосерийное производство), ВЭУ-3 (3 кВт), ВЭУ-30 (30 кВт, опытный экземпляр).

ООО «ВДМ-техника» (г. Москва) разработало ВЭУ VDM-5 мощностью 5 кВт (опытный экземпляр) и VDM-30 (30 кВт).

ООО «Радуга-15» (г. Дубна Московской области) разработало ВЭУ «Радуга-008» мощностью 8, 16 и 24 кВт (опытные экземпляры) и «Радуга-001» (1 кВт).

ООО «Ветрострой» (г. Сафоново Смоленской области) разработало и производит ВЭУ мощностью 500 Вт, 1 и 2 кВт (произведено более 1000 шт.).

ООО «Арнади» (г. Владимир) разработало и производит ВЭУ с вертикальной осевой роторной турбиной типа WR ТВ-Д мощностью 1, 3, 5 и 10 кВт (произведено более 300 шт.).

ООО «Мегат» (г. Дубна Московской области) разработало ВЭУ типа SPIN-15 мощностью 15 кВт (опытный экземпляр) и планирует организовать их совместное производство в Китае.

Выводы

1. В настоящее время ветроэнергетика в России развивается стремительными темпами. Она занимает второе место в возобновляемой энергетике после фотоэлектрических станций. На 1 сентября 2020 года установленная мощность 22-х сетевых ВЭС составляла 351 МВт. В РФ имеется устойчивое финансирование ветроэнергетики от ГК «Росатом», ГК «Роснано», ПАО «ЭНЭЛ Россия» и других мощных структур электроэнергетики.

В Российской Федерации приняты необходимые правительственные документы для стимулирования массового сооружения сетевых ВЭС мощностью свыше 5 МВт, а также созданы несколько производств оборудования для ветроэнергетики со степенью локализации до 65 %.

2. По ряду причин в России в настоящее время отсутствуют научно-технические ветроэнергетические школы, предприятия полного производственного цикла.

3. Анализ столетнего развития российской ветроэнергетики показал, что наибольшие успехи (мирового уровня) были достигнуты в 1930-е годы, как результат деятельности научной школы Н.Е. Жуковского и его учеников, которые в институтах ЦАГИ и ЦВЭИ разработали в том числе сетевую Балаклавскую ВЭС мощностью 100 кВт, не имевшую в мире аналогов до 1940 года, а также электрические ветровые установки для арктических станций мощностью до 25 кВт.

Большой вклад в развитие ветроэнергетики в России также внесли институты ВИМЭ, ВИСХОМ, ИФ ВНИИЭМ, ВИЭСХ, НПО «Ветроэн».

Ветроэнергетика в России развивается стремительными темпами. Она занимает второе место в ВИЭ после фотоэлектрических станций. На 1 сентября 2020 года установленная мощность 22-х российских сетевых ВЭС составляла 351 МВт

4. В РФ в автономных зонах энергоснабжения, учитывая природно-климатические и социально-экономические особенности территорий, высокие тарифы на электроэнергию и наличие высокого ветроэнергетического потенциала, создаются хорошие возможности для строительства экономически эффективных ветродизельных электростанций.

5. Все системные ВЭУ, как правило, имеют горизонтально-осевую конструкцию с трёхлопастным ветроколесом.



Основными направлениями совершенствования системных горизонтально-осевых трёхлопастных ВЭУ являются:

- в части аэродинамики — повышение эффективности профилей лопастей и снижение их шумности, применение композитных материалов;
- совершенствование приводов генераторов (замена механических мультипликаторов на гидравлические, прямой привод от ветроколеса) и конструкции электрических генераторов;
- увеличение единичной мощности ветроустановок.

Для малых ВЭУ, к которым в России относятся установки мощностью не более 50 кВт, основными направлениями совершенствования являются:

- в части аэродинамики — исследования возможности применения лопастей с высокоэффективными профилями, различными формами лопастей и конфигурации ветроколеса, широкое внедрение композитных материалов;
- применение прямого привода синхронных магнитоэлектрических генераторов от ветроколеса и микропроцессорных систем управления режимами работы ветроустановок;
- создание ветроэнергетических автономных комплексов с различными видами первичных источников энергии и накопителями энергии на современных гелиевых и литий-фосфатных аккумуляторах;
- производство вертикально-осевых ВЭУ Дарриуса и Савониуса и их модификаций с управляемыми и неуправляемыми лопастями, а также возможным применением направляющего аппарата. ●

1. Жуковский Н.Е. Полное собрание сочинений, публикация. В 16 томах. Т. 6. Винты, ветряки, вентиляторы. Аэродинамическая труба. — М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР; Глав. ред. авиационной лит.-ры, 1937. 434 с.
2. Красовский Н.В., Уткин-Егоров В.В. Новое крыло для русской ветряной мельницы. — М.: Труды ЦАГИ, 1923. Вып. 3. 13 с.
3. ЦАГИ. Основные этапы научной деятельности 1918–1968 гг. — М.: Машиностроение, 1976. 352 с.
4. Энциклопедия по машиностроению XXL: оборудование, материаловедение, механика. Режим доступа: mash-xxl.info. Дата обращ.: 10.04.2021.
5. Сидоров В.И. Ветро двигатели в Арктике. Изд. 2-е, доп. — М.-Л.: Изд-во СМП, 1946. 169 с.
6. Секторов В.Р. Балаклавская опытная ветроэлектростанция // Электричество, 1933. №19. С. 51–54.
7. Секторов В.Р. Современное состояние проектирования и опытного строительства крупных ветроэлектрических станций // Электричество, 1933. №2. С. 9–13.
8. Ананьев А.А., Седых С.Г., Шаманин В.С. Проблема использования ветра в СССР // Электричество, 1932. №14. С. 716–718.
9. Горчаков П.К., Кондратьев Ю.В. Основные характеристики и перспективы ветроэнергетики // Электрические станции, 1939. №10–11. С. 24–30.
10. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. — М.: ОГИЗ — Сельхозиздат, 1948. 546 с.
11. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. — М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. 280 с.
12. Лось С.И., Козак А.Р. Ветро дизельные станции на основе ветроэлектрических агрегатов АВЭ-250 СМ / Развитие ВИЭ в России: возможности и практика (на примере Камчатского края). — М.: ОМННО «Совет Гринпис», 2006. С. 49–51.
13. Зотоуляев Б.С. Ветропарк в пос. Куликово Калининградской области // Энергия: экономика, техника, экология, 2018. №2. С. 58–65.
14. Очерки истории камчатской энергетики. К 45-летию ПАО «Камчатскэнерго» / В.М. Колосов, В.И. Борисов, А.В. Есенкова. — Петропавловск-Камчатский: Изд-во «Камчатпресс», 2009. 136 с.
15. Программа развития электроэнергетики Камчатского края на 2019–2024 гг. Режим доступа: kamgov.ru. Дата обращ.: 15.04.2021.
16. Елистратов В.В. Современное состояние и тренды арктической энергетики // Технический оппонент, 2019. №2. С. 13–21.
17. Справочник по климату СССР. Вып. 1–34.4.3. Ветер. — Л.: Гидрометеиздат, 1967–1969.
18. Новый аэроклиматический справочник пограничного слоя атмосферы над СССР. Том II. Статистические характеристики ветра. Кн. 1–10 / Под ред. И.Г. Гутермана. — М.: Гидрометеиздат, 1986–1987.
19. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Ветер. Вып. 4.1–34. — Л.: Гидрометеиздат, 1985–1986.
20. Старков А.Н., Ландберг А. (Дания), Безруких П.П., Борисенко М.М. Атлас ветров России. — М.: Изд-во «Можайск-Терра», 2000. 560 с.
21. Концепция развития и использования возможностей малой и нетрадиционной энергетики в энергетическом балансе России. — М.: Министерство топлива и энергетики РФ, 1994. 121 с.
22. Атласы ветрового и солнечного климата России / Под ред. М.М. Борисенко и В.В. Стадник. — М.: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 1997. 173 с.
23. Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. — М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. 267 с.
24. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии и местных видов топлива / Под ред. П.П. Безруких. — М.: ИАЦ «Энергия», 2007. 272 с.
25. Елистратов В.В. Автономное энергосбережение энергокомплексами на базе возобновляемых источников энергии // Журнал СОК, 2016. №3. С. 72–75.
26. Грибков С.В. Современное состояние развития малой ветроэнергетики в мире и в России. Возобновляемая и малая энергетика 2015: Мат. XII Межд. науч.-практ. конф. / Под ред. П.П. Безруких и С.В. Грибкова; Комитет ВИЭ РосСНХО. — М.: Типогр. «Энерби Дизайн», 2015. 346 с.
27. Грибков С.В. Ветро-солнечно-дизельные комплексы электроснабжения малых мощностей как основа развития ВИЭ в России / Возобновляемая энергетика XXI век (REENCON XXI): Мат. Межд. конгресса / Под ред. Д.О. Дуникова, О.С. Попеля. — М.: ОИВТ РАН, 2016. С. 124–128.

References — see page 79.

Russian wind power: scientific and design schools, stages of development, prospects. Pp. 62–76.

Vitaly A. Butuzov, Doctor of Technical Sciences, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (Krasnodar city); **Pavel P. Bezrukih**, Doctor of Technical Sciences, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI); **Serge V. Gribkov**, PhD, "Windeq" Scientific and Engineering Center, LLC (Moscow city)

1. N.E. Zhukovskij. *Polnoe sobranie sochinenij, publicistika* [Complete edition, writing]. In 16 vol. Vol. 6. Vinty, vetrjaki, ventiljatory. Ajerodinamicheskaja truba [Screws, windmills, fans. An aerodynamic wind tunnel]. Moscow-Leningrad. ONTI NKTP SSSR ["United Scientific and Technical Publishing House of the People's Commissariat of Heavy Industry of the USSR"]. *Glavnaja redakcija aviacionnoj literatury* ["Main editorial office of aviation literature"]. 1937. 434 p. [In Russian]
2. N.V. Krasovskij, V.V. Utkin-Egorov. *Novoe krylo dlja russkoj vetrjanoj mel'nicy* [New wing for the Russian windmill]. Moscow. *Trudy TsAGI* [Proc. of the Central Aerohydrodynamic Institute]. 1923. Issue 13. 13 p. [In Russian]
3. TsAGI. *Osnovnyye jetapy nauchnoj dejatel'nosti 1918–1968 gg.* [Central Aerohydrodynamic Institute. The main stages of scientific activity in 1918–1968]. Moscow. *Mashinostroenie* ["Engineering Industry" Publishers]. 1976. 352 p. [In Russian]
4. *Jenciklopedija po mashinostroeniju XXI: oborudovanie, materialovedenie, mehanika* [Encyclopedia of Mechanical Engineering XXI: equipment, materials science, mechanics]. Web-source: mash-xxl.info. Access data: April 10, 2021. [In Russian]
5. V.I. Sidorov. *Vetrodvigateli v Arktike* [Wind turbines in the Arctic]. 2nd edition, exp. Moscow-Leningrad. *Izd-vo SMP* [Publishing House of the Main Department of the Northern Sea Route under the Council of Ministers of the USSR]. 1946. 169 p. [In Russian]
6. V.R. Sektorov. *Balaklavskaja opyt'naja vetrojelektrostancija* [The Balaklava experimental wind power plant]. *Jelektrichestvo* ["An electricity" Magazine]. 1933. No. 19. Pp. 51–54. [In Russian]
7. V.R. Sektorov. *Sovremennoe sostojanie proektirovanija i opyt'nogo stroitel'stva krupnyh vetrojelektricheskijh stancij* [The current state of design and pilot construction of large wind power plants]. *Jelektrichestvo* ["An electricity" Magazine]. 1933. No. 2. Pp. 9–13. [In Russian]
8. A.A. Anan'ev, S.G. Sed'nyh, V.P. Shamanin. *Problema ispol'zovanija vetra v SSSR* [The problem of using wind in the USSR]. *Jelektrichestvo* ["An electricity" Magazine]. 1932. No. 14. Pp. 716–718. [In Russian]
9. P.K. Gorchakov, Ju.V. Kondratjuk. *Osnovnyye harakteristiki i perspektivy vetrojenergetiki* [Main characteristics and prospects of wind energy]. *Jelektricheskie stancii* ["Electric power plants" Magazine]. 1939. No. 10–11. Pp. 24–30. [In Russian]
10. E.M. Fateev. *Vetrodvigateli i vetroustanovki* [Wind turbines and wind turbines]. Moscow. OGIZ — *Sel'hozizdat* [Association of State Book and Magazine Publishing Houses of the RSFSR — State Publishing House of Agricultural Literature of the USSR]. 1948. 546 p. [In Russian]
11. V.P. Haritonov. *Avtonomnye vetrojelektricheskie ustanovki* [Autonomous wind power plants]. Moscow. *GNU VIJeSKh* [State Scientific Institution All-Russian Scientific Research Institute for Electrification of Agriculture of the Russian Academy of Sciences]. 2006. 280 p. [In Russian]
12. S.I. Los', A.R. Kozak. *Vetrodizel'nye stancii na osnove vetrojelektricheskijh agregatov AVJe-250 SM* [Wind diesel power plants based on wind power units AVE-250 CM]. *Razvitie vozobnovljajemyh istochnikov jenerгии v Rossii: vozmozhnosti i praktika (na primere Kamchatskogo kraja)* [Development of renewable energy sources in Russia: opportunities and practice (on the example of the Kamchatka region)]. Moscow. *OMNNO "Sovet Grinpis"* ["Council of Greenpeace" Branch of the International Non-Governmental Non-Profit Organization]. 2006. Pp. 49–51. [In Russian]
13. B.P. Zatopljajev. *Vetropark v pos. Kulikovo Kaliningradskoj oblasti* [Wind farm in the village of Kulikovo, Kaliningrad region]. *Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija* ["Energy: economics, technology, ecology" Magazine]. 2018. No. 2. Pp. 58–65. [In Russian]
14. V.M. Kolosov, V.I. Borisov, A.V. Esenkova. *Ocherki istorii kamchatskoj jenergetiki. K 45-letiju PAO "Kamchatskijenergo"* [Essays on the history of Kamchatka power engineering. To the 45th anniversary of "Kamchatskenergo", PJSC]. Petropavlovsk-Kamchatskij. *Izd-vo "Kamchatpress"* ["Kamchatpress" Publishers]. 2009. 136 p. [In Russian]
15. *Programma razvitiya jelektrojenergetiki Kamchatskogo kraja na 2019–2024 gg.* [Program for the development of the electric power industry of the Kamchatka region for 2019–2024]. Web-source: kamgov.ru. Access data: April 15, 2021. [In Russian]
16. V.V. Elistratov. *Sovremennoe sostojanie i trendy arkticheskoy jenergetiki* [Current state and trends of the Arctic energy]. *Tekhnicheskij opponent* ["Technical opponent" Magazine]. 2019. No. 2. Pp. 13–21. [In Russian]
17. *Spravochnik po klimatu SSSR* [Reference book on the climate of the USSR]. Issue 1–34.4.3. *Veter* [The wind]. Leningrad. *Gidrometeoizdat* [Hydrometeorological Publishing House of the USSR ("Hydrometeoizdat" Publishers)]. 1967–1969. [In Russian]
18. *Novyj ajeroklimaticheskij spravochnik pogranichnogo sloja atmosfery nad SSSR* [New aeroclimatic reference book of the atmospheric boundary layer over the USSR]. Vol. II. *Statisticheskie harakteristiki vetra* [Statistical characteristics of the wind]. Books No. 1–10. Edited by I.G. Guterma. Moscow. *Gidrometeoizdat* [Hydrometeorological Publishing House of the USSR ("Hydrometeoizdat" Publishers)]. 1986–1987. [In Russian]
19. *Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR* [Scientific and Applied Reference Book on the Climate of the USSR]. Series 3. *Veter* [The wind]. Issue 4.1–34. Leningrad. *Gidrometeoizdat* [Hydrometeorological Publishing House of the USSR ("Hydrometeoizdat" Publishers)]. 1985–1986. [In Russian]
20. A.N. Starkov, A. Landberg (Danish), P.P. Bezrukih, M.M. Borisenko. *Atlas vetrov Rossii* [Atlas of winds of Russia]. Moscow. *Izd-vo "Mozhaisk-Terra"* ["Mozhaisk-Terra" Publishing House]. 2000. 560 p. [In Russian]
21. *Koncepcija razvitiya i ispol'zovanija vozmozhnostej maloj i netradicijonnoj jenergetiki v jenergeticheskom balanse Rossii* [The concept of development and use of opportunities for small and non-traditional energy in the energy balance of Russia]. Moscow. *Ministerstvo topliva i jenergetiki RF* [Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation]. 1994. 121 p. [In Russian]
22. *Atlasy vetrovogo i solnechnogo klimatov Rossii* [Atlases of wind and solar climates in Russia]. Edited by M.M. Borisenko, V.V. Stadnik. Moscow. *GGO im. A.I. Voejkova* [Main Geophysical Observatory named after A.I. Voejkova]. 1997. 173 p. [In Russian]
23. P.P. Bezrukih, D.P. Strebkov. *Vozobnovljajemaja jenergetika: strategija, resursy, tehnologii* [Renewable energy: strategy, resources, technologies]. Moscow. *GNU VIJeSKh* [State Scientific Institution All-Russian Scientific Research Institute for Electrification of Agriculture of the Russian Academy of Sciences]. 2005. 267 p. [In Russian]
24. *Spravochnik po resursam vozobnovljajemyh istochnikov jenerгии i mestnyh vidov topliva* [Directory of renewable energy resources and local fuels]. Edited by P.P. Bezrukih. Moscow. *IATs "Jenergija"* ["Energy" Publishing and Analytical Center]. 2007. 272 p. [In Russian]
25. V.V. Elistratov. *Avtonomnoe jenergosberezhenie jenergokompleksami na baze vozobnovljajemyh istochnikov jenerгии* [Autonomous energy saving by energy complexes based on renewable energy sources]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing. Heating. Ventilation]. 2016. No. 3. Pp. 72–75. [In Russian]
26. S.V. Gribkov. *Sovremennoe sostojanie razvitiya maloj vetrojenergetiki v mire i v Rossii* [The current state of the development of small wind power in the world and in Russia]. *Vozobnovljajemaja i malaja jenergetika 2015: Mat. XII Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Renewable and Small Energy 2015: Proc. of the XII International Scientific and Practical Conference]. Edited by P.P. Bezrukih, S.V. Gribkov. *Komitit VIJe RosSNIO* [The Committee on the Use of Renewable Energy Sources of the Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations]. Moscow. *Tipogr. "Jenerbi Dizajn"* ["Enerby-Design" Printing House]. 2015. 346 p. [In Russian]
27. S.V. Gribkov. *Vetro-solnechno-dizel'nye komplekсы jelektronsnabzhenija malyh moshnostej kak osnova razvitiya VIJe v Rossii* [Wind-solar-diesel power supply complexes of small capacities as the basis for the development of renewable energy sources in Russia]. *Vozobnovljajemaja jenergetika XXI vek (REENCON XXI): Mat. Mezhd. kongr.* [REENCON XXI: Proc. of the International Congress]. Edited by D.O. Dunikova, O.P. Popelja. Moscow. *OIVT RAN* [Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences]. 2016. Pp. 124–128. [In Russian]