

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

DOI 10.35264/1996-2274-2019-2-94-105

МИРОВАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА МЕГАВАТТНОГО ДИАПАЗОНА МОЩНОСТЕЙ

В.Н. Антипов, вед. науч. сотр. Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), Санкт-Петербург, д-р техн. наук, bht@mail.ru

А.Д. Грозов, науч. сотр. Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), bht@mail.ru

А.В. Иванова, ст. науч. сотр. Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), канд. физ.-мат. наук, iann57@mail.ru

Рецензент: В.Н. Забоин

Несмотря на политические и экономические проблемы, ветроэнергетика продолжает свое неуклонное развитие, основные направления которого представлены в статье. Создаются новые производства и материалы, что способствует повышению эффективности за счет укрупнения единичной мощности ветроэнергетических установок и снижения удельной стоимости производства энергии. Перспективным крупномасштабным направлением современной ветроэнергетики являются функционирующие на морском шельфе оффшорные ветроэлектростанции, для которых освоен выпуск ветрогенераторов мощностью 6–8 МВт. Многие производители для оффшорных ветроэлектростанций отдают предпочтение безредукторному синхронному генератору с возбуждением от постоянных магнитов, при этом сумели достичь отношения вращающего момента к массе ветротурбины, равного 25 кг/(кН·м), и заняты поиском различных путей снижения стоимости ветроэлектростанций. Представлены наиболее значимые достижения в промышленном производстве ветроэнергетических установок и строительстве ветроэлектростанций, а также перспективные проекты, предусматривающие нестандартные решения, в том числе на основе сверхпроводимости.

Ключевые слова: ветроэнергетика, оффшорные ветростанции, ветрогенераторы большой мощности, тренды развития.

GLOBAL WIND ENERGY WITHIN THE MEGAWATT RANGE

V.N. Antipov, Leading Researcher, Institute of Chemistry of Silicates named after I.V. Grebenshchikov, RAS (ICS RAS), St. Petersburg, Ph.D., bht@mail.ru

A.D. Grozov, Researcher, Institute of Chemistry of Silicates named after I.V. Grebenshchikov, RAS (ICS RAS), bht@mail.ru

A.V. Ivanova, Senior Researcher, Institute of Chemistry of Silicates named after I.V. Grebenshchikov, RAS (ICS RAS), Doctor of Physics and Mathematics, iann57@mail.ru

Despite of the political and economic problems wind power continues its steady development, the main directions of which are presented in the paper. New production facilities and materials are being created, which contributes to increased efficiency by enlarging the unit capacity of wind power plants (wind turbines) and reducing the unit cost of energy production. A promising large-scale direction of modern wind power is offshore wind power plants operating on the offshore shelf, for which the production of 6–8 MW wind generators is developed. Many offshore wind turbines manufacturers prefer a direct-drive permanent magnets synchronous generator, while they managed

to achieve 25 kg/kN-m for the torque to the mass ratio and are searching how to reduce wind plants cost by various ways. The most significant achievements in the industrial wind turbines production and wind plants construction, as well as promising projects providing non-standard solutions, including those based on superconductivity, are presented.

Keywords: wind power, offshore wind plants, high power wind generators, development trends.

Введение

Несмотря на политические и экономические проблемы, ветроэнергетика продолжает свое неуклонное развитие. В 2017 г. в мире введено в строй 52,57 ГВт новых мощностей, и общая установленная мощность ветроэлектростанций (ВЭС) в мире достигла значения 539,58 ГВт. В тройку лидеров по общей мощности ветроэнергетики в мире по-прежнему входят Китай (188,2 ГВт, 35 %), США (89 ГВт, 17 %) и Германия (56,1 ГВт, 10 %) [1]. В Европе добавилось 16,8 ГВт, при этом Германия и Великобритания прибавили по 6,6 и 4,3 ГВт соответственно.

Установленная мощность оффшорной ветроэнергетики Европы в 2018 г. достигла 18,5 ГВт (105 морских ВЭС в 11 странах), было введено в эксплуатацию 409 ветряных турбин на 15 оффшорных ВЭС суммарной мощностью 2,65 ГВт. В Великобритании установлены самые мощные в мире оффшорные турбины (8,8 МВт от МНІ Vestas) на одной из крупнейших в мире морских ветростанций Walney 3 Extension мощностью 657 МВт [2].

Тем не менее сейчас наблюдается снижение темпов прироста мировой энергетики. После максимальных 62,6 ГВт общей мощности установок, введенных в 2015 г., в 2016 г. было введено 54,6 ГВт, а в 2017 г. – 52,6 ГВт [1]. Вероятно, темпы роста могут возрасти за счет модернизации существующих ветровых установок, сотни которых достигли срока эксплуатации 20 лет, а их модернизация по вложениям сопоставима с новым строительством. По прогнозам [3], в общем производстве электроэнергии доля ветроэнергетики в 2020 г. достигнет 6–7 %.

Методика исследования

Ветроэнергетика является инновационной технологией, которая привлекает интеллектуальные, финансовые и трудовые ресурсы в сферу своего развития. Создаются новые производства и материалы, что способствует повышению эффективности за счет укрупнения единичной мощности ветроэнергетических установок (ВЭУ) и снижения удельной стоимости производства энергии. Диаграммы (рис. 1) иллюстрируют динамику роста мощностей P и габаритов (диаметр ротора D и высота башни H) единичных ВЭУ за последние 20 лет.

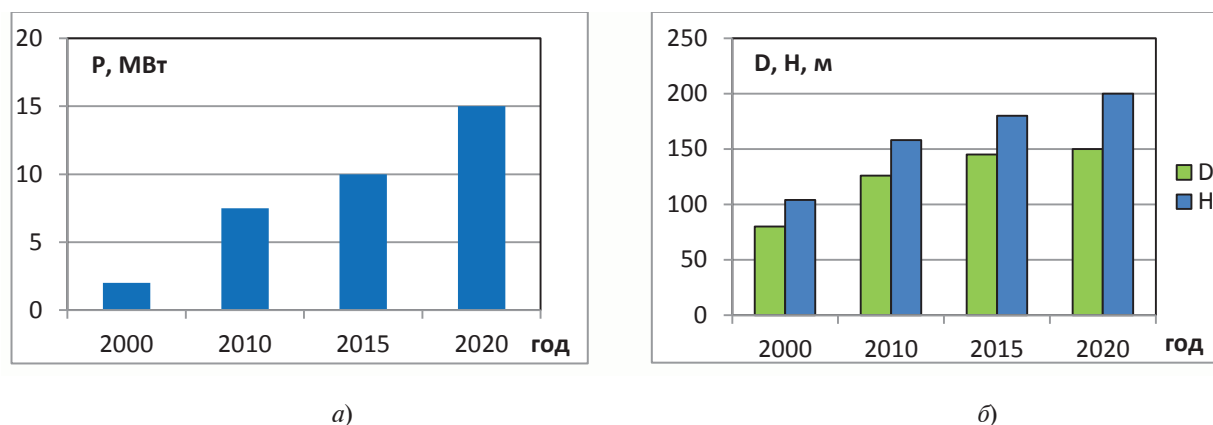


Рис. 1. Рост мощностей P , МВт (а), и габаритов D , H , м (б), единичных ВЭУ за последние 20 лет

Методика исследования базируется на системном анализе реального состояния и тенденций развития мировой энергетики мегаваттного диапазона мощностей. Для анализа привлечены данные ведущих производителей ВЭУ, отчеты Всемирной ассоциации ветроэнергетики (WWEA) и Российской ассоциации ветроиндустрии, научные публикации в зарубежных и отечественных журналах. Это позволило представить в статье наиболее значимые достижения в промышленном производстве ВЭУ и строительстве ВЭС, а также перспективные проекты, предусматривающие нестандартные решения, в том числе на основе сверхпроводимости.

Результаты и обсуждение

Наземные и оффшорные ВЭУ. Уровень 2000 г. можно характеризовать двумя ветроустановками: Fuhrländer FL MD 70/77 (Германия) [4] и WWD-3D100 (Финляндия) [5] (рис. 2).

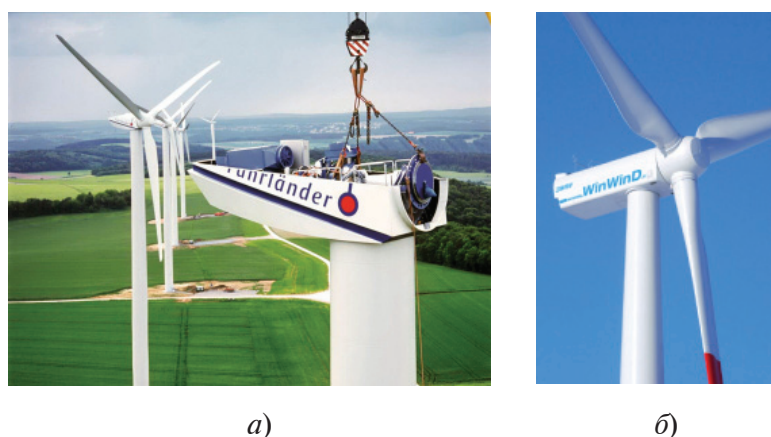


Рис. 2. Ветроэнергетические установки Fuhrländer FL MD 70/77 (а) и WWD-3D100 (б)

ВЭУ Fuhrländer FL MD 70/77 относится к классу двухмегаваттных систем, оснащена системой индивидуального регулирования лопастей, асинхронным генератором двойного питания с переменной частотой вращения. Мощность установки составляет 1,5 МВт, диаметр ротора – 70,0 или 77,0 м, высота опоры для диаметра ротора 70 м составляет 65,0; 85,0 или 114,5 м; высота опоры для диаметра ротора 77 м – соответственно 61,5; 85,0; 100,0; 111,5 м [4].

Ветроэнергетическая установка WWD-3D100 имеет планетарный редуктор и синхронный генератор с постоянными магнитами с переменной частотой вращения. Мощность – 3,0 МВт, диаметр ротора – 100,0 м, высота опоры – 80,0 или 88,0 м [5].

В настоящее время для крупных ВЭС практически перестают использовать асинхронные генераторы с короткозамкнутым или фазным ротором, а применяют только асинхронные генераторы двойного питания (DFIG), синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением (EESG) и синхронные генераторы с постоянными магнитами (PMSG). Для материковых ветрогенераторов ведущие производители установок – Siemens, General Electric Energy, Gamesa, Vestas, Mitsubishi – разработали прототип установки мощностью 4 МВт.

Использование суши для размещения ветрогенераторов приводит к изыманию из оборота земель, на которых необходимо проложить дороги, обеспечивающие сооружение и эксплуатацию ВЭУ. Освоение морской акватории требует по сравнению с материковой ветроэнергетикой более значительных вложений, для компенсации которых морская ветроэнергетика требует вдвое большей мощности ветрогенератора.

Перспективным крупномасштабным направлением современной ветроэнергетики являются оффшорные ВЭС, функционирующие на морском шельфе. По экономическим крите-

риям (дороговизна подводных энергокоммуникаций, фундаментов и монтажа ВЭУ) рентабельны ВЭС, установленные на расстоянии до 40 км от берега и на глубине шельфа не более 35 м. Единичная мощность базовых ВЭУ оффшорных ВЭС, как правило, не менее 2,0 МВт. Для морских станций большой глубины компаниями StatoilHydro (Equinor ASA, Норвегия) и концерном Siemens AG (Германия) разработаны плавучие ветрогенераторы. StatoilHydro построила демонстрационную версию мощностью 2,3 МВт. Siemens Renewable Energy разработала турбину Nuwind мощностью до 5,0 МВт с диаметром ротора до 120 м. Крупные производители повышают мощность широко используемых редукторных приводов мегаваттного диапазона: 6,0 МВт PMSG (Siemens) [6], 5,0 МВт PMSG (Gamesa) [7], 6,0 МВт DFIG (Sinovel) [8]. Китайская компания Sinovel начинала с поставок на внутренний рынок ветротурбин мощностью 1,5 МВт по лицензионному соглашению с фирмой Fuhrländer (Германия) и стала крупнейшей компанией Китая с собственными разработками. В последнее десятилетие значительная часть международных исследований сосредоточена на создании ветротурбины с безредукторным приводом генератора [9–12].

Для морской ветроэнергетики освоен выпуск ВЭУ мощностью 6,0–8,0 МВт. Фирма Siemens в ветровой турбине SWT-3.0-101 реализовала безредукторный привод синхронного генератора с постоянными магнитами. Конструкция ВЭУ без редуктора оказывается проще и надежнее. Модель SWT-3.0-101 выполнена с внешним ротором, что позволило сохранить компактные размеры гондолы и транспортировать ее целиком. Затем была создана ВЭУ SWT-6.0–154 мощностью 6,0 МВт с диаметром ротора 154,0 м, и ее мощность повышена до 7,0 МВт (SWT-7.0-154) путем оснащения синхронного генератора более мощными магнитами. Концерн Siemens придерживается концепции безредукторного привода генератора, считая, что замена главного вала, коробки передач и высокоскоростного генератора низкоскоростным приводит к уменьшению на 50 % количества вращающихся и изнашиваемых частей, что снижает требования к техническому обслуживанию и особенно важно для оффшорных ВЭС. Низкоскоростной генератор имеет конструкцию с большим диаметром и меньшей активной длиной по сравнению с высокоскоростным генератором и по-иному встраивается в гондолу (рис. 3) [13].

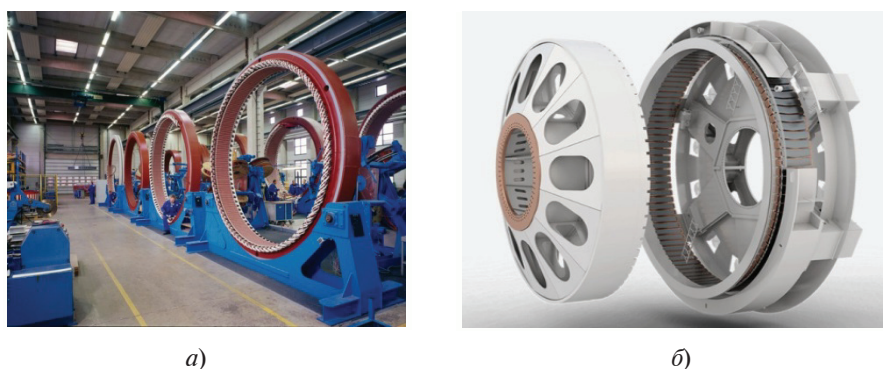


Рис. 3. Безредукторный генератор (а) и его компоновка в ВЭУ (б)

Крупнейшие действующие ВЭУ и ВЭС. В 2007 г. в Эмдене (Германия) была смонтирована первая ветротурбина Enercon E-126 (рис. 4, а). Исходная мощность ветрогенератора составляла 6,0 МВт [14]. После доработки конструкции турбины в 2009 г. его мощность увеличилась до 7,58 МВт, и E-126 стал самым мощным ветрогенератором в мире. Высота колонны-основания составляет 135 м, диаметр ротора – 127 м, общая высота конструкции достигает 198 м. Вес фундамента турбины – 2500 т, самого ветрогенератора – 2800 т, сам электрогене-

ротор весит 220 т, а ротор вместе с лопастями – 364 т. Вес всей конструкции составляет примерно 6000 т, рабочая скорость вращения ротора – от 5,0 до 11,7 мин⁻¹.



Рис. 4. Ветрогенераторы Enercon E-126 (а) и Vestas V-164 (б)

К 2012 г. уже было установлено несколько десятков таких ветрогенераторов по всей Европе. Турбины этого диапазона мощностей поставляются также совместно германской компанией Siemens и французской Alstom (6,0 МВт), а южнокорейская фирма Samsung до своего ухода из ветроэнергетики выпустила одну морскую ветроустановку мощностью 7,0 МВт, которая в 2015 г. была продана английскому научно-исследовательскому и опытно-конструкторскому предприятию ORE Catapult, установлена на наземной ВЭС Levenmouth в Шотландии и действует в рамках высокотехнологичного демонстрационно-исследовательского проекта [15].

Данию можно считать родоначальницей ветроэнергетики как отрасли. Именно там в 1890 г. была построена первая ветроэлектростанция, а к 1908 г. насчитывалось уже 72 станции мощностью от 5,0 до 25,0 кВт. Крупнейшие из них имели высоту башни 24 м и четырехлопастные роторы диаметром 23 м. В настоящее время датская фирма Vestas является крупнейшим в мире производителем ветрогенераторов, а Orsted (бывшая DONG Energy) – крупнейшим строителем ветропарков морского базирования.

Следующим шагом датской компании Vestas стал действующий образец турбины V-164 (рис. 4, б), установленный на суше в испытательном центре в Эстерильде (северо-запад Дании) [16]. Ветроустановка мощностью 8,0 МВт оснащена синхронным генератором с постоянными магнитами и планетарным редуктором. Эта турбина является основной продукцией недавно созданного Vestas и Mitsubishi совместного предприятия. Серийное производство начато в 2015 г. В 2017 г. в Ливерпульском заливе Ирландского моря в Великобритании датской компанией Dong Energy завершено строительство второй очереди ветростанции Burbo Bank и запущены 32 крупнейших в мире ветрогенератора мощностью 8,0 МВт каждый. Первая очередь была введена в 2007 г. и включала 25 ветрогенераторов мощностью 3,6 МВт каждый; совокупная мощность первой очереди составила 90 МВт. Таким образом, общая мощность электростанции теперь составляет 346 МВт [17]. Разработанная в 2017 г. уже совместной фирмой MHI Vestas модель V164-9.5MW имеет мощность 9,5 МВт и диаметр ротора 164 м. Эта модель является приоритетной для размещения на ветропарках восточного побережья Великобритании Moray East (950 МВт) и Triton Knoll (860 МВт) и на оффшорных ВЭС Европы [14].

В 2018 г. датская компания Orsted приступила к строительству крупнейшей в мире оффшорной ветровой электростанции Hornsea Project One мощностью 1,2 ГВт в 120 км от побережья Йоркшира в Великобритании. Планируется установить 174 ветрогенератора мощностью 7,0 МВт фирмы Siemens Gamesa, каждый весом около 800 т. Ветрогенераторы монтируются компанией GeoSea с помощью уникального судна-трансформера Innovation, которое способно одновременно транспортировать четыре 800-тонные установки, а затем за счет выдвижных опор, достигающих морского дна, может превращаться в стационарную строительную платформу [18]. В конце 2017 г. фирмой Siemens Gamesa запущена в производство модель SG 8.0-167 (мощность – 8,0 МВт, диаметр ротора – 167 м, безредукторный привод). Декларируется возможность увеличения мощности модели до 9,0 МВт и наличие заказов на суммарную мощность 5,7 ГВт [14].

Перспективные разработки. Проектные разработки установок для морской ветроэнергетики продолжаются. Так, фирма General Electric спроектировала горизонтально-осевой ветрогенератор Haliade мощностью 9,5 МВт [19], у которого длина лопасти превышает 80 м, верхняя точка над уровнем моря – 200 м, вес гондолы – несколько сотен тонн. Подводную часть опоры составляет фундамент, трубы которого погружены в дно моря на глубину 40 м. Данная конструкция опор мощных оффшорных ветрогенераторов предусматривается для случаев их размещения на малых глубинах. Для глубоководной части предусматриваются плавучие платформы с якорной стабилизацией, подобно морским платформам в газо- и нефтедобыче.

Турбина ST10 мощностью 10 МВт представлена в 2012 г. фирмой Sway Turbine AS (Норвегия) [20]. Безредукторный генератор выполнен с постоянными магнитами, без железа статора и с уникальной компоновкой ротора и лопастей. Диаметр ротора – 164 м. Достоинство проекта – низкая масса и стоимость, меньшая на 15–20 % по сравнению с традиционными для оффшорных электростанций турбинами.

Американская фирма American Superconductor (AMSC) в 2012 г. спроектировала ветротурбину «Морской Титан» (SeaTitan) [21, 22] мощностью 10,0 МВт с диаметром ротора 190 м, высотой 125 м для работы со скоростями ветра 4,0–11,5 м/с, с безредукторным высокотемпературным сверхпроводниковым генератором (30 К), частотой вращения 10 мин⁻¹, массой 150 т и КПД 96 %. В коммерческую эксплуатацию данный агрегат пока не поступил.

В 2017 г. компания General Electric представила новый ветрогенератор: турбину Haliade-X [23] высотой 260 м и мощностью 12,0 МВт. Каждая лопасть турбины Haliade-X имеет длину 107 м, а полный диаметр ротора составляет 220 м. Лопасти для турбины были разработаны и изготовлены выкупленной в 2016 г. General Electric датской компанией LM Wind Power, имевшей производственные мощности в Европе, Америке и Азии.

Большая мощность новой турбины позволит энергетическим компаниям выйти на расчетные мощности оффшорных ВЭС, используя меньшее количество турбин и, следовательно, сокращая капитальные вложения, текущие расходы и расходы на обслуживание оборудования.

В [12] рассмотрен проект SUPRAPOWER ветротурбины мощностью 10,0 МВт с частотой вращения 8,1 мин⁻¹ со сверхпроводниковым безредукторным синхронным генератором. Сверхпроводящие катушки ротора изготовлены на основе диборида магния (MgB₂) и работают при температуре 20 К, криогенное охлаждение обеспечивается двухступенчатым кулером на цикле Гиффорда – МакМагона. Основное достоинство этого решения – снижение на 30 % массы гондолы.

Компания General Electric разработала проект ветрогенератора с безредукторным приводом мощностью 10,0 МВт и частотой вращения 10,0 мин⁻¹, ротор которого выполнен на основе низкотемпературного сверхпроводника NbTi, что обусловлено наличием хорошо отработанной технологии как производства данного материала, так и изготовления обмоток на его основе. Прогнозируемая стоимость электроэнергии, вырабатываемой сверхпроводни-

ковым ветрогенератором, будет на 13–18 % ниже, чем у генератора традиционного исполнения [24].

В рамках европейского проекта UpWind разрабатываются уникальные гигантские ветротурбины мощностью до 20,0 МВт [25]. Первые прототипы огромных ВЭУ с диаметрами ротора более 240 м должны появиться уже в 2020 г. UpWind будет использовать новейшие технологии и конструкции, в которых на 10 % снижена изгибающая нагрузка на лопасти, а усталостные нагрузки уменьшены на 20–40 %.

В ноябре 2015 г. группа исследователей из университета штата Вирджиния получила грант Министерства энергетики США на проведение работ по проектированию оффшорного ветрогенератора мощностью 50,0 МВт со сверхлегким ротором сегментарной конструкции (проект SUMR Segmented Ultralight Morphing Rotor) [19]. Особенностью конструкции данной установки, именуемой «листья пальмы», является размещение сверхлегких лопастей с подветренной части. Прототипом является пальма, листья которой при штормовом ветре складываются по направлению ветрового потока, обеспечивая сохранность дерева. Существующая наветренная конструкция оффшорных ветрогенераторов определяет положение ротора «лицом» к направлению ветра. Предлагаемая конструкция ротора оффшорного ветрогенератора мощностью 50,0 МВт позволяет складывать лопасти вдоль линии нагрузок ветра, уменьшая массу ветрового потока на лопасти и опасность возникновения аварии (рис. 5).

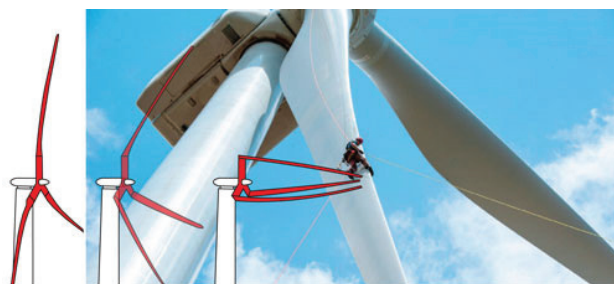


Рис. 5. Конструкция «листья пальмы» с размещением сверхлегких лопастей с подветренной части

Ветроэнергетика России. Россия не является лидером в мировой ветроэнергетике, но в 2017 г. сделаны заметные шаги в освоении энергии ветра. В Калининградской обл. реконструирована Зеленоградская ВЭС с переносом на новое место: вместо 21 ветроагрегата установлены три ветроустановки модели Enerson E70, обеспечивающие новой, теперь Ушаковской ВЭС прежнюю установленную мощность 5,1 МВт.

В Энергетическом холдинге «РусГидро» создана технологическая платформа «Перспективные технологии возобновляемой энергетики», которая объединила усилия государства, бизнеса и науки по реализации инновационных технических решений в сфере возобновляемой энергетики [26]. ПАО «РусГидро» совместно с японской корпорацией NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) в пос. Тикси к 2021 г. возведет ветропарк из трех ветроустановок суммарной мощностью 900,0 кВт – в Арктике заработает первый в мире ветропарк, действующий в условиях экстремальных холодов [27].

В рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» определены 8 приоритетных направлений развития науки и техники РФ и 27 критических технологий, в том числе «Технология новых и возобновляемых источников энергии, вклю-

чая водородную энергетику». Однако количество контрактов по этому направлению ежегодно снижалось, и в 2013 г. их осталось 34, что в общем числе контрактов по критическим технологиям составляет всего 2,8% [28]. Развитие возобновляемой энергетики изменило стратегию энергокомпаний и производителей оборудования. Владельцы тепловых и атомных активов наращивают мощности за счет ВИЭ. На российском рынке ветроэнергетики появились такие крупные игроки, как РОСНАНО и «Фортум», «Росатом» и «Энел». Совместный инвестиционный Фонд развития ветроэнергетики, созданный компаниями «Фортум» и РОСНАНО, получил право на строительство 1823 МВт ветрогенерации с гарантированным вводом в 2018–2023 гг.

Первым в России генерирующим объектом возобновляемой энергетики, начавшим работу на оптовом рынке электроэнергии и мощности, стала в январе 2018 г. Ульяновская ВЭС-1 с установленной мощностью 35,0 МВт (14 агрегатов по 2,5 МВт). На конец 2018 г. запланирован запуск завода по производству лопастей ветрогенераторов (Vestas Manufacturing Rus) в Ульяновске [27].

В 2019 г. РОСНАНО совместно с испанской компанией Windar Renovables планирует создать в г. Волгодонске промышленное производство модульных стальных башен для ветроэнергетических установок мощностью 2,5 МВт. Таким образом, к концу 2019 г. на Дону появится новая отрасль – ветроэнергетика. В течение ближайших трех лет в Ростовской области планируется создание шести ветропарков.

Госкорпорация «Росатом» намерена в 2018–2020 гг. построить ветроэлектростанции общей мощностью не менее 610,0 МВт. В составе госкорпорации создано АО «НоваВинд», объединяющее все ветроэнергетические активы «Росатома» (АО «ОТЭК», АО «ВетроОГК» и др.), а также совместное с нидерландской компанией Lagerway совместное предприятие Red Wind, которое займется поставкой ветроустановок под ключ. Производственная программа предусматривает поставку совместным предприятием 400 ветроустановок до 2022 г. Lagerway обеспечит трансфер технологий по производству ветроустановок мощностью 2,5 и 4,5 МВт.

Производство компонентов для ВЭУ намечено организовать на энергомашиностроительном предприятии «Атоммаш».

Ветроэлектростанция мощностью 150,0 МВт (60 агрегатов по 2,5 МВт) заработает в 2019 г. в Адыгее. Вслед за Адыгейским ветрокомплексом ВЭС будут построены в 2020 г. ветропарки на Кубани, мощность которых составит 200,0 МВт, и в Ставропольском крае – 260,0 МВт [29, 30].

В 2017 г. ПАО «Энел Россия» получило право на строительство двух объектов ветрогенерации мощностью 90,0 и 201,0 МВт. Ветропарк мощностью 90,0 МВт расположится в Ростовской обл. и должен быть введен в эксплуатацию в 2020 г. Второй ветропарк мощностью 201,0 МВт планируется ввести в эксплуатацию в 2021 г. в Мурманской обл.

Комплексная программа РАО ЭС Востока по внедрению технологий возобновляемой энергетики на Дальнем Востоке предполагает строительство 178 объектов суммарной мощностью 146,0 МВт [29].

Несмотря на очевидный прогресс в освоении ветроэнергетики, Россия существенно отстает от стран-лидеров. Например, в США в настоящее время установлено свыше 50 тыс. ветрогенераторов, мощность которых составляет 8% от установленной мощности генераторов в стране. По оценке экспертов, к 2030 г. доля ветроэнергетики в США составит 20% от суммарной мощности. Мощности крупнейших ветростанций США представлены в таблице [31], данные которой показывают, что практически исключена возможность сравнения с ветростанциями России.

Ветроэнергетика мегаваттного диапазона мощностей – наукоемкая высокотехнологичная отрасль, которая создает квалифицированные рабочие места, в том числе в смежных отраслях. Например, для перевозки тяжеловесных крупногабаритных грузов развилось целое направление техники, предназначенное для перевозки лопастей и колонн ветрогенераторов:

созданы специальные транспортные средства – длинномерные полуприцепы с большим ходом подвески для перевозки лопасти, адаптеры для захвата секции колонны на базе низкорамных тяжеловозных тележек, адаптеры для лопасти на базе самоходного модульного транспортного средства.

Крупнейшие ветростанции США

Название	Штат	Мощность, МВт
Alta Wind Energy Center	Калифорния	1320,0
Roscoe Wind Farm	Техас	781,0
Horse Hollow Wind Energy Center	Техас	736,0
Tehachapi Pass Wind Farm	Калифорния	690,0
Capricorn Ridge Wind Farm	Техас	662,0
San Geronio Pass Wind Farm	Калифорния	619,0
Fowler Ridge Wind Farm	Индиана	600,0
Sweetwater Wind Farm	Техас	585,0
Altamont Pass Wind Farm	Калифорния	576,0

Заключение

Проведенный анализ показывает, что за последние 20 лет единичная мощность ветротурбины оффшорной ВЭС увеличилась в 6 раз и к настоящему времени достигла 9,5 МВт при диаметре ротора 164,0 м. Повышение единичной мощности ВЭС связано со стремлением повысить отношение вращающего момента к массе ветротурбины. Наименьшей массой и стоимостью в пределах от 1,5 до 10,0 МВт обладают ВЭУ с асинхронным генератором двойного питания с многоступенчатым редуктором, однако безредукторный синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов превосходит редукторный привод по КПД и выработке энергии, имеет меньшие затраты на монтаж и обслуживание, а также повышенную надежность. Многие фирмы, поставляющие оборудование для оффшорных ВЭС, отдают предпочтение безредукторному приводу. Уже достигнуто отношение вращающего момента к массе ветротурбины, равное 25 кг/(кН·м), и продолжают поиски различных путей снижения стоимости ВЭУ. Европейские разработчики проводят интенсивные работы над проектом ветротурбины мощностью 20,0 МВт, а американские – над ВЭУ мощностью 50,0 МВт, рассматривая в качестве перспективы безредукторные сверхпроводниковые синхронные генераторы.

Список литературы

1. Малютин Л.. Ветроэнергетика в 2018 году // Основные средства. 2018. № 9. С. 38–40.
2. Оффшорная ветроэнергетика Европы: итоги 2018 года. Портал elektrovesti.net. URL: <https://elektrovesti.net/64470> (дата обращения: 17.05.2019).
3. Безруких П.П. Анализ перспектив развития возобновляемой энергетики мира // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2015. № 2 (15). С. 188–193.
4. Fuhrländer MD70/77. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/400-fuhrlaender-fl-md-70> (дата обращения: 17.05.2019).
5. WWD-3D100. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/489-winwind-wwd-3-d103> (дата обращения: 17.05.2019).
6. Siemens 6.0 MW Offshore Wind Turbine. URL: http://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-generation/renewables/windpower/6_MW_Brochure_Jan.2012.pdf (дата обращения: 17.05.2019).
7. Gamesa 5.0 MW. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/768-gamesa-g132-5.0mw> (дата обращения: 17.05.2019).

8. SL6000 Series Wind Turbine. URL: <http://sinovel.com/english/content/?109.html> (дата обращения: 17.05.2019).
9. Polinder H., van der Pijl F.F.A., de Vilder G.J., Tavner P.J. (2006) Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. No. 21 (3). P. 725–733.
10. Zhang J., Chen Z. and Cheng M. Design and comparison of a novel stator interior permanent magnet generator for direct-drive wind turbines // *IET Renewable Power Generation*. 2007. No. 1 (4). P. 203–210.
11. Bang D., Polinder H., Shrestha G., Ferreira J.A. Promising direct-drive generator system for large wind turbines // *EPE Journal*. 2008. No. 18 (3). P. 7–13.
12. Zhu Z., Qu R., Wang J. Conceptual design of the cryostat for a direct drive superconducting wind generator // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2014. Vol. 24. Iss. 3. DOI: 10.1109/TASC.2013.2290328.
13. Ragheb M. *Modern Wind Generators*. NetFiles. University of Illinois at Urbana-Champaign. 2010. 90 p.
14. E126 State of the art. URL: <http://www.enercon.de/en-en/66.htm> (дата обращения: 17.05.2019).
15. Десять крупнейших морских ветрогенераторов. Российская Ассоциация Ветроиндустрии. URL: <https://rawi.ru/2018/09/desyat-krupneyshih-morskih-vetrogeneratorov> (дата обращения: 17.05.2019).
16. Vestas V164-8.0. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/318-vestas-v164-8.0> (дата обращения: 17.05.2019).
17. Гавриленко А. Под Ливерпулем заработала крупнейшая в мире ветряная электростанция // *Российская газета*. 25.05.2017.
18. Ветроэнергетика и ветроэнергетические установки. Россия и мир. URL: <http://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 17.05.2019).
19. Мамедов О.М. Синергетический эффект ветроэнергетики // *Энергосбережение*. 2018. № 4. С. 52–57.
20. Permanent magnet generators. The Switch. URL: <http://www.theswitch.com/wind-power/permanent-magnet-generators> (дата обращения: 17.05.2019).
21. AMSC. Sea Titan TM 10 MW Wind Turbine. URL: <http://www.amsc.com/documents/seatitan-10-mw-wind-turbine-data-shee> (дата обращения: 17.05.2019).
22. Snitchier G., Gamble B., King C. 10 MW class superconductor wind turbine generators // *IEEE Trans. Appl. supercond.* 2011. Vol. 21. No. 3. P. 1089–1092.
23. Самый мощный в мире ветрогенератор // Информационный портал «Атомная энергия 2.0». URL: <http://www.atomic-energy.ru/news/2018/03/06/83840> (дата обращения: 17.05.2019).
24. Fair R., Stautner W., Douglass M., et al. Superconductivity for Large-Scale Wind Turbines // *Applied Superconductivity Conference, Portland, Oregon, October 11th, 2012*.
25. Европейцы приступили к разработке гигантских ветряков. URL: https://elektrovesti.net/17867_evropeytsy-pristupili-k-razrabotke-gigantskikh-vetryakov (дата обращения: 17.05.2019).
26. Андриянов Н.И., Юркевичус С.П. Анализ программ инновационного развития госкомпаний энергетической отрасли и хода их реализации // *Инноватика и экспертиза*. 2014. № 2 (13). С. 36–50.
27. Энергетика и промышленность России. 2018. № 7 (339).
28. Кольцов А.В., Октябрьский А.М., Хабарова Т.В. Критические технологии и приоритетные направления развития науки и техники в рамках реализации ФЦП развития научно-технологического комплекса Российской Федерации // *Инноватика и экспертиза*. 2016. № 3 (18). С. 31–54.
29. Энергетика и промышленность России. 2018. № 17 (349).
30. Энергетика и промышленность России. 2018. № 01–02 (357–358).
31. Ветроэнергетика США. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ветроэнергетика_США (дата обращения: 17.05.2019).

References

1. Malyutin L. (2018) *Vetroenergetika v 2018 godu* [Wind power in 2018]. *Fixed assets*. No. 9. P. 38–40.
2. *Offshornaya vetroenergetika Evropy: itogi 2018 goda* [Offshore wind power in Europe: results of 2018] *Portal elektrovesti.net* [Portal elektrovesti.net]. Available at: <https://elektrovesti.net/64470> (appeal date: 17.05.2019).

3. Bezrukikh P.P. (2015) *Analiz perspektiv razvitiya vozobnovlyаемой energetiki mira* [Analysis of world prospects of renewable energy] *Innovatika i ekspertiza* [Innovatics and expert examination]. No. 2 (15). P. 188–193.
4. Fuhrländer MD70/77. Available at: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/400-fuhrlaender-fl-md-70> (appeal date: 17.05.2019).
5. WWD-3D100. Available at: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/489-winwind-wwd-3-d103> (appeal date: 17.05.2019).
6. Siemens 6.0 MW Offshore Wind Turbine. Available at: http://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-generation/renewables/windpower/6_MW_Brochure_Jan.2012.pdf.
7. Gamesa 5.0 MW. Available at: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/768-gamesa-g132-5.0mw> (appeal date: 17.05.2019).
8. SL6000 Series Wind Turbine. Available at: <http://sinovel.com/english/content/?109.html> (appeal date 17.05.2019).
9. Polinder H., van ser Pijl F.F.A., de Vilder G.J., Tavner P.J. (2006) Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. No. 21 (3). P. 725–733.
10. Zhang J., Chen Z. and Cheng M. Design and comparison of a novel stator interior permanent magnet generator for direct-drive wind turbines. *IET Renewable Power Generation*. 2007. No. 1 (4). P. 203–210.
11. Bang D., Polinder H., Shrestha G., Ferreira J.A. Promising direct-drive generator system for large wind turbines. *EPE Journal*. 2008. No. 18(3). P. 7–13.
12. Zhu Z., Qu R., Wang J. (2014) Conceptual design of the cryostat for a direct drive superconducting wind generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. Vol. 24. Iss. 3. DOI: 10.1109/TASC.2013.2290328.
13. Ragheb M. (2010) *Modern Wind Generators*. Net Files. University of Illinois at Urbana-Champaign. 90 p.
14. E126 State of the art. Available at: <http://www.enercon.de/en-en/66.htm> (appeal date: 17.05.2019).
15. *Desyat' krupneyshikh morskikh vetrogeneratorov*. *Rossiyskaya Assotsiatsiya Vetroindustrii* [Ten largest offshore wind turbines. Russian Association of Wind Power Industry]. Available at: <https://rawi.ru/2018/09/desyat-krupneyshih-morskikh-vetrogeneratorov> (appeal date: 17.05.2019).
16. Vestas V164-8.0. Available at: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/318-vestas-v164-8.0> (appeal date: 17.05.2019).
17. *Pod Liverpulem zarabotala krupneyshaya v mire vetryanaya elektrostantsiya* [Near Liverpool the world's largest wind farm has put into operation] *Rossiyskaya gazeta* [Russian newspaper] 25.05.2017 (appeal date: 17.05.2019).
18. *Vetroenergetika i vetroenergeticheskie ustanovki* [Wind power and wind power turbines] *Rossiya i mir* [Russia and the world]. Available at: <http://www.tadviser.ru/index.php> (appeal date: 17.05.2019).
19. Mamedov O.M. (2018) *Sinergeticheskiy effekt vetroenergetiki* [Synergetic effect of wind power] *Energoberezhnie* [Energy saving]. No. 4. P. 52–57.
20. Permanent magnet generators. The Switch. Available at: <http://www.theswitch.com/wind-power/permanent-magnet-generators> (appeal date: 17.05.2019).
21. AMSC. Sea Titan TM 10 MW Wind Turbine. Available at: <http://www.ams.com/documents/seatitan-10-mw-wind-turbine-data-shee> (appeal date: 17.05.2019).
22. Snitchier G., Gamdle B., King C. (2011) 10 MW class superconductor wind turbine generators. *IEEE Trans. Appl. supercond.* Vol. 21. No. 3. P. 1089–1092.
23. *Samyy moshchnyy v mire vetrogenerator* [The world's most powerful wind turbine. Informatsionnyy portal «Atomnaya energiya 2.0» [Information portal «Nuclear energy 2.0»]. Available at: <http://www.atomic-energy.ru/news/2018/03/06/83840> (appeal date: 17.05.2019).
24. Fair R., Stautner W., Douglass M., et al. Superconductivity for Large-Scale Wind Turbines. Applied Superconductivity Conference, Portland, Oregon October 11th, 2012.
25. *Evropeytsy pristupili k razrabotke gigantskikh vetryakov* [Europeans have started to develop giant wind turbines]. Portal *elektrovesti.net*. Available at: https://elektrovesti.net/17867_evropeytsy-pristupili-k-razrabotke-gigantskikh-vetryakov (appeal date: 17.05.2019).

26. Andriyanov N.I., Yurkevichyus S.P. (2014) *Analiz programm innovatsionnogo razvitiya goskompaniy energeticheskoy otrasli i khoda ikh realizatsii* [Analysis of innovative development programs of state-owned enterprises of energy sector and their implementation] *Innovatika i ekspertiza* [Innovatics and expert examination]. No. 2 (13). P. 36–50.
27. *Energetika i promyshlennost' Rossii* [Russian energy and industry]. 2018. No. 7 (339).
28. Kol'cov A.V., Oktyabr'skij A.M., Habarova T.V. (2016) *Kriticheskie tekhnologii i prioritetye napravleniya razvitiya nauki i tekhniki v ramkakh realizatsii FTsP razvitiya nauchno-tekhnologicheskogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii* [Critical technologies and priority directions of development of science and technology within the framework of the federal target program of development of scientific-technological complex of the Russian Federation] *Innovatika i ekspertiza* [Innovatics and expert examination]. No. 3 (18). P. 31–54.
29. *Energetika i promyshlennost' Rossii* [Russian energy and industry]. 2018. No. 17 (349).
30. *Energetika i promyshlennost' Rossii* [Russian energy and industry]. 2018. No. 01–02 (357–358).
31. *Vetroenergetika SShA* [Wind power in the United States]. Wikipedia. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ветроэнергетика_США (appeal date: 17.05.2019).