
ЭНЕРГЕТИКА

ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ (05.14.08)

УДК 621.548

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-11-26

Ветроэнергетика: история, состояние, перспективы

Э.М. Перминов

Активное развитие возобновляемой энергетики во многих странах мира началось после энергетического кризиса середины 1970-х гг. XX в. с появлением коммерческих технологий. В настоящее время данный процесс происходит гораздо быстрее, чем предполагалось еще 10 лет назад.

Современные технологии использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) привлекательны своими преимуществами: распространенностью, неисчерпаемостью, меньшим загрязнением окружающей среды, сокращением невосполнимых расходов традиционных ископаемых видов энергоресурсов, современными высокими технологиями, созданием новых квалифицированных рабочих мест. Россия, несмотря на большие запасы нефти, газа, угля, заинтересована в использовании ВИЭ, как важного средства диверсификации топливно-энергетического баланса, энергосбережения, повышения энергобезопасности и эффективности при централизованном и децентрализованном энергоснабжении регионов. Особенно это важно там, где существуют большие проблемы с надежным и качественным энергоснабжением.

Одним из направлений возобновляемой энергетики является ветроэнергетика, которая, по различным оценкам, может обеспечить до 50% и более перспективного энергопотребления.

Сделана попытка оценки истории, состояния и перспектив развития мировой и отечественной ветроэнергетики. Показаны этапы развития, роль отечественной и отраслевой науки, возможности отечественной производственной базы и пути ее совершенствования.

При реструктуризации и реорганизации отечественной экономики были в значительной мере разрушены научно-конструкторские структуры, отечественное энергомашиностроение, радиоэлектроника, приборостроение и другие отрасли, на которых базируются ВИЭ и, в частности, ветроэнергетика.

Ее потенциал, как и других нетрадиционных для российской энергетики ВИЭ, пока востребован не в полной мере, хотя в принципе позволяет решить многие энергетические проблемы. Это связано и с тем, что сложившийся на оптовом рынке электроэнергии уровень цен ниже себестоимости генерации электроэнергии на основе ВИЭ, что особенно важно при решении вопросов децентрализованного энергоснабжения России с ее обширной территорией, слабо развитой инфраструктурой и самым суровым в мире климатом, где по разным оценкам от 50 до 70% территории не имеют надежного гарантированного энергообеспечения.

Вопросы успешного эффективного развития ВИЭ, в том числе ветроэнергетики, должны стать важнейшими задачами уже ближайшего будущего, и в последние годы положительные шаги в этом направлении предпринимаются. Следует понимать, что ВИЭ не являются альтернативой традиционной энергетике, а дополняют ее, занимая свою совершенно определенную нишу.

Ключевые слова: ветроустановка, ветропотенциал, лопастная система (ветроколесо), ветроэлектростанция (ВЭС), энергоресурсы, энергоснабжение, энергобезопасность, ветроэнергетика, автономная, децентрализованная и возобновляемая энергетика.

Для цитирования: Перминов Э.М. Ветроэнергетика: история, состояние, перспективы // Вестник МЭИ. 2020. № 5. С. 11—26.
DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-11-26.

Wind Power: History, State, and Prospects

E.M. Perminov

Many countries around the world began to actively develop renewable energy after the energy crisis of the mid 1970s, when commercial technologies for its use emerged, and nowadays, progress in this field develops much more rapidly than it was expected a decade ago.

Modern technologies of using renewable energy sources (RES) are attractive owing to their advantages: they are widely available and inexhaustible; they feature smaller pollution of the environment; their use helps save traditional nonrenewable fossil energy resources; they involve the use of modern high technologies; in addition, they help create new skilled jobs. Russia, despite its large reserves of oil, gas, and coal, is also interested in using RES as an important means of diversifying the country's fuel and energy balance, energy saving, and improving energy security and efficiency with centralized and decentralized supply of power to all regions of the country. This is especially important for regions that face big problems with ensuring reliable and high-quality supply of power.

One of the most important areas of renewable energy is wind energy; according to different estimates, it can provide up to 50% or more of the future energy consumption.

An attempt is made to estimate the history, state, and prospects for development of the world and domestic wind power industry. The development stages and the role of domestic and industry science, and also the possibilities of the domestic production facilities and ways of improving it are shown. In the course of restructuring and reorganizing the domestic economy, research and development structures, the domestic industry constructing power machinery and equipment, radio electronics, instrument making, and other industries that form the basis for RES and, in particular, wind power, were destroyed to a significant extent.

The potential of wind energy, as well as that of other RES that are "not traditional" for the Russian energy sector, has not been fully employed as yet, although in principle, they can solve many energy problems. This is also due to the fact that the current price level in the wholesale electricity market is lower than the net cost of electricity generated by means of RES. This is especially important in solving matters concerned with arrangement of decentralized power supply in Russia, with its vast territory, poorly developed infrastructure, and the world's harshest climate, in which, according to various estimates, from 50 to 70% of the territory is not covered by reliable guaranteed power supply.

The problems of successful and efficient development of RES, including wind energy, should become the most important issues already in the near future, and it should be noted that positive steps in this direction have been taken in recent years. At the same time, it should be understood that RES are not an alternative to the "traditional large-scale" power industry, but rather complement it, occupying its own very specific niche.

Key words: wind power unit, wind potential, blade system (wind wheel), wind power plant, energy resources, power supply, energy security, wind energy, autonomous, decentralized and renewable energy.

For citation: Perminov E.M. Wind Power: History, State, and Prospects. Bulletin of MPEI. 2020;5:11—26. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-11-26.

Из истории мировой и отечественной ветроэнергетики

Современная энергетика в России начиналась с ветровых и водяных мельниц, малых гидроэлектростанций, небольших паровых и водяных котлов, использования энергии солнца, биомассы (дров, торфа, отходов лесного, сельскохозяйственного и промышленного производств) для непосредственных бытовых нужд. Позднее основными энергоресурсами стали уголь, нефть, газ и ядерное горючее.

Первые ветряные мельницы служили для размола зерна в Персии уже в 200-м г. до н. э. Мельницы такого типа были распространены в исламском мире, а в XIII в. занесены в Европу крестоносцами (рис. 1).

Интересно, что некоторое отношение к ветроэнергетике имеет и Карл Маркс. Мельницы на козлах, так называемые немецкие мельницы, являлись до середины XVI в. единственно известными. Сильные бури могли опрокинуть такую мельницу вместе со станиной.



Рис. 1. Козловая мельница

В середине XVI столетия один фламандец нашел способ, предотвращавший опрокидывание мельницы. В ней осталась подвижной только крыша, и для того, чтобы поворачивать крылья по ветру, необходимо было повернуть лишь крышу, в то время как само здание прочно стояло на земле (К. Маркс. «Машины: применение природных сил и науки»). Массу козловой мельницы ограничивали в связи с тем, что ее приходилось поворачивать вручную, поэтому была снижена и ее производительность. Усовершенствованные мельницы получили название шатровых (рис. 2).

В XVI в. в городах Европы появляются водонасосные станции с использованием гидродвигателя и ветряной мельницы: Толедо — 1526 г., Глочестер — 1542 г., Лондон — 1582 г., Париж — 1608 г. В Нидерландах многочисленные ветряные мельницы откачивали воду с земель, огражденных дамбами. Отвоєванные у моря территории использовались в сельском хозяйстве. В засушливых областях Европы ветряные мельницы применяли для орошения полей. Ветряные мельницы, вырабатывающие электроэнергию, были изобретены



Рис. 2. Шатровые мельницы в Испании

в XIX в. в Дании. Там в 1890 г. была построена первая ветроэлектрическая установка (ВЭУ), а к 1908 г. насчитывалось уже 72 ветроэлектростанции мощностью от 5 до 25 кВт. Крупнейшие из них имели высоту башни 24 м и четырехлопастные роторы диаметром 23 м.

Использование энергии ветра в России также имеет богатую историю. Ветряные мельницы получили распространение уже в XVII — XVIII столетиях. В конце XIX в. в мукомольном производстве задействовано более 200 000 ветряных мельниц небольшой мощности (до 3...5 кВт), перемалывавших до 34 млн т зерна в год (2/3 товарного зерна страны). К 1913 г. в России насчитывалось до 1 млн ветряных мельниц и других ветровых установок разного назначения с суммарной установленной мощностью до 3 ГВт. По имеющимся данным в начале прошлого века в России было около 1 млн водяных мельниц, а в 1930 г. в Советском Союзе эксплуатировалось до 800 000 ветряных мельниц.

Анализ исторического и технологического опытов развития ветроэнергетики в СССР и России выполнен и изложен в ряде работ [1—4].

В начале XX в. в России серийно производили тихоходные многолопастные металлические ветроустановки конструкции Давыдова для водоподъема на железнодорожных станциях. Действенный импульс к развитию ветроэнергетики дала аэродинамическая теория пропеллерного ветродвигателя, созданная в 1914 — 1918 гг. Н.Е. Жуковским и его последователями — В.П. Ветчинкиным, Г.Х. Сабининым, Н.В. Красовским, А.В. Винтером, А.Г. Уфимцевым.

В 1920 — 1930-е гг. в СССР разработаны основы теории идеальных и реальных ВЭУ, определены оптимальные аэродинамические профили лопастей ветроколеса (ВК), создано множество схем и типов конструкций, накоплен опыт продувок и экспериментальных испытаний натуральных образцов и моделей в аэродинамических трубах и природном ветровом потоке [5].

Установившаяся теория и практические результаты определили основные направления и перспективы развития отечественной и мировой ветроэнергетики XX в. Исходя из полученных знаний, построены образцы мощных (до 100 кВт), быстроходных ВЭУ с малым числом лопастей хорошо обтекаемой формы и эффективными и надежными системами регулирования.

Велика роль новаторских для мировой практики и технического прогресса ВЭУ отечественных разработок в области аккумулирования ветровой энергии. Изобретенный А.Г. Уфимцевым инерционный аккумулятор (1918 г.) использовался на ВЭУ разных типов. Ему же принадлежат идеи теплового водяного аккумулирования, а также разработка в 1918 г. принципа водородного аккумулирования. Российскими учеными продолжен ряд перспективных схем гидравлического (совместная работа ВЭУ и ГЭС, создание наледей в зимний период) и пневматического аккумулирования

ветровой энергии. Изучение систем механического стабилизаторного и инерционного регулирования ВЭУ (В.П. Ветчинкин и Н.В. Красовский) и лопастей с концевыми поворотными стабилизаторами (Г.Х. Сабинин) позволило создать в 1940 — 1950-е годы ВЭУ повышенной надежности и энергетической эффективности, работавшие даже при штормовых ветрах до 40 м/с с более чем 10-летним ресурсом в условиях Крайнего Севера.

Переходу от тихоходных металлоемких ветросиловых ВЭУ к более эффективным и быстроходным способствовало изобретение муфты С.Б. Перли (1935 г.), автоматически подключавшей нагрузку к валу ВЭУ при достижении заданного числа оборотов и страгивания при малых скоростях ветра. В 1924 г. в ЦАГИ под руководством Н.В. Красовского создана быстроходная ВЭУ мощностью 35 кВт с системой механического регулирования, разработанной Г.Х. Сабининым. К концу 1920-х годов налажено серийное производство тихоходных ветродвигателей ВД-5 и ВД-8 для водоподъема и механического привода ряда сельхозмашин, модернизированных и доведенных впоследствии до массового серийного производства в виде более совершенных конструкций ТВ-5 и ТВ-8 [6]. Позднее сконструирован быстроходный трехлопастной ветродвигатель Д-12, помимо сельского хозяйства использовавшийся в Арктике для электрификации и системы связи Северного морского пути. В 1931 г. в Крыму в районе г. Балаклавы построена крупнейшая в мире ВЭС Д-30 мощностью 100 кВт с $D_{\text{вк}} = 30$ м для параллельной работы на местную электросеть (рис. 3), проработавшая до 1942 г. В Центральном ветроэнергетическом институте разработан и в 1935 г. утвержден Наркомтяжпромом СССР проект сетевой ВЭУ ЦВЭИ — Д-50 мощностью 1000 кВт (рис. 4). К 1941 г. единичная мощность всех ветроэлектростанций СССР достигла 1,25 МВт. Проект не был реализован в связи с войной, но вновь рассмотрен и одобрен в 1945 г. применительно к созданию ВЭС из 10 агрегатов ЦВЭИ — Д-50 с номинальной мощностью 10 МВт.



Рис. 3. Балаклавская ВЭУ мощностью 100 кВт, 1931 г.



Рис. 4. ВЭУ мощностью 1 МВт, 1935 г

Разработанные проекты оказались нереализованными в связи с трудностями организации централизованного производства в послевоенный период. В 1934 — 1938 гг. в СССР произведено и введено в эксплуатацию примерно 3000 ВЭУ типов ТВ-5 — ТВ-8 [7]. К 1938 г. налажено крупносерийное производство ВЭУ мощностью 1,8...4 кВт с суммарным выпуском в предвоенный период около 10 тыс. В 1940 г. по постановлению Правительства СССР «Гипросельмаш» начал проектирование нескольких заводов для массового производства ВЭУ, но в связи с войной все работы, а также производство ВЭУ были свернуты. С 1935 г. контроль за разработками и производством ВЭУ осуществляла Государственная межведомственная комиссия по проведению сравнительных испытаний и отбору ВЭУ для их серийного производства и внедрения. В создании ВЭУ в СССР участвовали свыше десятка НИИ, а их производство шло на нескольких крупных заводах. Работы по созданию и использованию ВЭУ активно проводились во многих республиках бывшего СССР, особенно в Казахстане, России, Туркмении, Украине. Параллельно активно исследовались ветро-энергетический потенциал (ВЭП) и создание ветровых кадастров страны [8]. В 1935 г. выпущен первый атлас ветроэнергетических ресурсов СССР на основе многолетних измерений скорости ветра на метеостанциях СССР и анализа полученных данных. Последующие интенсивные разработки привели к созданию атласов республик СССР и отдельных регионов страны [9]. Важным достиже-

ем отечественной метеорологии стала разработанная в 1930-е гг. М.Е. Подтягиным и впервые в мире введенная в практику расчета параметров ветра и ветроэнергетического потенциала (ВЭП) классификация открытости метеорологических станций (МС), устанавливающая 9 классов открытости для ветра и количественные зависимости измеряемых скоростей ветра от высоты установки флюгера и класса станции. Впоследствии В.Ю. Милевским (ГГО) предложена более информативная классификация МС, насчитывавшая 24 класса открытости, более перспективная для моделирования ВЭП на территории бывшего СССР, действующая в РФ и в настоящее время, и явившаяся важной составляющей методики определения ветровых характеристик.

В послевоенный период в короткие сроки было организовано серийное производство ветродвигателей ТВ-5, ТВ-8, Д-12, УНДИМ Д-10. Активно возобновились работы по ветроэнергетике в ЦАГИ, ВИЭСХ, ЦНИЛВ, ЭНИН АН СССР. Созданы и произведены опытные партии ветродвигателей ВЭС Д-18 мощностью 30 кВт. Достижением отечественной ветроэнергетики стала разработка, строительство в 1958 г. и эксплуатация в г. Акмолинске (Казахстан) первой в мире многоагрегатной ВЭС-400 на базе 12 ВЭУ Д-18 конструкции ЦАГИ, подтвердившей эффективность создания кустовых ВЭС. Работая в автономном режиме без системы аккумулирования, она давала электроэнергию высокого качества благодаря эффективному аэродинамическому регулированию ветродвигателя Д-18 и использованию инерционного аккумулятора по схеме Уфимцева—Ветчинкина. [8, 9].

Для расширения базы использования ВЭУ с 1950 г. государством было введено льготное финансирование на покупку установок, что обеспечило в 1950 — 1956 гг. резкое увеличение спроса на них и, соответственно, расширенное производство. В начале 1950-х гг. выпускалось до 10 000 ВЭУ в год. Объемы производства ВЭУ в СССР в 1934 — 1987 гг. приведены в табл. 1. Всего по данным Госплана с 1934 по 1987 гг. было выпущено до 60 000 ВЭУ суммарной мощности до 150 МВт.

В 1960 г. ЦК КПСС и Совет Министров СССР приняли постановление о производстве ветровых и ветронасосных установок различной мощности на 1961 — 1965 гг. в количестве 68 000 шт. общей мощностью около 70 МВт с распределением по годам (табл. 2) [10].

К этому времени относится разработка высокоэффективных быстроходных ВЭУ нового поколения

Таблица 1

Серийное производство ВЭУ в СССР в 1934 — 1987 гг.

Показатель	Годы					
	1930 — 1937	1938 — 1941	1950 — 1956	1957 — 1977	1978 — 1987	1987 — 2002
Число выпущенных ВЭУ, шт.	3 000	4 000	37500	12000	1754	2000
Установленная мощность, МВт	9	16	80	20	5	Не более 1 МВт

Таблица 2

План серийного производства ветронасосных ВЭУ в СССР в 1961 — 1965 гг.

Показатель	Годы				
	1961	1962	1963	1964	1965
Выпуск, тыс. шт.	2	6	12	20	28
Установленная мощность, кВт	2000	6000	12000	20000	28000

для пастбищного водоснабжения: «Вихрь», «Беркут», УВЭУ-4, УВЭУ-6 и ВБ-3Т, работающих с высокоэффективными электронасосами.

Запланированные рубежи оказались недостаточными для народного хозяйства СССР, и в 1961 г. технико-экономическим Советом Госкомитета по автоматизации и машиностроению Совета Министров СССР разработан перспективный план развития отечественной ветроэнергетики до 1980 г. В соответствии с ним суммарная установленная мощность ВЭС к 1980 г. должна была превысить 7 ГВт при ежегодном наращивании после 1976 г. примерно 550 МВт. Указанная мощность не являлась определяющей для страны в целом, но обеспечила бы электроэнергией потребителей в тех местах, где ее получение за счет других энергоисточников было невозможно или экономически нецелесообразно. Приведенные цифры (около 6 ГВт) отражают потребности в ВЭУ бывшего СССР в 1960 — 1980 гг., включая перспективные для развития ветроэнергетики Казахстан, Украину и Прибалтику. При планируемых темпах развития к 1980-м годам XX в. СССР оказался бы одним из лидеров мировой ветроэнергетики. Однако в конце 1950-х гг. в стране был взят курс на ускоренное развитие «большой» энергетики на базе мощных ТЭС, ГЭС и АЭС и создание на их основе ЕЭС страны. Таким образом, в период 1967 — 1980 гг. развитие ветроэнергетики в СССР резко затормозилось, а крупносерийное производство ВЭУ и научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области ветроэнергетики практически прекращены. Исключения, по которым были

определены следующие ориентиры развития, составляли разработки ВЭУ «Вихрь» с пневматическим насосом, ВЭУ «Сокол», АВЭУ-6 (4 кВт) и УВЭУ-8-16-12 мощностью 15 кВт, доведенные до опытных образцов и небольших опытных партий. Знания и традиции отечественной ветроэнергетики в период с конца 1960-х и до середины 1980-х гг. сумели сохранить лишь немногие организации (институты ЦАГИ, «Гидропроект», «ВНИИГ», ВИЭСХ Минсельхоза СССР и НПО «Ветроэн» Минводхоза СССР). НПО «Ветроэн» выпускал до 400 штук в год АВЭУ-6, но из-за низкого качества и отсутствия сервисного обслуживания они не находили практического применения.

Наиболее существенной причиной бурного развития мировой ветроэнергетики в конце XX столетия стал мировой энергетический кризис 1973 — 1974 гг., приведший к активным разработкам и организации крупного серийного производства ВЭУ в индустриально развитых странах: США, Дании, Германии, Англии, КНР, Японии, Южной Корее.

Развитие отечественной ветроэнергетики с конца 1980-х до начала 2000-х гг. XX в.

Очередной этап развития ветроэнергетики в СССР пришелся на вторую половину 1980-х гг. В 1986 — 1991 г. оценкой ветропотенциала, проведенной Гидропроектом, показана возможность и перспективность отрасли, которая впоследствии была уточнена (табл. 3).

Как следует из табл. 3, экономический потенциал ветровой энергии в нашей стране составляет примерно 260 млрд кВт·ч/год, т. е. около 25% производства электроэнергии в России.

Таблица 3

Ветропотенциал России (оценка на высоте 50 м)

Административные округа	Площадь, тыс. км ²	Валовый потенциал региона, млрд кВт·ч/г	Технический потенциал региона, млрд кВт·ч/г	Экономический потенциал региона, млрд кВт·ч/г
Центральный	652,8	30347,4	606,948	3,03474
Северо-Западный	1677,9	173033,7	3460,674	17,30337
Южный	589,2	71423,5	1428,47	7,14235
Приволжский	1035,9	94502	1890,04	9,4502
Уральский	1788,9	646794,7	12935,89	64,67947
Сибирский	5114,8	605192	12103,84	60,5192
Дальневосточный	6215,9	987761,9	19755,24	98,77619
Итого			260,9055	

Планировались разработка и организация производства крупных современных ВЭУ. Проектированием ВЭС занялось Минэнерго СССР. Было подготовлено Постановление Совета Министров СССР о возложении ответственности по производству ветроэнергетической техники на Минэнергомаш СССР. Главным предприятием определен Сызранский завод тяжелого машиностроения. Однако, при подготовке программы работ выяснилось, что проектирование сложного производства современных ВЭУ в данной организации невозможно обеспечить [11,12]. Была предпринята неудачная попытка организовать производство ВЭУ мощностью 1 МВт с вертикальной осью вращения по разработкам ОАО «Институт «Гидропроект» на ЛМЗ и заводе «Электросила». Несколько экспериментальных ВЭУ мощностью от 2 до 100 кВт смонтированы на Чиркейской ГЭС в поселке Дубки Республики Дагестан, где ОАО РАО «ЕЭС» приняло решение о создании ветрополигона и базы экспериментальной и возобновляемой энергетики при активной поддержке директора ГЭС М.Ш. Мисриханова.

При анализе на НТС и коллегии Минэнерго СССР данной тематики в связи с началом конверсии оборонных отраслей принято решение об использовании возможностей оборонных предприятий. Руководство работами поручено заместителю министра, руководителю Государственной программы «Экологически чистая энергетика» А.Ф. Дьякову. Во исполнение решения Министерства Главтехуправление Минэнерго СССР (начальник В.И. Горин, начальник отдела новых и перспективных технологий и материалов в энергетике Э.М. Перминов) привлекло в качестве раз-

работчиков Минавиапром СССР (МКБ «Радуга», генеральный директор и генеральный конструктор, д. т. н. И.С. Селезнев) и Минобщемаш СССР (НПО «Южное», генеральный директор и генеральный конструктор академик АН СССР В.Ф. Уткин). С этими структурами были заключены крупные договоры на НИОКР и организацию производства ветроэнергетической техники. Решением коллегии Министерства к разработке проектов ВЭС приступили Московское, Ленинградское и Куйбышевское отделения института «Гидропроект». Выполнены на разных стадиях проектирования проекты Восточно-Крымской, Ленинградской, Магаданской, Морской (Карелия), Приморской (Приморский край), Куликовской ВЭС общей мощностью более 200 МВт и экспериментальной базы нетрадиционной энергетики на Чиркейской ГЭС [13, 14]. В сложившейся тогда экономической ситуации (отсутствие финансирования и системы взаимозачетов) первоочередными оказались ВЭС, представленные в табл. 4.

Определенную роль в российской ветроэнергетике сыграла Куликовская ВЭС, построенная с участием датских специалистов на базе б.у. ВЭУ датской фирмы «Вестас» мощностью 225 кВт (рис. 5). В ее состав вошла ВЭУ фирмы «Вестас» мощностью 600 кВт. Это была первая промышленная автоматизированная ВЭС с компьютерным управлением. Ее создание активно поддержали генеральный директор «Янтарьэнерго» Б.С. Затопляев и администрация Калининградской области.

Опыт Куликовской ВЭС получил поддержку ОАО РАО «ЕЭС России», и администрацией Калининградской области был подготовлен совместный с Данией проект по созданию первой в РФ крупной офшорной

Таблица 4

Основные показатели ВЭС России

Наименование энергосистемы, ВЭС	Установленная мощность ВЭС, количество ВЭУ/кВт	Среднегодовая выработка электрической энергии, тыс. кВт·ч	Год ввода в эксплуатацию	Тип ВЭУ	Страна-изготовитель ВЭУ
Калмэнерго, Калмыцкая ВЭС	2000/2×1000	143,5	1994	Радуга-1	Россия
Комиэнерго, Заполярная ВЭС	1500/6×250	—	1996	АВЭ-250С	Украина
Ростовэнерго, Маркинская ВЭС	300/10×30	6,2 (за 6 мес.)	1995-96	HSW-30	Германия
Янтарьэнерго, Куликовская ВЭС	1500/1×600 + 20×225	7650	1998	W-4200/600, V-27/225	Дания
Башкирэнерго, ВЭС Тюпкильды	2200/5×550	900,0 (за 7 мес.)	2001	ЕТ-550/41	Германия
Чувашэнерго, Марпосадская ВЭС	215/2×107,5	27,8	1997 — 1999	USW 56-100	Украина
Камчатскэнерго, ВЭС на о. Беринга	500/2×250	777,7	1998	Micon M600	Дания
Чукотская ВЭС, г. Анадырь	2500/10×250	—	2002	АВЭ-250СМ	Украина, Россия



Рис. 5. Первая промышленная Куликовская ВЭС 5,2 МВт ОАО «Янтарьэнерго», 2002 г

Калининградской ВЭС мощностью 50 МВт. Однако, после реорганизации электроэнергетики в 2008 г. о нем забыли, как и о Дальневосточной ВЭС на о. Русский.

По договору с НПО «Ветроэн» (главный конструктор В.П. Харитонов) и НПО «Южное» (главный конструктор В.И. Кукушкин, ведущие конструкторы В.М. Каменчук, Н.С. Голубенко) предусматривались разработка, изготовление и испытания четырех экспериментальных ВЭУ мощностью 250 кВт в сетевом варианте для размещения в разных климатических зонах страны и организация их производства. Причем НПО «Южное» уже в июне 1990 г. (менее чем через год) представило экспериментальный образец АВЭ-250 с генератором мощностью 100 кВт, изготовленный на предприятиях НПО «Южное» (Украина) и РСФСР с участием НПО «Ветроэн» и смонтированный на полигоне в г. Павлограде (рис. 6). В 1991 — 1992 гг. изготовлены четыре опытные ВЭУ и смонтированы в Крыму на первой в СССР Восточно-Крымской ВЭС близ Геленджика на базе НПО «Ветроэн», в Иван-городе и на экспериментальной базе нетрадиционной энергетики на Чиркейской ГЭС. [13—16].

Велась разработка двух сетевых ВЭУ ГП-250 в рамках Минэнерго СССР институтами «Гидропроект» и ВНИИЭ совместно с КБ им. М.Л. Миля. Однако после заключения договоров с ОАО МКБ «Радуга» им.

А.Я. Березняка и НПО «Южное» финансирование этой разработки было прекращено, и работа курировалась ГКНТ СССР. Одна такая установка была изготовлена на НПО «Ленподъемтрансмаш» и смонтирована на цементном заводе в г. Новороссийск. В 1993 г. осуществлен пробный пуск экспериментального образца ГП-250, однако ВЭУ разрушилась и восстановить ее не удалось, хотя завод был готов продолжить работу по данной тематике.

В 1992 — 1995 гг. проведены пробные пуски установок АВЭ-250 на Украине и опытных площадках РАО «ЕЭС России». Большинство опытно-промышленных установок проработало в энергосистеме до года и более, однако, в силу технических и финансовых причин, их доработку и доводку в полной мере осуществить не удалось.

В конце 1991 г. по инициативе Управления новых и перспективных технологий и материалов в энергетике Комитета электроэнергетики Минтопэнерго России (начальник управления Э.М. Перминов) в АТЭК «Комиэнерго» (генеральный директор М.Д. Косолапов, зам. главного инженера В.Я. Шеин) начато строительство Заполярной ВЭС близ Воркуты мощностью 2,5 МВт (10 АВЭ-250 СМ). За 1992 — 1995 гг. удалось смонтировать шесть ВЭУ. Это была первая в мире крупная ВЭС, работающая в условиях Крайнего Севера. Полу-



Рис. 6. Инициаторы и организаторы очередного этапа развития ветроэнергетики. Представители Минэнерго СССР, Минводхоза СССР, НПО «Южное» и НПО «Ветроэн» на полигоне в г. Павлограде после пуска опытно-промышленной АВЭ-100, июнь 1990 г.

чен уникальный для отечественной и мировой практики опыт использования ВЭС в суровых ветровых и климатических условиях Заполярья. Он был использован позднее при проектировании и строительстве в 2000 — 2002 гг. Чукотской ВЭС-1, расположенной на южном берегу Анадырского лимана на мысе Обсервации близ г. Анадырь. Инициативу активно поддержал губернатор Чукотского АО Р.А. Абрамович, для ее строительства был приглашен В.Я. Шеин, а в решении проектных и технических вопросов участвовала кафедра возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ» (зав. кафедрой В.И. Виссарионов). По поручению губернатора АО НПО «НЕТРАЭЛ» разработана программа развития энергетики ЧАО со значительным использованием местных и возобновляемых ресурсов: ветра, геотермики, малых ГЭС, местных углей, включая их энерготехнологическую переработку, приливной и волновой энергии.

На рисунке 7 даны общий вид Чукотской ВЭС-1 и одна из смонтированных там установок АВЭ-250 СМ. Станция работает параллельно с электрической сетью поселков Шахтерский и Угольные Копи, электропитание которых осуществляется от дизельных электростанций суммарной установленной мощностью 12 МВт. Всего НПО «Южное» с участием НПО «Ветроэн» провели на Павлоградском машиностроительном и Новороссийском судостроительном заводах монтаж, испытания и сдачу в опытную эксплуатацию 45 ветроустановок АВЭ-250 мощностью 200...250 кВт (из них 25 — на Украине и в Крыму, 20 — на территории РФ).

В НПО «Южное» велись работы по использованию переданных материалов института «Гидропроект» по сетевым ВЭУ с вертикальной осью вращения ВК с нерегулируемыми лопастями. В итоге были сделаны экспериментальные установки ЕСО-0020 (рис. 8) мощностью 20 кВт и ВТО-1250 мощностью 1250 кВт с размещением опорно-трансмиссионной системы и основного оборудования наверху башни и у земли. ОАО РАО «ЕЭС России» в п. Дубки в Дагестане и на Украине близ г. Николаева начат монтаж ВЭУ с вертикальной осью вращения мощностью 420 кВт. Российской стороной работа не была завершена из-за прекращения

финансирования. К сожалению, все попытки применить ВЭУ с вертикальной осью и различными фигурными роторами и приспособлениями и у нас в стране, и за рубежом заканчивались лишь созданием опытных образцов. В большой ветроэнергетике от них отказались все ведущие страны: КНР, США, Англия, Дания и др. Продолжают строить небольшие ВЭУ 1...5 кВт, но они не пошли в масштабное производство, а значит, дороги в обслуживании.

Одновременно ФГУП «ГРЦ «КБ им. академика В.П. Макеева» совместно с Уфимским авиационным институтом создан ветродизельный энергетический комплекс с ВЭУ мощностью 100 кВт. Но эта работа, как и другие, не была закончена. Первый отечественный ВДЭК установлен на островах Беринга в Камчатской области в с. Никольское. В состав ВДЭК вошли две ВЭУ мощностью по 250 кВт датской фирмы «Micon», которые с 1998 г. работают параллельно с ДЭС установленной мощностью 1260 кВт (четыре дизель-агрегата мощностью по 315 кВт). Экономия дизельного топлива на ДЭС составила 12...15 %. В настоящее время ВДЭС обновлена и продолжает работу.

Чукотская ВЭС-1 и Заполярная ВЭС — первые ВЭС, работающие в уникальных климатических, мерзлотно-геологических и ветровых условиях. Опыт их строительства и эксплуатации подтверждает перспективность развития ветроэнергетики на всем российском севере.

Одновременно по договору с ОАО МКБ «Радуга» им. А.Я. Березняка предусматривались разработка, изготовление и испытания двух экспериментальных ВЭУ мощностью 1000 кВт и двух экспериментальных ВЭУ мощностью 250 кВт (главный конструктор А.З. Чучалов), создание экспериментальной базы ветроэнергетики в Крыму и организация последующего производства данных ВЭУ.

Выпуск ВЭУ «Радуга-250» мощностью 250 кВт организовывали на Смоленском авиазаводе. Однако, в связи с отсутствием финансирования, работы в 1994 г. были прекращены.

На Тушинском машиностроительном заводе (г. Москва) организовано производство ВЭУ «Радуга-1000» мощностью 1000 кВт (рис. 9). К производству были



Рис. 7. Промышленная Чукотская ВЭС мощностью 2,5 МВт на базе АВЭУ-250СМ, 2002 г.



Рис. 8. Двухроторная ветроустановка ЕСО-0020 и ее ротор



Рис. 9. Ветроустановки МКБ «Радуга» мощностью 1000 кВт, Калмыцкая ВЭС (июнь 1995 г.) и ее монтаж с помощью «шевра» 16 кВт (полигон в Дубне)

привлечены ПО «Атоммаш», ПО «Электросила», ТКМБ «Союз», ОКБ «Марс», ХЭМЗ и другие ведущие предприятия страны

Две экспериментальные ВЭУ «Радуга-1000» первоначально планировалось смонтировать в Крыму, затем в Дагестане, а после изменения ситуации в стране в 1992 г. принято решение разместить их на площадке срочно запроектированной Калмыцкой ВЭС мощностью 22 МВт с выработкой 42 млн кВт·ч/год. Большую заинтересованность и активность в создании ВЭС проявил генеральный директор ОАО «Калмэнерго» Н.П. Прокуроров. Строительство ВЭС на двух выделенных площадках на полную мощность должно было быть завершено в 2000 г. Для монтажа ВЭУ использовали не мощный кран, как обычно, а специально спроектированный «шевр» (см. рис. 9). В декабре 1994 г. монтаж завершился, а июне 1995 г. началось опробование первой мегаваттной ВЭУ в мире.

К сожалению, строительство Калмыцкой ВЭС, несмотря на большой задел (подготовку площадки и фундаментов, организацию производства опытной партии ВЭУ (10 штук) и монтаж 3 установок) за 20 лет так и не было завершено. В связи со сложностью установки, ее новизной для разработчиков и заказчика, возникло много проблем при освоении, отработке и организации производства. За время эксплуатации более четырех лет ВЭУ отработала около

2600 ч. Основные неполадки были связаны с АСУ, гидравликой, агрегатом передачи мощности. С 1998 г. финансирование проекта по строительству ВЭС ОАО РАО «ЕЭС России» прекращено, и работы продолжались только за счет средств ОАО «Калмэнерго» по фонду НИОКР Корпорации «ЕЭЭК», а с апреля 2001 г., когда сломалась одна из лопастей, работы были окончательно свернуты.

Работы были продолжены только в 2007 г. и начале 2008 г., когда было выполнено несколько пробных пусков ВЭУ с другой системой генерирования с четырьмя высокооборотными генераторами на постоянных магнитах

Следует подчеркнуть, что статус опытно-экспериментальной ВЭС позволил провести отработку первой оригинальной отечественной ВЭУ единичной мощностью 1 МВт. При этом в короткие сроки были созданы и изготовлены три конструктивных исполнения ВЭУ, отличающихся системами генерации, АСУ и компоновкой оборудования.

За период опытной эксплуатации ВЭС (ВЭУ ст. № 19) было выяснено, что установка:

- не оказывает негативного воздействия на окружающую среду;
- не создает помех в телевизионной и радиосвязи;
- не опасна для птиц;
- не влияет на скот и диких животных и т. д.

Получен первый опыт эксплуатации ВЭУ в ряде экстремальных климатических и организационных условий: при сильном и порывистом ветре 6...20 м/с, температуре от 0 и до –(+30) °С, сыром тумане и обледенении конструкций, внезапном отключении распределительных сетей от ВЭС.

Установлено, что требуются создание новой системы управления, радикальная переделка гидравлической системы, механизмов и электроприводов, доработка системы генерации и преобразования электроэнергии. Указанные изменения реализованы при подготовке к испытаниям ВЭУ ст. № 17, для которой были созданы:

- новая система автоматического управления;
- модернизированная гидравлическая система;
- система безопасности трех уровней (программная, электрическая, гидромеханическая);
- система мониторинга с записью параметров, характеризующих работу ВЭУ.

Как показал анализ испытаний ВЭУ ст. № 19 и № 17 мировому уровню соответствуют основные элементы в конструкции:

- тип применяемых генераторов и способ управления генерацией и стабилизацией параметров тока;
- режим и способ управления работой ветроколеса;
- конструктивная схема гондолы.

Вместе с тем, часть конструктивных решений устарела и не соответствует принятым в настоящее время:

- высота и тип башни (низкая и жесткая, а не высокая и гибкая);
- сложный и дорогой мультипликатор;
- металлическая конструкция лопастей, которая в мире для крупных ВЭУ не применяется.

Для завершения строительства и начала эксплуатации Калмыцкой ВЭС необходим был государственный подход к крупному и важному энергетическому проекту. Следовало принять решение по вопросу дальнейшего строительства ВЭС с учетом полученного опыта. При этом по результатам испытаний и опыта создания Калмыцкой ВЭС, Чукотской ВЭС-1, Заполярной ВЭС и Куликовской ВЭС было бы целесообразно:

- организовать диспетчерское управление, поскольку отключение ВЭС от распределительной сети и последующее внезапное подключение ведет к серьезной аварии;
- обучить операторов для управления ВЭС и ВЭУ;
- создать запроектированную систему дистанционного управления ВЭС;
- подготовить полностью эксплуатационную документацию для ВЭУ и ВЭС;
- разработать автоматическую систему согласования фаз электроэнергии работающих ВЭУ и сети при подключении распределительной сети (обеспечить синхронизацию).

Представленные проекты могли стать многообещающими для отечественной ветроэнергетики, так как

в случае реализации разработок и организации производства только ВЭУ разработки МКБ «Радуга» различной мощности от 1, 8, 16, 250, 315 до 1000 и 1300 кВт в стране обеспечивалось бы современное производство любой ветроэнергетической техники.

Однако богатый опыт отечественной ветроэнергетики сегодня практически проигнорирован, накопленные знания и научно-технический задел для создания современных российских ветроэлектрических установок различной мощности, включая ВЭУ мегаваттного класса, а также строительства и эксплуатации не используется.

В соответствии с работами по ветропортенциалу и данными «Атласа ветрового потенциала России» энергетические ветровые зоны расположены, в основном, на побережье и островах Северного Ледовитого океана, от Кольского полуострова до Камчатки, в районах Нижней и Средней Волги и Каспийского моря, на побережье Охотского, Баренцева, Балтийского, Черного и Азовского морей и составляют почти 5 млн км². Отдельные ветровые зоны расположены в Карелии, на Алтае, в Туве, на Байкале и в других районах.

Ветровой экономический потенциал оценивается в более 260 млрд кВт·ч/год. При этом длительность действия энергетического потока ветра составляет от 2000 до 5000 ч в год в зависимости от местоположения, диаметра ветроколеса и высоты его оси над землей. Максимальная средняя скорость ветра в указанных районах приходится на осенне-зимний период — период наибольшей потребности в электроэнергии и тепле.

Около 30% экономического потенциала ветроэнергетики сосредоточено на Дальнем Востоке, примерно 16% — в Западной и Восточной Сибири, 14% — в Северном экономическом районе и менее 25% в остальных районах (рис. 10).

Ветроэнергетические ресурсы большинства районов Севера в сотни раз превышают потребность населения в тепловой и электрической энергии. [14]

В то же время около 70% территории нашей страны с постоянно проживающим населением (более 10 млн человек) не получает энергию по системе централизованного энергоснабжения (рис. 11). Для энергоснабжения таких районов существует парк малых электростанций, насчитывающий около 49,5 тыс. единиц суммарной мощностью 17 млн кВт и выработкой энергии около 50 млрд кВт в год. Только по РАО «ЕЭС России» установленная мощность этих электростанций составила более 50 тыс. кВт. Расход топлива малыми электростанциями составляет более 6 млн т у. т. с затратами госбюджета более 600 млрд руб. В зоне децентрализованного энергоснабжения находятся АО «Камчатскэнерго», АО «Колымаэнерго», АО «Магаданэнерго», АО «Сахалинэнерго», ДАО «Чукотэнерго», АК «Якутскэнерго», АО «Таймырэнерго» и др.

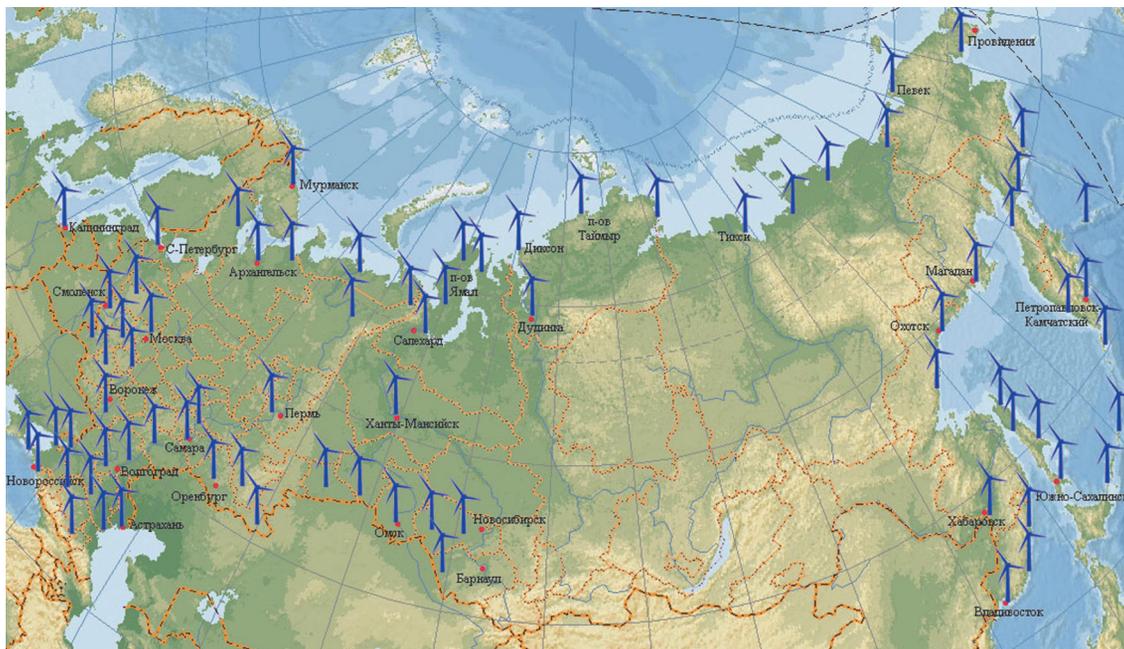


Рис. 10. Возможные регионы размещения ВЭУ и ВЭС

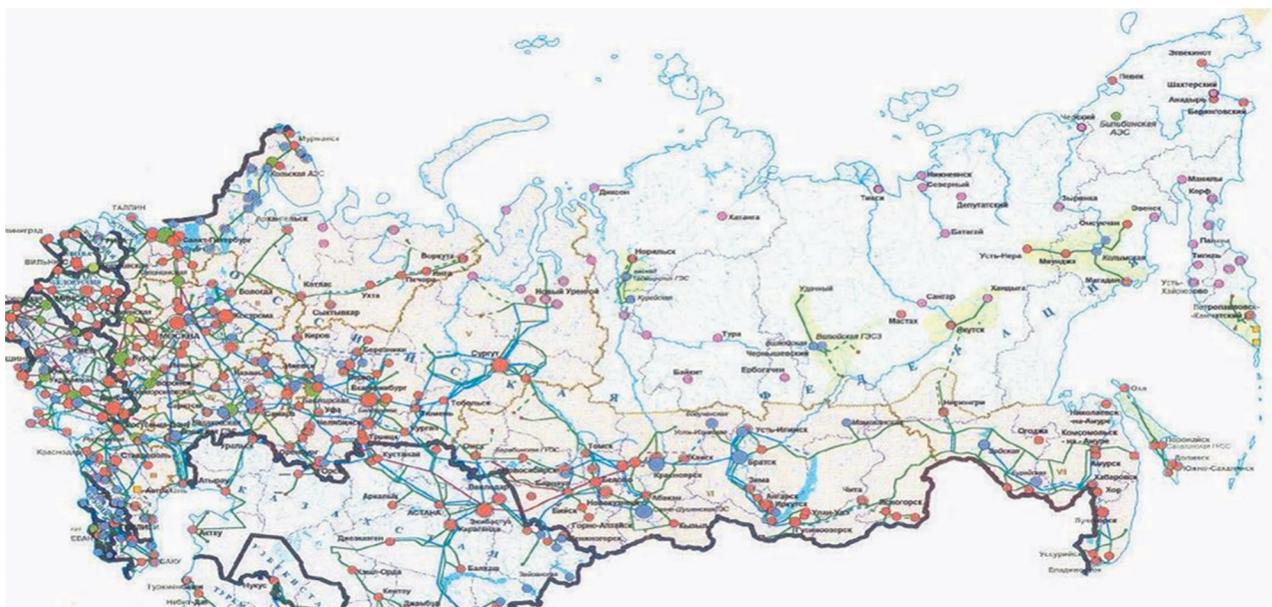


Рис. 11. Схема системы энергоснабжения (основные электростанции) России

Особенностями энергообеспечения удаленных районов нашей страны являются:

- децентрализованное энергоснабжение потребителей;
- разобщенность населенных пунктов и значительные расстояния между ними, а также отсутствие развитой сети коммуникаций;
- суровые климатические условия;
- высокая стоимость строительства энергоисточников;
- в силу экстремальных условий проживания необходимость надежного и постоянного по времени производства электрической и тепловой энергии;

- ограничение по мощности локальной электростанции, определяемой уровнем энергопотребления конкретным населенным пунктом;

- непродолжительное по времени проживание в местах освоения и добычи полезных ископаемых.

Следовательно, специфика и условия работы электростанций на возобновляемых источниках энергии в нашей стране значительно отличаются от условий работы за рубежом. Поэтому одно из основных направлений развития ветроэнергетики в России — совершенствование ВЭУ малой и средней мощности в условиях изолированности от крупных энергосистем. Для ком-

пенсации одного из основных недостатков — переменного во времени производства энергии, предлагается совместная работа с другими энергоисточниками, гибридными системами энергоснабжения: солнечными установками, МГЭС, ДВС-электростанциями. Таким образом, работа автономных систем энергоснабжения в условиях потребления энергии небольшой мощности не позволяет использовать те преимущества, которыми обладает крупная ветроэнергетика за рубежом.

Для решения проблем повышения надежности и эффективности энергообеспечения удаленных потребителей в российских условиях необходимо создать такую автономную систему энергоснабжения, которая удовлетворяла бы следующим основным техническим требованиям:

- обладала высокой надежностью;
- обязательно входила в состав автономной системы энергоснабжения силовой энергоустановки (работа не зависит от возмущающих воздействий природной среды);
- имела многофункциональность и гибридность (многотопливность);
- утилизировала сбросное тепло;
- обладала топливной экономичностью, высоким уровнем автоматизации и диспетчеризации, стабилизацией частоты тока независимо от частоты вращения дизеля, демпфированием колебаний нагрузки со стороны потребителя на ДВС;
- была транспортабельна, типична и конструктивно унифицирована.

Наиболее оптимальным решением для реализации указанных требований является переход к созданию и широкому внедрению отечественных многофункциональных гибридных энерготехнологических комплексов на базе существующих и новых конструкций и оборудования.

Современное состояние ветроэнергетики России

До недавнего времени по целому ряду причин, в частности, из-за больших запасов традиционного энергетического сырья, вопросам развития использования возобновляемых источников энергии в энергетической политике России уделялось сравнительно мало внимания. В последние годы ситуация стала заметно меняться. Необходимость борьбы за экологию, возможность повышения качества жизни людей, участие в развитии мировых прогрессивных технологий, стремление повысить энергоэффективность экономического развития, логика международного сотрудничества — способствовали активизации национальных усилий по созданию зеленой энергетики, движению к низкоуглеродной экономике.

Объем технически доступных ресурсов возобновляемых источников энергии в Российской Федерации составляет не менее 24 млрд т у. т. Доля электроэнергии, вырабатываемой в России с использованием во-

зобновляемых источников, составляет около 1% без учета ГЭС мощностью свыше 25 МВт и не меняется много лет, а с учетом последних — около 18%. Удельный вес производства тепловой энергии, полученной на базе ВИЭ, — около 3%, или 2000 млн Гкал.

В последние годы интерес к НВИЭ (новым технологиям ВИЭ) возрос, и стала создаваться нормативно-правовая база развития ВИЭ. За принятыми в конце 2007 г. поправками к Федеральному закону «Об электроэнергетике», заложившими рамочные основы развития ВИЭ, последовал ряд конкретизирующих документов, Постановлений Правительства Российской Федерации, утвердивших правила квалификации генерирующего объекта, функционирующего на основе использования ВИЭ [17—21].

Следует отметить состояние возобновляемой энергетики Республики Крым, где НВИЭ составляет значительную долю энергомощности региона. Там введены в эксплуатацию несколько солнечных электростанций общей мощностью более 400 МВт и одна из крупнейших в мире — «Перово» мощностью 105 МВт (Симферопольский район), а также 8 ветровых электрических станций общей установленной мощностью 93,2 МВт [20].

Значительную долю НВИЭ в энергобалансе следует обеспечить за счет ветровой энергетики. В настоящее время в стране действуют ВЭС мощностью более 300 МВт, ввод которых начался в 2015 г. В 2019 г. введена в эксплуатацию современная крупная Ульяновская ВЭС мощностью 50 МВт на базе современных ВЭУ единичной мощностью 2,5 МВт фирмы «Фортрум». Российским рынком активно занимаются General Electric (США), Lagerwey (Голландия), Vestas (Дания), Siemens (ФРГ), фирмы КНР. Голландская Lagerwey — партнер «Росатома» активно участвует на нашем рынке. «Фортрум», «Роснано» и правительство Ульяновской области подписали трехстороннее соглашение о строительстве ВЭС. Согласно документу, «Роснано» берет на себя инвестиции в этот бизнес и производство компонентов для ВЭУ, а «Фортрум» — роль оператора и инвестора в строительстве ВЭС в Ульяновской области. Решаются вопросы локализации производства крупных ВЭУ в Ульяновской области, Республике Адыгея (рис. 12), Краснодарском, Ставропольском краях, Нижнем Новгороде, где осваиваются новые высокие технологии, формирующиеся с учетом жестких требований к материалам, компонентам, строительного-монтажным и эксплуатационным компаниям, транспортной инфраструктуре.

Российское законодательство не требует высокой степени локализации, исключая выведение прибыли от ветрогенерации из страны. ВЭУ добавляют энергетикам проблемы, связанные с необходимостью развития электрических сетей, усложнением диспетчерского управления оперативными режимами, обеспечением



Рис. 12. ВЭС в Адыгее (Росатом)

надежности и безопасности энергоснабжения потребителей. Это рассматривается как технологический вызов, который успешно решается. Планируемые мощности ВЭС в 2018 — 2024 годы предполагают их строительство в Ростовской, Ульяновской, Саратовской, Мурманской областях, Краснодарском и Ставропольском краях и ряде других регионов общей мощностью 3047 МВт. Инвесторы и специалисты отрасли полагают, что такие малые объемы не позволят обеспечить необходимое развитие ветроэнергетики и вообще НВИЭ. Это тормозит НИОКР и не позволяет совершенствовать производство оборудования.

Возможную поддержку продвижения НВИЭ в России окажет реализация изменений в федеральном законе «Об электроэнергетике», направленных на стимулирование развития «зеленой» микрогенерации, утвержденных 27.12.2019 г. Законом вводится определение микрогенерации. Это объект по производству электроэнергии мощностью до 15 кВт, используемый потребителями для собственного энергоснабжения. Процедура присоединения микрогенерации к электросетям и особенности определения платы за подключение определяются правительством. Собственники микрогенерации смогут продавать излишки электроэнергии на розничном рынке электроэнергии, и это не будет считаться предпринимательством. Гарантирующие поставщики (основные энергосбытовые компании регионов РФ) будут обязаны заключать с обратившимися к ним владельцами микрогенерации договоры купли-продажи электроэнергии и будут покупать ее от микрогенерации по ценам, не выше тех, по которым покупают электроэнергию и мощность на оптовом энергорынке.

Отметим, что строительство ВЭС в центре и на юге страны ведется на базе зарубежной техники, а там, где ветроэнергетика больше всего нужна (в отдаленных и изолированных регионах Дальнего Востока, Сибири, полярных районах), речь пока идет об отдельных зарубежных опытных установках (Камчатка, Якутия).

Мировая ветроэнергетика

Использование НВИЭ в мире быстро становится обыденной практикой. Благодаря снижающейся сто-

имости солнечных панелей и ветровых турбин, цены за единицу мощности НВИЭ уже стали ниже, чем в угольной и атомной энергетике. Отработаны модели перехода от жидкого топлива и газа к возобновляемым источникам энергии. Компании по всему миру переходят на НВИЭ. Более половины введенных в строй новых энергетических мощностей приходится на возобновляемые источники энергии. В Германии, Испании, Чили наблюдались дни, когда было выработано так много электрической энергии с помощью солнца и ветра, что потребители получали ее безвозмездно. В 2015 г. всемирная ветроэнергетическая ассоциация (ВВЭА) на очередной конференции, рассмотрев все аспекты использования возобновляемой энергетики, соответствующей политики развития, производства, эксплуатации оборудования и электростанций, а также экономические и социальные проблемы развития НВИЭ, поддержала научно обоснованные программы, выступила с предложениями о полном энергоснабжении за счет возобновляемых источников энергии и призвала все заинтересованные страны и структуры присоединиться к этой кампании. Технический Комитет ВВЭА в очередном докладе «Энергия ветра 2050» в 2015 г. изложил стратегию развития НВИЭ, предусматривающую к 2050 г. почти абсолютное энергоснабжение за счет возобновляемых источников энергии.

Во многих странах с энергией ветра все чаще связывают основной способ выработки электроэнергии. Отмечается, что нет базовых технических барьеров для энергии ветра, чтобы обеспечить большую часть будущего глобального энергоснабжения, по крайней мере до 40% за счет ветровой энергии в балансе уже к 2050 г. Рядом стран освоено промышленное производство ветроэнергетических установок единичной мощностью 5...8 МВт и решены все вопросы их монтажа, эксплуатации и работы в энергосистемах различной мощности. В США ведутся проработки создания для офшорных ВЭС установок мощностью 50 МВт. Конференции ВВЭА в 2016 — 2019 гг. поддержали и детализировали эти проекты [13]. Глобальные инвестиции в новые мощности возобновляемой энергии в течение 2010 — 2019 гг. составили 2,6 трлн. долл. США, сообщается в совместном докладе Программы ООН

по окружающей среде (ЮНЕП) и Центра взаимодействия Франкфуртской школы и ЮНЕП по климату и финансированию устойчивой энергетики «Глобальные тенденции инвестиций в возобновляемую энергетику 2019 года».

Солнечная энергетика — несомненный лидер по показателям роста, в эту область привлечена половина всех мировых инвестиций — 1,3 трлн долларов. Количество установленных мощностей возобновляемой энергетики без учета больших гидроэлектростанций выросло с 414 ГВт в конце 2009 г. до чуть более 1650 ГВт к концу 2019 г. Солнечные энергетические мощности соответственно увеличились с 25 до 663 ГВт. О показателях развития мировой ветроэнергетики можно судить по данным, приведенным на рис. 10. Мощность ВЭУ выросла в 5,7 раза за 10 лет и к концу 2018 г. превысила 600 ГВт, а к концу 2019 г. — 650 ГВт. Себестоимость производимой электроэнергии снизилась более, чем в 6 раз [22] (рис. 13).

Общемировая доля выработки электроэнергии из возобновляемых источников в мире достигла 12,9% в 2018 г. по сравнению с 11,6% в 2017 г. Учитывая все основные технологии, генерирующие электричество (ископаемые и безуглеродные), в этом десятилетии в мире было построено 2366 ГВт мощностей. При этом на долю солнечной энергии пришлось 663 ГВт, доля угля — 529 ГВт, а энергия ветра и газ составили более 650 и 438 ГВт, соответственно.

Конкурентоспособность возобновляемых источников энергии в последнее время резко выросла. Выровненная стоимость электроэнергии (показатель, позволяющий сравнивать различные методы производства электроэнергии) в 2019 г. снизилась на 81% для солнечной фотоэлектрической генерации с 2009 г. и на 46% для наземной ветряной генерации. В 2018 г. глобальные инвестиции в возобновляемые источники энергии достигли 272,9 млрд долл., и это был девятый год подряд, когда они превышали 200 млрд долл., и пятый год инвестиций в размере более 250 млрд.

За прошедшее десятилетие КНР была крупнейшим инвестором в производство энергии из возобновляе-

Мощность, ГВт

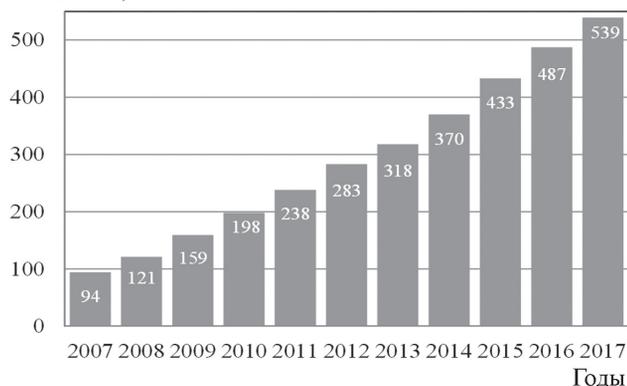


Рис. 13. Вводы мощности ВЭУ за 2007 — 2017 гг.

мых источников, выделив 758 млрд долл. в период с 2010 г. по первое полугодие 2019 г. США разместились на втором месте с инвестициями в размере 356 млрд долл., а Япония — на третьем месте с 202 млрд долл. За тот же период европейские страны в целом вложили в зеленую энергетику 698 млрд долл., причем на долю Германии пришлось 179 млрд долл., а Великобритании — 122 млрд долл. Рекордные 167 ГВт новых мощностей введены в 2018 г. по сравнению с 160 ГВт в 2017 г. Этот показатель был достигнут, несмотря на продолжающееся снижение капитальных затрат на солнечную и ветровую энергию, а также на изменение политики, которое затронуло инвестиции в Китае во второй половине 2018 г.. В 2018 г. Китай остался лидером по инвестициям, хотя его вложения и снизились на 38% (до 88,5 млрд долл.). Однако, вклады в рынок возобновляемых мощностей были распределены по всему миру ровнее, чем когда-либо до этого. В 2018 г. 29 стран потратили более 1 млрд долл. на этот сегмент экономики (25 — 2017 г., 21 — 2016 г.) [22].

Мировая энергетика уже сделала выбор в пользу НВИЭ — программы развития и системы поддержки новой отрасли действуют в почти 200 странах. Целевые ориентиры определены на уровне 2030 — 2050 гг. — от 25 до 80% от производства электроэнергии на базе ВИЭ. IRENA и WWEA представили проработки по перспективе развития НВИЭ в мире до 2050 г., достигаемые при ограничении выбросов и реализации Парижских соглашений по климату (табл. 5). При этом предпо-

Таблица 5

Мощность НВИЭ на уровне 2050 г.

Страны	Мощность, ГВт
КНР	4993
США	2506
Индия	1795
Европейский союз	1154
Индонезия	382
Япония	297
Бразилия	233
Саудовская Аравия	214
ЮАР	117
Мексика	185
Южная Корея	146
Россия	281
Австралия	176
Канада	122
Турция	105
Аргентина	62
Остальные страны	1564
В мире	14333

лагается, что через 30 лет мощности НВИЭ более чем в 2 раза смогут превысить мощности всех существующих сегодня электростанций [23]. Особую роль в развитии энергетики будущего сыграют распределенная возобновляемая энергетика и внедрение цифровых технологий [24 — 27].

Интересно, что определенную международными организациями мощность НВИЭ РФ на уровне 2050 г. в 281 ГВт (см. табл. 5) можно рассматривать как достигаемую за 30 лет при ежегодном вводе не менее 9...10 ГВт. Таким образом, даже самые оптимистичные прогнозы российских и зарубежных инвесторов в России на порядок ниже оценок зарубежных специалистов. Вместе с тем Минэнерго уже предложило в 2025 — 2035 годах построить за 400 млрд руб. только 5 ГВт «зеленой» генерации, а это в два раза меньше даже ожиданий инвесторов. Из выделяемых 400 млрд руб. на поддержку строительства ВЭС запла-

нировано направить 240,5 млрд руб., на строительство СЭС — 129,5 млрд руб., малых ГЭС — 30 млрд руб. По прогнозам Минэнерго в пересчете до 2050 г., учитывая возврат инвестиций за 15 лет, совокупная нагрузка на оптовый энергетический рынок за счет НВИЭ составит 690...800 млрд руб. в зависимости от инфляции. В министерстве посчитали, что суммарного инвестиционного ресурса будет достаточно на строительство лишь 5 ГВт «зеленой» мощности — 3,465 ГВт ВЭС (ежегодная квота на отборе — 315 МВт) и 1,498 ГВт СЭС (с ежегодными вводами 245 МВт в 2025 — 2026 гг. и 112 МВт в 2027 — 2035 гг.), о ТБО и других НВИЭ не упоминается. В ведомстве считают, что к 2036 г. НВИЭ-генерация в РФ сможет существовать без субсидий со стороны оптового рынка. Инвесторы и специалисты полагают, что такие малые объемы не позволят России обеспечить необходимое развитие НВИЭ.

Литература

1. **Жуковский Н.Е.** Ветряная мельница НЕЖ // Полное собрание сочинений. Т. VI. М.-Л.: Глав. ред. авиацион. лит.-ры, 1931.
2. **Ветчинкин В.П.** Принципы ветроиспользования, разработанные А.Г. Уфимцевым // Труды I Всесоюз. конф. по аэродинамике. М.: ЦАГИ, 1932.
3. **Уфимцев А.Г.** Проблема анемофикации // Труды Курской губернской плановой комиссии. Курск: Курская ученая архивная комиссия, 1927.
4. **Красовский Н.В.** Ветровые энергоресурсы СССР и перспективы их использования // Генеральный план электрификации СССР. М.-Л.: Гос. соц.-эконом. изд-во, 1932. Т. 1. С. 440—464.
5. **Сабинин Г.Х.** Теория и аэродинамический расчет ветряных двигателей. М.: ОГИЗ, 1931.
6. **Андрианов В.Н., Быстрицкая Д.Н., Вашкевич К.П., Секторов В.Р.** Ветроэлектрические станции. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960.
7. **Фатеев Е.М.** Ветро двигатели и ветроустановки. М.: ОГИЗ-Сельхозгиз, 1948.
8. **Милевский В.Ю.** Методика исследования скоростных роз и диаграмм ветра // Труды ГГО. 1960. Вып. 113. С. 57—70.
9. **Шефтер Я.И.** Ветроэнергетические агрегаты. М.: Машиностроение, 1972.
10. **Разработка перспектив ветродвигателестроения и проекта плана освоения ветроэнергетических ресурсов на 1961 — 1980 гг.** // Проект технико-экономического Совета Госкомитета по автоматизации и машиностроению Совмина СССР. М., 1961.
11. **Материалы** Первого Всесоюзного совещания по развитию нетрадиционных возобновляемых источников энергии // Энергетическое строительство. 1991. № 3. С. 6—65.
12. **Дьяков А.Ф.** Проблемы развития нетрадиционной энергетики на современном этапе // Энергетическое строительство. 1986. № 5. С. 35—39.

References

1. **Zhukovskiy N.E.** Vetryanaya Mel'nitsa NEZH. Polnoe Sobranie Sochineniy. T. VI. M.-L.: Glav. Red. Aviatsion. Lit-ry, 1931. (in Russian).
2. **Vetchinkin V.P.** Printsipy Vetroispol'zovaniya, Razrabotannye A.G. Ufimtsevym. Trudy I Vsesoyuz. Konf. po Aerodinamike. M.: TSAGI, 1932. (in Russian).
3. **Ufimtsev A.G.** Problema Anemofikatsii. Trudy Kurskoy Gubernskoy Planovoy Komissii. Kursk: Kurskaya Uchenaya Arkhivnaya Komissiya, 1927. (in Russian).
4. **Krasovskiy N.V.** Vetrovye Energoresursy SSSR i Perspektivy Ikh Ispol'zovaniya. General'nyy Plan Elektrifikatsii SSSR. M.-L.: Gos. Sots.-ekonom. Izd-vo, 1932; 1;440—464. (in Russian).
5. **Sabinin G.X.** Teoriya i Aerodinamicheskiy Raschet Vetryanykh Dvigatoley. M.: OGIz, 1931. (in Russian).
6. **Andrianov V.N., Bystritskaya D.N., Vashkevich K.P., Sektorov V.R.** Vetroelektricheskie Stantsii. M.-L.: Gosenergoizdat, 1960. (in Russian).
7. **Fateev E.M.** Vetrodvigateli i Vetroustanovki. M.: OGIz-Sel'khozgiz, 1948. (in Russian).
8. **Milevskiy V.Yu.** Metodika Issledovaniya Skorostnykh Roz i Diagramm Vetra. Trudy GGO. 1960;113: 57—70. (in Russian).
9. **Shefter Ya.I.** Vetroenergeticheskie Agregaty. M.: Mashinostroenie, 1972. (in Russian).
10. **Razrabotka** Perspektiv Vetrodvigatelestroeniya i Proekta Plana Osvoeniya Vetroenergeticheskikh Resursov na 1961 — 1980 gg. Proekt Tekhniko-ekonomicheskogo Soveta Goskomiteta po Avtomatizatsii i Mashinostroeniyu Sovmina SSSR. M., 1961. (in Russian).
11. **Materialy** Pervogo Vsesoyuznogo Soveshchaniya po Razvitiyu Netraditsionnykh Vozobnovlyаемых Iсточников Energii. Energeticheskoe Stroitel'stvo. 1991;3:6—65. (in Russian).
12. **D'yakov A.F.** Problemy Razvitiya Netraditsionnoy Energetiki na Sovremennom Etape. Energeticheskoe Stroitel'stvo. 1986;5:35—39. (in Russian).

13. **Перминов Э.М.** Перспективы развития нетрадиционной энергетики // Энергетик. 1992. № 9. С. 7—9.

14. **Николаев В.Г. и др.** Перспективы развития возобновляемых источников энергии в России: результаты проекта ТАСИС. М.: Атмограф, 2010.

15. **Николаев В.Г., Ганага С.В., Перминов Э.М.** Состояние и перспективы развития мировой и отечественной ветроэнергетики. М.: Энергопрогресс, 2012.

16. **Proposal** for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources Brussels: Commission of the European Communities, 2008.

17. **Энергетическая** стратегия России до 2030 года. М.: Минэнерго РФ, 2009.

18. **Вашкевич К.П., Маслов Л.А., Николаев В.Г.** Опыт и перспективы развития ветроэнергетики в России // Малая энергетика. 2005. № 1—2. С. 56—66.

19. **Гринкевич Е.Б., Перминов Э.М.** Основные принципы государственной политики по возобновляемой энергетике // Энергетик. 2014. № 2. С. 10—12.

20. **Прогноз** развития энергетики мира и России. М.: Институт энергетических исследований Российской академии наук, Московская школа управления, 2019.

21. **Перминов Э.М.** Энергетика Республики Крым — состояние и проблемы развития. Новая возобновляемая энергетика — выбор Крыма // Энергетик. 2014. № 5. С. 7—10.

22. **Renewable Energy Policy Network or the 21st Century.** Global Status Rep. 2018. [Электрон ресурс] www.ren21.net/reports/global-status-report (дата обращения 15.06.2020).

23. **REENCON — XXI:** Возобновляемая энергетика XXI века: энергетическая и экономическая эффективность: Материалы Междунар. конгресса. М.: Сколково, 2018.

24. **Pure Power.** Wind Energy Scenarios up to 2030. Final Rep. [Электрон. ресурс] www.docplayer.net/1782818-Pure-power-wind-energy-scenarios-up-to-2030-by-the-european-wind-energy-association.html (дата обращения 15.06.2020).

25. **Материалы** Российского международного энергетического форума. СПб., 2019.

26. **Лю Чженья.** Глобальное энергетическое объединение. М.: Издат. дом МЭИ, 2016.

27. **Перминов Э.М., Тягунов М.Г.** К вопросу о структуре и управлении энергетики будущего // Энергетик. 2020. № 1. С. 33—43.

13. **Perminov E.M.** Perspektivy Razvitiya Netraditsionnoy Energetiki. Energetik. 1992;9:7—9. (in Russian).

14. **Nikolaev V.G. i dr.** Perspektivy Razvitiya Vozobnovlyaemykh Istochnikov Energii v Rossii: Rezultaty Projekta TESIS. M.: Atmograf, 2010. (in Russian).

15. **Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Perminov E.M.** Sostoyanie i Perspektivy Razvitiya Mirovoy i Otechestvennoy Vetroenergetiki. M.: Energoprogress, 2012. (in Russian).

16. **Proposal** for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources Brussels: Commission of the European Communities, 2008.

17. **Energeticheskaya** Strategiya Rossii do 2030 Goda. M.: Minenergo RF, 2009. (in Russian).

18. **Vashkevich K.P., Maslov L.A., Nikolaev V.G.** Opyt i Perspektivy Razvitiya Vetroenergetiki v Rossii. Malaya Energetika. 2005;1—2:56—66. (in Russian).

19. **Grinkevich E.B., Perminov E.M.** Osnovnye Printsipy Gosudarstvennoy Politiki po Vozobnovlyаемой Energetike. Energetik. 2014;2:10—12. (in Russian).

20. **Prognoz** Razvitiya Energetiki Mira i Rossii. M.: Institut Energeticheskikh Issledovaniy Rossiyskoy Akademii Nauk, Moskovskaya Shkola Upravleniya, 2019. (in Russian).

21. **Perminov E.M.** Energetika Respubliki Krym — Sostoyanie i Problemy Razvitiya. Novaya Vozobnovlyaemaya Energetika — Vybor Kryma. Energetik. 2014; 5:7—10. (in Russian).

22. **Renewable Energy Policy Network or the 21st Century.** Global Status Rep. 2018. [Elektron Resurs] www.ren21.net/reports/global-status-report (Data Obrashcheniya 15.06.2020).

23. **REENCON — XXI:** Vozobnovlyaemaya Energetika XXI Veka: Energeticheskaya i Ekonomicheskaya Effektivnost': Materialy Mezhdunar. Kongressa. M.: Skolkovo, 2018. (in Russian).

24. **Pure Power.** Wind Energy Scenarios up to 2030. Final Rep. [Elektron. Resurs] www.docplayer.net/1782818-Pure-power-wind-energy-scenarios-up-to-2030-by-the-european-wind-energy-association.html (Data Obrashcheniya 15.06.2020).

25. **Materialy** Rossiyskogo Mezhdunarodnogo Energeticheskogo Forumu. SPb., 2019. (in Russian).

26. **Lyu Chzhen'ya.** Global'noe Energeticheskoe Ob'edinenie. M.: Izdat. Dom MEI, 2016. (in Russian).

27. **Perminov E.M., Tyagunov M.G.** K Voprosu o Strukture i Upravlenii Energetiki Budushchego. Energetik. 2020;1:33—43. (in Russian).

Сведения об авторе:

Перминов Эдуард Максимович — кандидат технических наук, председатель секции нетрадиционной и возобновляемой энергетики НП «НТС ЕЭС», почетный профессор института гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: emp38@mail.ru

Information about author:

Perminov Eduard M. — Ph.D. (Techn.), Chairman of the Section of Non-traditional and Renewable Energy of NP «NTS EES», Honorary Professor of the Institute of Hydropower and Renewable Energy Sources NRU MPEI, e-mail: emp38@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 09.07.2020

The article received to the editor: 09.07.2020