УДК: 621.311.24

Сто лет развития ветроэнергетики в России. Часть 2.

Бутузов Виталий Анатольевич[0000-0003-2347-9715]1,

Безруких Павел Павлович[0000-0003-0906-1339] 2,

Грибков Сергей Владимирович[0000-0002-6174-7437] 3

[1]Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Россия, Краснодар
[2]Национальный исследовательский университет "МЭИ", Россия, Москва
[3]Научно-инженерный центр "Виндэк",Россия, Москва

[1]E-mail: butuzov@newmail.ru
[2]E-mail: bezruky80veter@yandex.ru
[3]E-mail: windec@mail.ru

Аннотация. Представлена вторая часть статьи, первая опубликована в № 2021 – 3, стр. 10-24. В статье 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 ВЭУ. Отмечена роль основателя российской ветроэнергетики членкора Н.Е. Жуковского и его учеников, деятельность институтов ЦАГИ, Центрального ветроэнергетического, Института электрификации и механизации сельского хозяйства, НПО «Ветроэн». Указаны основные достижения советской ветроэнергетики: ВЭС в Балаклаве(100 кВт, 1931 г.), ветродвигатели ВД-8 (1300 шт.,1936 г.), арктические ветроэлектростанции ЦВЭИ-Д-12 (15 кВт, 1936 г.), ветродизельная станция (ВДС) в Казахстане (400 кВт, 1957 г.). Описаны первые ветропарки стран СНГ, в Крыму общей мощностью 110 МВт на основе ВЭУ КБ «Южное» (г. Днепропетровск), в п. Куликово Калининградской области – 5,1 МВт. Приведен перечень основных ВЭС и ВДС России. Дана оценка перспектив развития российской ветроэнергетики.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветроустановка (ВЭУ), ветроэлектростанция (ВЭС), ветродвигатель, ветроколесо, ветродизельная станция (ВДС), ветряные мельницы, лопасти, мачта, электрогенератор, инерционный аккумулятор, Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), Северный морской путь (СМП).

10 Крымские ВЭС

ВЭС на территории Республики Крым в составе Украины начали строиться в 1993 г. Первая Донузлавская ВЭС мощностью 6,78 МВт была построена в 1993 г. в Сакском районе с 63 ветроагрегатами USW-56-100 (Рис.10), изготовленных ГКБ «Южное» (г. Днепропетровск, Украина) по лицензии американской фирмы «Kenetech Windpower Inc» единичной мощностью 107,5 кВт. Судакская ВЭС мощностью 3,76 МВт была построена в 2001 г. и состояла из 36 агрегатов USW-56-100. В 1996 г. ГКБ «Южное» по лицензии бельгийской фирмы Turbowind освоило производство ветроустановок единичной мощности 600 кВт. В 1996-2000 гг. была построена Сакская ВЭС с Мироновскими и Воробьевскими ветростанциями суммарной мощностью 20,82 МВт в составе 177 ветроустановокUSW-56-100 и трех ветроустановок Т600-48. На Таркутской ВЭС мощностью 22,45 МВт в 2001 г. были установлены 127 ВЭУUSW-56-100 и шесть ВЭУ Т600-48. Восточно-Крымская ВЭС мощностью 2,81 МВт имеет 15 ВЭУUSW-56-100 и две ВЭУ Т600-48. На Пресноводненской ВЭС мощностью 7,39 МВт в 2009 г. были установлены 52 ВЭУUSW-56-100 и три ВЭУANBonus 600. В 2014 г. была построена самая мощная в то время в Крыму Останинская ВЭС мощностью 25 МВт с 10 ВЭУWTU – 2,5 немецкого концерна FuhrlanderAG единичной мощностью 2,5 МВт. Производство этих ВЭС было локализовано в г. Краматорске Донецкой области на ООО «Фурлендер ВиндТехнолоджи» с изготовлением башен, анкерных корзин, стеклопластиковой гондолы. Таким образом, на Крымских ВЭС в 1993-2005 гг. было установлено 469 ВЭУ типа USW-56-100общей мощностью 46,9 МВт. Из них в 2020 г. отработали расчетный ресурс и в большей своей части требуют замены 402 ВЭУ. Из 11 ВЭУ типа Т600-48 общей мощностью 6,6 МВт отработали расчетный ресурс девять ВЭУ.

Рис. 1. Сакская ВЭС. Мироновский участок

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

11 Сетевая ветроэлектростанция в Калининградской области

Первая сетевая ветроэлектростанция в современной России -Куликовская ВЭС была построена по инициативе тогдашнего генерального директора АО «Янтарьэнерго» (г. Калининград) Бориса Семеновича Затопляева, 1937 г.р. [16]. В 1998–2000 г.г. около пос. Куликово Калининградской области были установлены 20 агрегатовV27-225 фирмы «Vestas» (Дания) единичной мощностью по 225 кВт, проработавшие ранее в Дании семь лет и один новый агрегат той же фирмы мощностью 600 кВт. Максимальная выработка ВЭС была достигнута в 2003 г. – 6,604 млн. кВтч, 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. Ветроустановка же мощностью 600 кВт находится в рабочем состоянии, но не эксплуатируется. Земля, занимаемая ранее 20-ю ветроустановками Куликовской ВЭС рекультивирована. Получен опыт демонтажа оборудования устаревшей ВЭС, который не хотелось бы использовать в ближайшие 20-25 лет.

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

12 Российская сетевая ветроэнергетика

Опыт создания ЦАГИ в 1931 г. первой в СССР и самой мощной до 1940 г. сетевой Балаклавской ВЭС мощностью 100 кВт не получил дальнейшего развития в последующие годы. Разработанные НПО «Ветроэн» и изготовленные КБ «Южмаш» сетевые ветроагрегаты АВЭ – 250СМ с 1995 г. по 2000 г. были установлены на Воркутинской ВЭС мощностью 1,5 МВт и Анадырская ВЭС, мощностью 2,5 МВт. В Крыму с 1993 по 2005 г. были построены 9 сетевых ветростанций общей мощностью 110 кВт на которых были установлены 469 ветроагрегата USW-56-100 общей мощностью 46,9 МВт, 11 установок Т600-48 общей мощностью 6,6 МВт, 3 агрегата ANBonus 600 KW общей мощностью 1,8 МВт, 10 ветроагрегатов WTU- 2,5 общей мощностью 256 МВт.

Современный российский рынок ветроэнергетики создан после принятия 23 января 2015 г. Правительством России постановления № 47, которое обеспечивает субсидирование сооружение ВЭС мощностью свыше 5 МВт. Инвесторы таких электростанций получают долгосрочные договоры на поставку мощностей

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

(ДПМ) на оптовом рынке России после отбора их проектов на конкурсной основе. В отличие от европейских тендерных условий, данная схема предлагает победителям плату за мощность в МВт 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 г. максимально допустимые капитальные затраты ВЭС составляют 109451 руб.кВт. На 2020 г. степень локализации установлена в 65%. Постановление правительства РФ № 47 от 23 января 2015 г. обязывает региональные сетевые компании закупать электроэнергию, произведенную 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 рентабельности12% и выгодные тарифы на электроэнергию, но обязана завершить строительство ВЭС и обеспечить выполнение требований по локализации производства их оборудования. ВЭС 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 г. ВЭС суммарной мощностью 1,8 ГВт. ФРВ в 2019 г. развернуло производство с годовой программой 300 МВт/год, в том числе гондол в г. Нижний Новгород, 300 лопастей, а в перспективе 500 лопастей в г. Ульяновске, башен в г. Таганроге.

Второй по масштабам строительству ВЭС является АО «НовоВинд» ГК «Росатом», создавшего ООО «RedWindB.V.» (51% WindarRenovables, Испания, 24,5 % ГК «РосНано», 24,5 % ПАО «Северсталь») на основе безредукторной ВЭС по лицензии фирмы «Lagenway» (Дания) с программой строительства до 2024 г. ВЭС с суммарной мощностью 1 ГВт. АО «НовоВинд» в 2020 г. развернуло производство с годовой программой до 300 МВт/год, в том числе генераторов, кожухов, гондолы, ступиц и обтекателей на заводе «Атоммаш» и башен на заводе «Ветростройдеталь» г. Волгодонске.

Третьим игроком на российском рынке ветроэнергетики является партнерство ПАО «ЭНЕЛ-РУС» и фирмы «Симменс-Гамеса» на основе редукторных ВЭС фирмы «Симменс – Гамеза» с программой строительства до 2024 г. ВЭС суммарной мощностью 0,3 ГВт с годовой программой 300 МВт/год и производством в г. Санкт-Петербурге. В таблице 2 представлены основные характеристики современных сетевых ВЭС.

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

Таблица 2. Современные российские сетевые ВЭС

№	Название, адрес	Установленная мощность, МВт	Год ввода в эксплуатацию	Тип и представитель оборудования	Собственник
1	2	3	4	5	6
1	Ульяновск-1 с. Красный Яр Чердаклинского района Ульяновской области	35	2018	DongFang Electric Company Limited (Китай), DF 2,5 MW -14 шт.	ПАО «Фортум»
2	Ушаковская пос. Ушаково Гурьевского района Калининградской области	5,1(6,9)	2018	EnerconE70/2300 2,3 МВт – 3 шт.	АО «Янтарь энерго»
3	Ульяновск-2 с/п Октябрьский Чердаклинского района Ульяновской области (Рис.25)	50	2019	Vestas (Дания) 3,6 МВт – 14 шт.	ПАО «Фортум»
4	Адыгейская Шовгеновский, Гиагинский районы Республики Адыгея	150	2020	LagerweyL100–2,5 2,5 МВт –60 шт.	АО «Ново-Винд»
5	Сулинская Красносулинский район Ростовской области	100	2020	Vestas (Дания) V126-3.45 MW - 26шт.	ООО «Второй ветропарк ФРВ»
6	Гуковская Ростовской области (Рис.24)	100	2020	Vestas (Дания) V126-3.45 MW 3,8 МВт –26 шт.	ООО «Второй ветропарк ФРВ»
7	Каменская Каменский район Ростовской области	100	2020	Vestas (Дания) V126-3.45 MW - 26шт.	ООО «Второй ветропарк ФРВ»

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

8	Юстинская ВЭС В Республике Калмыкия	15	2020	600 кВт –25 шт.	ВЭС «Бриз»

13 Ветродизельные комплексы

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

В 1949 г. на Днепровском острове Хортица в Украине на базе ветродвигателя Д-18 мощностью 25 кВт с вертикальной трансмиссией была построена ВДК с синхронным генератором и дизель-генератором той же мощности. В 1956 г. в Акмолинской области Казахстана на базе ветродвигателя Д-18-СХ-3 с электрогенератором на одной оси с ветроколесом была построена ВЭС мощностью 50 кВт. В 1957 г. также в Казахстане с 12-ю таких же ветроагрегатов общей мощностью 400 кВт был построен ВДК с двумя дизель-генераторами мощностью по 200 кВт [14].

В таблице 3 представлены характеристики современных российских ветродизельных комплексов (ВДК).

Наибольший российский опыт эксплуатации ВДК в северных условиях имеется в Камчатском крае. В 2014 г. в п. Усть-Камчатск Камчатского края ПАО «Передвижная энергетика» была установлена ВЭУ фирмы «Vergnet» (Франция), мощностью 275 кВт, которая за 2018 г. выработала 129430 кВт·ч. В 2016 г. там же по заказу Правительства Камчатского края были смонтированы 3 ВЭУ фирмы «Komaihaltek» (Япония) мощностью по 300 кВт, которые за 2018 г. выработали 1516820 кВт·ч электроэнергии. Суммарная мощность Усть-Камчатской ВЭС составляет 1175 кВт. Доля (замещения) ВЭС в 2018 г. -7,24 %, а годовая экономия топлива 363 т.н.т. стоимостью 18 млн. руб. За период с 2015 г. по I квартал 2019 г. выработка ДЭС составила 14510 тыс. кВт·ч; выработка ВЭС – 1562 тыс. кВт·ч; доля замещения ВЭС – 10,8%; экономия топлива 344 т.н.т. стоимостью 14 млн. руб.

Таблица 3. Ветродизельные комплексы

№	Название, адрес	Установленная мощность, МВт	Год ввода в эксплуатацию	Оборудование	Собственник
1	2	3	4	5	6

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

1	с. Никольское о. Беринга Алеутский район Камчатского края	0,25 0,55	1996 2013	Micoim 600-250/50 2 Vergnet Франция 2 по 275 кВт ДЭС – 292 кВт АСУ ВДЭ-Danvest	АО «Южные электрические сети Камчатки)
2	Усть-Камчатская п. Усть-Камчатский Камчатский край	1,175	2013-2015	Vergnet -275 кВт- 1 шт Komaihaltek 300 300кВт – 3 шт.	АО «Южные электрические сети Камчатки)
3	п. Октябрьский Усть-Большерецкий район Камчатский край	3,3	2008-2014	0,3 МВт – 1 шт. 4 по 0,6 =2,4 МВт Nicon -400 по 400 кВт	АО «Камчатские электрические сети им. И.А.Ползунова»
4	с. Новиковская о. Кунашир Сахалинская обл.	0,45	2015	ВЭУ – 225 кВт 2 шт.	ПАО «Передвижная энергетика»
5	п. Амдерма Ненецкий АО ДЭС 460 кВт	0,2	2016	VETROXArctikфирмы GHRE(Китай) CE-5050 50 кВт -4 шт.	Департамент ЖКХ МО «Поселок Амдерма»
6	п. Тикси Якутия ВЭС-3 МВт	0,9	2018	Komaihaltek 0,3 МВт 3 шт. ВДК -3,9 МВт 3 ДГ мощностью 3 МВт	ПАО «Передвижная энергетика»

В 1996 г. в с. Никольское на острове Беринга (Командорские острова) Камчатского края были установлены две датских ВЭУ Micoim 600-250/50 мощностью по 250 кВт. После выхода их из строя в 2013 г. там же были смонтированы две французские ВЭУ фирмы «Vergnet» мощностью по 275 кВт, а для сглаживания графика нагрузок установлены электробойлеры и АСУ для совместной работы ВЭС и ДЭС типа Danuest [17]. В 2019 г. в работе были две ВЭС типа Vergnet суммарной установленной мощностью 550 кВт, а также ДЭС мощностью 292

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

кВт. По данным собственника ВДК ПАО «Передвижная энергетика» доля замещения ВЭС в 2018 г. составила 14 %, а годовая экономия топлива 111 т.н.т. стоимостью 5,2 млн. руб. (www.ren4reg.com). За период с 2015 г. по I квартал 2019 г. при установленной мощности 550 кВт выработка ДЭС составила 14510 тыс. кВт·ч; выработка ВЭС – 1560 тыс. кВт·ч; доля замещения ВЭС 10,8%; экономия топлива 344 т.н.т. стоимостью 14 млн. руб. [18].

По данным опыта эксплуатации ВДК в с. Никольское и в п. Усть-Камчатск – АО «Южные электрические сети Камчатки» (www.ren4reg.com) выявлены следующие проблемы ВЭУ фирмы «Vergnet»: запуск в работу при температуре воздуха ниже минус 17°С невозможен; регулярный самопроизвольные 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 отдаленного доступа ВДК; внеочередная замена программного обеспечения ВЭУ (2015 г.). Для ВЭУ фирмы «Komaihaltek» указаны следующие эксплуатационные проблемы: разгерметизация гидравлики одного агрегата (износ манжеты масляного фильтра), периодическая остановка ВЭУ из-за загрязнения тормозного диска поворота гондолы вулканической пылью; регулярные сбои системы отдаленного доступа ВДК [17].

Одним из первых современных энергокомплексов, построенных на вечной мерзлоте в Арктике является ВДК в пос. Амдерма Ненецкого автономного округа, осуществленный в 2017 г. [38] . Численность населения: ~350 человек, расположение: побережье Карского моря; среднегодовая/максимальная скорость ветра: 8/42 м/с; минимальная температура: -42 °С; обледенения; интенсивная метель/пурга. При реконструкции ДЭС и интеграции ВЭС был создан комплекс: три ранжированных по мощности ДГУ в сумме 600 кВт и 4 ВЭУ по 50 кВт высотой 26 метров, китайского производства, адаптированных под местные климатические и логистические условия строительства. В проекте применена оригинальная модульная конструкция фундамента для вечной мерзлоты и система самоподъема ВЭУ без применения крана. Внедрение ВЭУ позволило снизить: – расход электроэнергии на собственные нужды с 510 тыс. кВт·ч до 160 тыс. кВт·ч (более чем в 3 раза); – расход дизельного топлива с 719 тыс. л до 416 тыс. л (на 40%), т. е. на 303 тыс. л в год, что составило экономию в денежном выражении 12,5 млн. руб./год; – объемы выбросов СО2 на 600 т. Доход за счет снижения экономически обоснованного тарифа составил 45 млн. руб. в год.

В п. Тикси в Якутии в 2007 г. была установлена реанимированная ВЭС немецкого производства мощностью 250 кВт, которая через несколько лет вышла из строя. В 2018 г. были установлены 3 ветроагрегата японской фирмы «Komaihaltek» мощностью по 300 кВт, адаптированных для работы в полярных условиях. Разработан проект ВДК, включающий ВЭС общей мощностью 3000 кВт и систему аккумулирования электрической энергии.

Российский рынок ВДК может быть сформирован в первую очередь для регионов Крайнего Севера, где проживают около 10 млн. человек и куда ежегодно завозится около одного миллиона тонн дизельного топлива общей стоимостью около 100 млрд. рублей («Северный завод») для 900 эксплуатируемых ДЭС (по

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

данным Российского энергетического агентства, РЭА). При средней установленной мощности 0,5 МВт их суммарная мощность составляет 450 МВт. Суммарные расходы бюджетов всех уровней регионов Крайнего Севера с изолированными энергосистемами в 2016г. составили 150 млрд. рублей, а перекрестное субсидирование – 80 млрд. рублей (по данным Центра энергоэффективных технологий). При условии перспективного сооружения ВДК в регионах Крайнего Севера для 20 % ДЭС суммарная потенциальная мощность ВЭС составит 90 МВт, а при средней единичной мощности 0,3 МВт их количество превысит 300 шт. При замещении ВЭС 10% ежегодно расходуемого топлива на ДЭС регионов Крайнего Севера экономия может составить 23 млрд. рублей.

14 Ветроэнергетические характеристики

Для проектирования ВЭС принципиальное значение имеет получение достоверной информации об энергетических характеристиках ветра в месте сооружения станции. В России академическая наука систематически стала заниматься ветроэнергетикой в 1916 г., когда в составе Комиссии по изучению естественных производительных сил (КЕСП) Императорской Академии наук был создан энергетический отдел. В 1919 г. им был издан том I «Ветер как двигательная сила», в котором был оценен ветроэнергетический потенциал России. В 1935 г. д.т.н. Н.В. Красовским был разработан Атлас ветроэнергетических ресурсов СССР [19].

Ветроэнергетический кадастр представляет 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 затиший по длительности, удельная мощность и удельная энергия ветра, ветроэнергетические ресурсы региона. Информационную основу Кадастра составляют данные многолетних (1940-1990 г.г.) измерений на государственной сети метеорологических (3500) и аэрологических (150) станций. Рекомендуемые данные прошли многократную и всестороннюю методическую и многолетнюю практическую апробацию и опубликованы в справочниках [20,21,22], в атласе [23].

Первым признанием необходимости развития возобновляемой энергетики на уровне Правительства России явилось поручение от 07 июня1993 года Министра топлива и энергетики России Ю.К. Шафраника, которое стоит процитировать:

«*Костюнину В.Н., Бушуеву В.В. (это Заместители Министра) 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 г.*»

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

Выполнение поручения было возложено на Безруких П.П., в то время первого заместителя начальника Главного управления энергоресурсосбережения и нетрадиционных видов энергии. Как видим, задача была поставлена принципиально новая, а именно: сколько тонн условного топлива или киловаттчасов электроэнергии может дать возобновляемая энергетика и, следовательно, вытекающего из ответа вывода: стоит ли ей заниматься. Оказалось, что к такой постановке вопроса учёные были не 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 приходом на земли солнечной энергией(с одной стороны) и определяющей ею ветровой и гидравлической 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 Безруких П.П. и утверждена Министром Ю.К. Шафранником 3 ноября 1994 года.[24]

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, разработанного сотрудниками указанной выше обсерватории, под редакцией доктора географических наук М.М. Борисенко и кандидата географических наук В.В. Стадника. (опубликован в 1997 году) [25].

Далее, в 2000 году Российско - Датским институтом был разработан Атлас ветров России, в котором нашли отражение последние данные по ветру различных метеостанций России и отмечены территории России с различными скоростями ветра и удельной мощностью ветра на высоте 50 метров.[23].

Однако для перехода от скорости ветра к ресурсам ветровой энергии требовалось разработать методику определения валового, технического и экономического ресурсов. Это было выполнено в докторской диссертации Безруких П.П., защищенной в 2002 году, основные результаты которой изложены в [26].

Для оценки валового потенциала были приняты и развиты существующие принципы использования ветра. Первым общепринятым в современных научных разработках принципом является использование энергии ветра на ветроэнергетических системах установок с определенной высотой Н над поверхностью Земли.

В соответствии с определением, валовый потенциал рассчитывается как суммарная энергия воздушных масс, использование которой возможно современными ветроэлектрическими установками (ВЭУ) с максимально большой высотой захватываемого приземного слоя Н и соответственной высотой оголовка ветротурбины h. На современных ветроустановках мощностью 750 кВт высота оголовка составляет 60 – 80 м, а диаметр ветроколеса 50 – 80 м. Серийными установками стали ВЭУ мощностью 1000 – 1500 кВт с еще большими высотами башен и диаметром ветроколеса. Поэтому в работе принимается значение h = 75 м; при

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

этом толщина используемого слоя воздушных потоков Н составляет примерно в два раза большую величину, т.е. 150 м.

Вторым принципом, принятым на основании имеющихся исследований, является утверждение, что при обтекании воздушными потоками препятствия («воздушной платины») высота Н возмущенный поток полностью восстанавливается на расстоянии 20 Н после препятствия.

На основании изложенных принципов устанавливается, что максимально полное использование энергии ветра осуществляется ветроэнергетической системой "воздушных плотин" высотой Н, ориентированных перпендикулярно направлению ветра и отстоящих друг от друга на расстоянии 20 Н, так что полная ветровая энергия, захватываемая установками по площади территории S м2 в год представляет валовый потенциал территории Wв, Вт•ч/м3год), который при удельной энергии ветра Ев, кВт•ч/(м2год), равен:

$$W_B = E_B \cdot \frac{S}{20} = \frac{1}{40} \cdot \rho \cdot T \cdot S \cdot \sum_{i=1}^{n} v_i^3 \cdot t_i$$

где: - плотность воздуха, кг/м3;

- T = 8700 – число часов в году;
- S – Площадь территории, м2;
- v_i - среднемноголетняя скорость ветра в диапазоне [i];
- t_i - вероятность нахождения скорости в диапазоне [i].

Получается, казалось бы, парадоксальный результат: валовый потенциал не зависит от высоты приземного слоя. Но весь вопрос в том, какую скорость необходимо взять для расчета валового потенциала. Вообще говоря, следует учесть профиль скорости ветра по высоте от 0 до Н. В первом приближении следует рассчитывать скорость ветра по высоте, определить среднее значение и по этому значению определить необходимые для расчета vi и ti.

Однако для оценочных расчетов валового потенциала, с достаточной точностью можно принять скорость ветра, равной скорости ветра на высоте h, составляющей примерно половину Н. 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. [27] Дальнейшее совершенствование методики определения технического потенциала было выполнено д.т.н. Николаевым В.Г., который предложил определять потенциал по произведенной электроэнергией модельного ВЭУ на площади субъекта РФ с учётом технических и экологических ограничений, а также выполнил ряд ТЭО сооружения ВЭС и программ использования ветровой энергии в регионах России. Также представляют практический интерес работы д.т.н Елистратова В.В. и д.физ.-мат н. Соловьёва А.А., предложивших при определении технического потенциала учитывать ограничения технического и географического характера.

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

По предложению д.т.н. В.В. Елистратова [28,29,30] оценка ветроэнергетических ресурсов в условиях ограниченной исходной климатической информации для повышения точности и достоверности результатов целесообразно проводить по трехуровневой 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 уровне (региональном) 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) расчетные почасовые данные скорости, и направление ветра, полученные в результате численного прогнозирования погоды. На основе данных региональных климатических наблюдений: давление, температура, влажность, вычисляется поле ветров и экстраполируется вниз к высотам 10-50 м, генерируя статистические данные ветрового режима в расчетных узлах сетки размером в северных регионах до 20 км, создавая тем самым виртуальные метеостанции. На третьем уровне предлагается микромасштабное моделирование ветрового потока с использованием данных реанализа специализированных баз данных MEPPA,CFSR, и др. спутниковых наблюдений NCAR/NCFR и баз цифровых моделей рельефа и шероховатости поверхности земли GlobalMapper, NASASPTM, EuropeanEnvirommentAgency и др. В качестве модели для широкомасштабного моделирования на третьем уровне принимается модель национальной лаборатории RiSO (Дания) (равнинный рельеф). Микромасштабное моделирование производится в программном комплексе WindPRO-общепринятым в мировой практике программном продукте для проектирования ВЭС. Результатами расчетов на третьем уровне являются карты высокого разрешения (до 200-50 м) для конкретного места размещения ВЭС на различных высотах.

15 Малые ВЭУ

В России в 2020 г. было 9 основных разработчиков и производителей малых ВЭУ. ООО «НИЦ «ВИНДЭК» (www.windek2010.narod.ru). Всего разработано восемь конструкций, в т.ч. четыре с вертикальной осью турбинного типа с направляющим аппаратом (Виндэк – 01В, мощностью 100 Вт (опытный образец); МВТЭУ-1 «Виндэк», мощностью 1000 Вт; МВТЭУ-5 «Виндэк», мощностью 5000 Вт; МВТЭУ 10 «Виндэк», мощностью 10000 Вт); четыре ВЭУ с горизонтальной осью: двухлопастная «Виндэк – ВЕТЭН-02» мощностью 200 Вт (выпущено 30 шт.); однолопастные ВЭУ «Виндэк – 05» мощностью 850 Вт (выпущено 10 шт); «Виндэк-1» мощностью 1500 Вт (опытный образец); двухлопастная

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

ВЭУ«Виндэк-5» мощностью 5000Вт. НИЦ «Виндэк» разрабатывает и производит для ВЭУ вентильные генераторы обращенной и необращенной конструкции мощностью от 100 Вт до 20 кВт.

ООО «Ветро-Свет» г. Санкт-Петербург (www. vetro-svet.spb.ru) разработало ВЭУ типа ВА-250 мощностью 200 Вт (мелкосерийное производство), ВА-900, мощностью 900 Вт.

ООО «Сальбомаш», г. Гатчина, Ленинградская обл.(www. mahaon – energy.ru) разработало четыреконструкции с вертикальной осью типа «ОСА300-12» мощностью 300 Вт (мелкосерийное производство) 500ВТ, 2000Вт, 3000Вт.

ООО «ГРЦ – Вертикаль» г. Миасс Челябинская область (www. src.-vertical.com) разработало ВЭУ с вертикальной осью ВЭУ -1 мощностью 1 кВт (мелкосерийное производство), ВЭУ -3 мощностью 3 кВт, ВЭУ-30 мощностью 30 кВт (опытный экземпляр).

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

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

ООО «Ветрострой», г. Сафоново Смоленской область (www. ветер-сила.рф) разработало и производит ВЭУ мощностью 500 Вт, 1 кВт, 2кВт (произведено более 1000 шт).

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

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

16 Выводы

1. В настоящее время в России ветроэнергетика развивается стремительными темпами. Она занимает второе место в возобновляемой энергетике после фотоэлектрических станций. На 01.09.2020 г. установленная мощность сетевых 22 ВЭС составляла 351 МВт. В настоящее время в России имеется устойчивое финансирование ветроэнергетики от ГК «Росатом», ГК «РосНАНО», ПАО «ЭНЕЛ РУС» и других мощных энергетических структур. В России приняты необходимые правительственные документы для стимулирования массового сооружения сетевых ВЭС мощностью свыше 5 МВт, а также созданы несколько производств их оборудования со степенью локализации до 65%.

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

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

3. Анализ столетнего развития российской ветроэнергетики показал, что наибольшие успехи мирового уровня были достигнуты в тридцатые годы прошлого века 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 имевшей в мире аналогов до 1940 г., ветродвигатели для арктических станций мощностью до 25 кВт. Большой вклад в развитие ветроэнергетики в России так же внесли институты ВИМЭ, ВИСХОМ, ИФ ВНИИЭМ, ВИЭСХ, НПО «ВЕТРОЭН».

4. В России в автономных зонах энергоснабжения, учитывая природно-климатические, социально-экономические особенности территории, высокую стоимость тарифа на электроэнергию и наличие высокого ветроэнергетического потенциала, создаются хорошие возможности для строительства энергетически и экономически эффективных ветродизельных энергокомплексов.

5. Все системные ВЭУ, как правило, имеют горизонтально-осевую конструкцию с трехлопастным ветроколесом.Основными направлениями совершенствования системных горизонтально-осевых трехлопастных ВЭУ являются:

- в части аэродинамики повышение эффективности профилей лопастей и снижение их шумности; применение композитных материалов;
- совершенствование приводов генераторов по двум направлениям: замена механических мультипликаторов на гидравлические, прямой привод генераторов от ветроколес;
- совершенствование конструкций 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 ветроколес;
- применение микропроцессорных систем управления режимами работы ветроустановок;
- создание ветроэнергетических автономных комплексов с различными видами первичных источников энергии и накопителями энергии на современных гелиевых, литий-фосфатных аккумуляторах;
- производство вертикально-осевых ветроустановок Дарриуса и Савониуса и их модификаций с управляемыми и неуправляемыми лопастями и возможным применением направляющего аппарата.

DOI: 10.24412/2658-6703-2021-4-2-18-34

Литература

1. Жуковский Н.Е. Полное собрание сочинений, публицистика. Том 6. Винты, ветряки, вентиляторы. Аэродинамическая труба. М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР. Главная редакция авиационной литературы. 1937.
2. Красовский Н.В. Новое крыло для русской ветряной мельницы / Труды ЦАГИ. Выпуск №3 . 1923.
3. ЦАГИ. Основные этапы научной деятельности 1918-1968. М.: Машиностроение. 1976. 352с.
4. Энциклопедия по машиностроению XXL оборудование, материаловедение, механика.https://mashxxl.info/page/111.204197022095020254060128125183030078204157081/9/07/2020
5. Сабинин Г.Х. Гироскопический эффект ветряных двигателей и расчет поворотных ветряков / Труды ЦАГИ. Выпуск 22.1926.
6. Сабинин Г.Х. Теория идеального ветряка / Труды ЦАГИ. Выпуск 32. 1929.
7. Сабинин Г.Х. Теория аэродинамический расчет ветряных двигателей //Труды ЦАГИ. Выпуск 104. 1931.
8. Сидоров В.И. Ветродвигатели в Арктике. Издание второе дополненное. Издательство СМП. М.-Л. 1946. 169с.
9. Секторов В.Р. Балаклавскаяопытнаяветроэлектростанция // Электричество. 1933. №19. С.51-54
10. Секторов В.Р. Современное состояние проектирования и опытного строительства крупных ветроэлектрических станций.//Электричество. 1933. №2. С.9-13.
11. Ананьев А.А., Седых С.Г., Шаманин В.С. Проблема использования ветра в СССР // Электричество. 1932. №14. С.716-718.
12. Горчаков П.К., Кондратюк Ю.В. Основные характеристики и перспективы ветроэнергетики // Электрические станции. 1939. № 10,11. С. 24-30.
13. Фатеев Е.М. Ветродвигатели и ветроустановки. М. ОГИЗ – Сельхозиздат. 1948.
14. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. М.2006.
15. Лось С.И. Козак А.Р. Ветродизельные станции на основе ветроэлектрических агрегатов АВЭ -250 СМ // Развитие возобновляемых источников энергии в России: возможности и практика (На примере Камчатского края) Сборник М.: ОМННО «Совет Гринпис»2006. С.49-51
16. Затопляев Б.С. Ветропарк в пос. Куликово Калининградской области // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С.58-65.

References

1. Zhukovskij N.E. Polnoe sobranie sochinenij, publicistika. Tom 6. Vinty, vetryaki, ventilyatory. Aerodinamicheskaya truba. M.-L.: ONTI NKTP SSSR. Glavnaya redakciya aviacionnoj literatury. 1937.
2. Krasovskij N.V. Novoe krylo dlya russkoj vetryanoj mel'nicy / Trudy CAGI. Vypusk №3 . 1923.
3. CAGI. Osnovnye etapy nauchnoj deyatel'nosti 1918-1968. M.: Mashinostroenie. 1976. 352s.

4. Enciklopediya po mashinostroeniyu XXL oborudovanie, materialovedenie, mekhanika.https://mashxxl.info/page/111.204197022095020254060128125183030078204157081/ 9/07/2020
5. Sabinin G.H. Giroskopicheskij effekt vetryanyh dvigatelej i raschet povorotnyh vetryakov / Trudy CAGI. Vypusk 22.1926.
6. Sabinin G.H. Teoriya ideal'nogo vetryaka / Trudy CAGI. Vypusk 32. 1929.
7. Sabinin G.H. Teoriya aerodinamicheskij raschet vetryanyh dvigatelej //Trudy CAGI. Vypusk 104. 1931.
8. Sidorov V.I. Vetrodvigateli v Arktike. Izdanie vtoroe dopolnennoe. Izdatel'stvo SMP. M.-L. 1946. 169s.
9. Sektorov V.R. Balaklavskayaopytnayavetroelektrostanciya // Elektrichestvo. 1933. №19. S.51-54
10. Sektorov V.R. Sovremennoe sostoyanie proektirovaniya i opytnogo stroitel'stva krupnyh vetroelektricheskih stancij.//Elektrichestvo. 1933. №2. S.9-13.
11. Anan'ev A.A., Sedyh S.G., SHamanin V.S. Problema ispol'zovaniya vetra v SSSR // Elektrichestvo. 1932. №14. S.716-718.
12. Gorchakov P.K., Kondratyuk YU.V. Osnovnye harakteristiki i perspektivy vetroener-getiki // Elektricheskie stancii. 1939. № 10,11. S. 24-30.
13. Fateev E.M. Vetrodvigateli i vetroustanovki. M. OGIZ – Sel'hozizdat. 1948.
14. Haritonov V.P. Avtonomnye vetroelektricheskie ustanovki. M.2006.
15. Los' S.I. Kozak A.R. Vetrodizel'nye stancii na osnove vetroelektricheskih agrega-tov AVE -250 SM // Razvitie vozobnovlyaemyh istochnikov energii v Rossii: voz-mozhnosti i praktika (Na primere Kamchatskogo kraya) Sbornik M.: OMNNO «Sovet Grinpis»2006. S.49-51
16. Zatoplyaev B.S. Vetropark v pos. Kulikovo Kaliningradskoj oblasti // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2018. № 2. S.58-65.

The hundred years of wind industry development in Russia. Part 2

Butuzov Vitaly[1], Bezrukikh Pavel [2], Gribkov Sergey [3]

[1]Kuban' State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia
[2] National Research University MPEI, Moscow, Russia
[3]Technical Center Windeq, Moscow, Russia

[1]E-mail: butuzov@newmail.ru
[2]E-mail: bezruky80veter@yandex.ru
[3]E-mail: windec@mail.ru

Abstract. There is presented the 2nd part of the article that points on the financial arrangements for wind station development, the principle investors and equipment producers. The work presents an analysis of 100-year development of the

Russian scientific school, implementations of their concepts, the principle designs of wind turbine. There are noticed the roles of N.E. Zhukovsky as a founder of Russian wind industy, and of his pupils, activities of sucg institutions as CAHI, Central Wind-Industrial, Electrification and Mechanization of Agriculture, NPO Vetroen. There are pointed on the principle achievements of the Soviet wind industry: a wind power plant in Balaklava (100 kW, 1931), wind engines VD-8 (1300 units, 1936), Arctic wind power stations CVEI-D-12 (15 kW, 1936), a wind-diesel station in Kazakhstan (400 kW, 1957).
The article reviews the first wind plants in the CIS countries, in Crimea - 110 MW on the base of the KB Yuzhnoe (Dnepropetrovsk) wind turbines, at Kulikovo village in Kaliningrad region – 5.1 MW, gives a list of the major wind and wind-diesel plants and evaluates the prospects of Russian wind industry development.

Key words: wind industry, wind turbine, wind plant, wind engine, wind wheel, wind-diesel plant, wind mills, wind blades, mast, electricity generator, inertial energy-storage device, Central Aero-and-Hydrodinamical Institute (CAHI), Northern Sea Route (NSR).