

О возможной и целесообразной суммарной установленной мощности ветроэлектрических станций в России

Рецензия эксперта на статью получена 08.11.2017 [Expert review on the article was received on November 8, 2017].

Введение

Пройдя длительный и трудный период подготовки законодательной базы, ветроэнергетика России в 2017 году наконец-то стартовала в реализации установленных Правительством РФ планов по вводу мощностей ветроэлектрических станций (ВЭС) и по организации их отечественного производства [1]. Планы эти (3,6 ГВт суммарной установленной мощности ВЭС к 2024 году) весьма скромны на фоне крупномасштабного развития ветроэнергетики в мире (суммарная мощность на начало 2017 году составляла около 490 ГВт [2]) и в странах лидерах (в Китае в 2016 году введено более 23 ГВт новых ВЭС [2]).

Но важен долгожданный первый шаг, особенно с учётом того, что в выполнение планов включились мощные в технологическом и экономическом плане российские игроки («Росатом», «Роснано» и др.), выступающие вместе с ведущими мировыми производителями ветроэнергетических установок (Vestas, Lagerwey и др.), что вселяет определённый оптимизм относительно будущего отечественной ветроиндустрии и на её базе новой для страны энергетической отрасли.

Важнейшим для развития ветроэнергетики в России является вопрос о возможных и целесообразных объёмах и темпах ввода мощностей ВЭС. Возможности использования ВЭС в том или ином регионе и России в целом определяются наличием ветровых ресурсов (ВЭР) или ветроэнергетического потенциала (ВЭП), соответствующей сетевой, дорожной, транспортной и строительно-монтажной инфраструктурой, возможным землеотводом под ВЭС, мощностями про-

изводства ВЭУ и экономической целесообразностью их использования. Последняя определяется величиной ВЭП, техническим совершенством ВЭУ и во многом правовой и экономической базой поддержки ВЭС.

Возможности использования ВЭС в том или ином регионе и России в целом определяются наличием ветровых ресурсов или ветроэнергетического потенциала, соответствующей сетевой, дорожной, транспортной и строительно-монтажной инфраструктурой, возможным землеотводом под ВЭС, мощностями производства ВЭУ и экономической целесообразностью их использования

Ветроэнергетический потенциал России и её регионов

Понятия ВЭП и методы его определения за последнее столетие претерпевали существенное развитие по мере развития самой ветроэнергетики. Первые оценки запасов ветроэнергетических ресурсов в бывшем СССР, доступных для практического использования (технический ВЭП) и исчисляемых в ТВт·ч/год (млрд кВт·ч/год), восходят к первой трети XX века [3], согласно которым ветроэнергетический потенциал СССР составлял $\approx 18\,300$ ТВт·ч/год. Согласно [4] ВЭП только Казахстана оценён в 13 000 ТВт·ч/год. По современным оценкам технический ВЭП также существенно различается у разных авторов.

УДК 620.97

О возможной и целесообразной суммарной установленной мощности ветроэлектрических станций в России

Ю.И. Кудряшов, В.Г. Николаев, АНО НИЦ «Атмограф»

Авторами предложена методика оценки возможных и целесообразных объёмов и темпов ввода мощностей ВЭС в России. Методика построена на теоретическом определении характеристик ветроэнергетического потенциала (ВЭП) и энергетических показателей современных ветроэлектрических станций (ВЭС) по данным многолетних измерений на сети аэрологических станций, на оценке территорий, допускающих возведение и эксплуатацию ВЭС с учётом существующей в регионе сетевой, дорожной, транспортной и строительно-монтажной инфраструктуры, а также на оценке экономической целесообразности их использования. Последняя определена с учётом ВЭП региона, технического совершенства ветроэнергетических установок (ВЭУ) и возможных вариантов законодательной базы поддержки проектов ВЭС. Установленные с учётом приведённых факторов целесообразные суммарные мощности ВЭС к 2035 году по оценкам авторов могут составить до 40 ГВт с суммарной годовой выработкой до 100 ТВт·ч.

Ключевые слова: ветроэнергетический потенциал, ветроэнергетическая установка, инфраструктура, коэффициент использования установленной (номинальной) мощности ВЭУ (Киум), потребление электроэнергии, экономическая эффективность.

UDK 620.97

On the possible and feasible total installed capacity of wind power stations in Russia

Yu. I. Kudryashov, V. G. Nikolaev, Research & Information Center "Atmograph".

The authors proposed a method for estimating the possible and feasible volumes and rates of input of wind farm generating capacities in Russia. The method is based on the theoretical definition of the characteristics of the wind resources W_{res} and the energy indicators of modern wind power plants W_{pp} , based on the data of long-term measurements on the upper-air station, on the assessment of the territories permitting the construction and exploitation of W_{pp} , taking into account the existing electric network, road, transport and construction-installation infrastructure in the region, as well as assessing the economic feasibility of their use. The economic feasibility is determined taking into account the region's W_{res} , the technical perfection of W_{pp} and the possible options of the legislative base for supporting W_{pp} projects. The above factors established taking into account the estimated total capacity of the W_{pp} by 2035, according to the author's estimates, can be 40 GW with a total annual output up to 100 TWh.

Key words: wind power potential, wind turbine, infrastructure, capacity factor, power consumption, economic efficiency.

Так, в [5] для стран Восточной Европы и бывшего СССР он оценён в 10 600 ТВт·ч/год, по данным [6–9] в России он составляет $\approx 52\,200$ ТВт·ч/год, а по более поздним данным [10–13] — $\approx 11\,500$ ТВт·ч/год.

Различие существующих количественных оценок ВЭП Российской Федерации, а также появление ряда современных авторов с новыми и оригинальными подходами к развитию самого понятия ВЭП и методам его определения диктует, на наш взгляд, целесообразность обсуждения и достижения определённости в этом вопросе, важном для развития отечественной ветроэнергетики, особенно в её начальном периоде.

При оценке ресурсной базы ветроэнергетики региона (административного субъекта или страны в целом) в научном и техническом сообществе принято рассматривать три основных устоявшихся вида ветроэнергетических потенциалов: валового, технического и экономического. При этом рассматриваемый регион представляется как совокупность его частей (зон), по всей площади каждой из которых удельная мощность ветра W [кВт/м²], условия рельефа, поверхности и ветрового климата принимаются однородными, а ВЭП региона считается равным сумме валовых потенциалов его зон [6–9].

В данном исследовании авторы опирались на их классическое определение ВЭП, развитие и данное в работах [6–9], определяющих валовый, технический и экономический ВЭП следующим образом.

Валовый потенциал ветровой энергии (валовый ВЭП) региона (страны) — среднесуточная суммарная ветровая энергия [кВт·ч/год], теоретически доступная для использования на площади этого региона в течении одного года. Валовый ВЭП региона (страны) является чисто теоретическим понятием, не отражающим практические возможности использования ветровой энергии и в данной работе не рассматривается.

Технический потенциал ветровой энергии (технический ВЭП) региона — часть валового ВЭП [кВт·ч/год], которая может быть получена в виде электрической энергии при современном уровне развития техники и соблюдении экологических норм.

Технический ВЭП зависит от энергетической эффективности ветроэнергетических установок (ВЭУ), утилизирующих энергию ветра, характеристик ветра (скорости и функции распределения ветра по скоростям) на высоте оси ВЭУ, и доли площадей региона, пригодной для сооружения и эксплуатации ветроэнергетических установок [6–9].



Источник: «ЮлДемСтрой», <http://oekodemstroy.by>

Экономический потенциал ветровой энергии (экономический ВЭП) региона — величина годовой выработки электрической энергии ВЭУ региона [кВт·ч/год], получение электроэнергии на которых экономически оправдано для данного региона при существующем уровне цен на строительно-монтажные работы, оборудование, производство, транспортировку и распределение энергии и топлива при соблюдении экологических норм [6–9].

Общепринятая трактовка валового, технического и экономического ВЭП допускает разные подходы к определению их количественных параметров, которые могут приводить к существенным (в разы) различиям у разных авторов.

Определение технического потенциала регионов России

В работах [6–9] технический ВЭП региона определён исходя из допущений: средняя доля удельной мощности ветра, преобразованной ВЭУ в полезную энергию, составляет 30 %; среднее значение коэффициента использования установленной мощности $K_{иум}$ ВЭУ составляет 20 %; расстояние между ВЭУ по гидродинамическим соображениям составляет $10D_{вк}$; площадь РФ, удовлетворяющая первому допущению, составляет 20 % от её территории; по техническим и экологическим соображениям ВЭУ занимают 10 % площади района.

Эта методика получила развитие в работах [3–10]. В них вопрос об эффективности преобразования энергии ветра (допущения 1–4) решён определением мощности тестовых ВЭУ с известными рабочими характеристиками и их $K_{иум}$, определённых для всех субъектов РФ по методике НИЦ «Атмограф» [12, 13].

Достоверность оценки технического ВЭП по [12, 13] зависит от выбора ВЭУ, обеспечивающей съём ветровой энергии с 1 км² территории региона и точности определения коэффициента использования номинальной мощности ВЭУ $K_{иум}$. Средние для отдельно взятой зоны значения $K_{иум}$ ВЭУ определялись расчётным путём по рабочим характеристикам ВЭУ (зависимостям мощности ВЭУ от скорости ветра) и по данным многолетних измерений скорости ветра на репрезентативных для этой зоны метеорологических и аэрологических станциях.

Общепринятая трактовка валового, технического и экономического ВЭП допускает разные подходы к определению их количественных параметров, которые могут приводить к различиям у разных авторов

В качестве тестовой ВЭУ была выбрана одна из наиболее совершенных в 2005–2010 годах ВЭУ производимой компанией Vestas модели V90 первого ветрового класса (по стандарту МЭК 61400), номинальной мощности 3 МВт с диаметром ветроколеса $D_{вк}$ 90 м и высотой башни $H_б = 100$ м. Высота башни 100 м совпадала со стандартным высотным уровнем многолетних измерений ветра на государственной сети аэрологических станций бывшего СССР и современной России и, тем самым, обеспечивала максимальную достоверность теоретического определения $K_{иум}$, не превышавшую 15 % для равнинных и 20–24 % для горных территорий России.

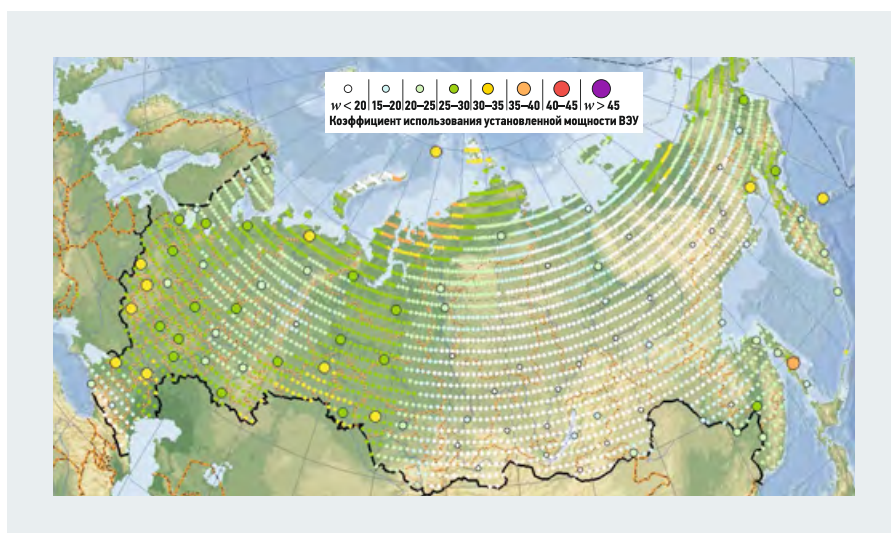


Рис. 1. Территориальное распределение $K_{нум}$ ВЭУ V90 с высотой башни 100 м

Распределение $K_{нум}$ ВЭУ V90 по территории РФ дано на рис. 1.

Использованная в [10–13] методика оценки технического ВЭП построена на предположении, что максимально использовать энергию ветра региона возможно размещением на допустимой площади его территории наиболее технически совершенных ВЭУ пропеллерного типа. Оптимальным при этом является размещение ВЭУ в узлах равносторонней треугольной сетки со стороной $L = 10D_{вк}$, обеспечивающее достаточно полное восстановление мощности ветра, отданной очередному ВЭУ, при его движении до следующего на его пути ВЭУ и максимально плотное их размещение: $N_{уд} = 1,155(1000/L)^2$ ВЭУ/км² и максимальное количество ВЭУ в регионе $N = N_{уд}S$, где S — площадь региона в км². При этом при расчёте технического ВЭП для сопоставимости результатов с [6–9] в силе оставлено допущение о размещении ВЭУ на 10 % площади региона.

Выбранная в качестве тестовой ВЭУ V90 при таком её размещении обеспечивала съём мощности ветра с 1 км² поверхности земли до 4,28 МВт при скоростях ветра более 13,5 м/с. Расчётный средний по территории РФ $K_{нум}$ ВЭУ V90 составил 19,8 %.

Результаты исследований, представленные в настоящей статье, являются следующим шагом развития представлений о техническом ВЭП России, её регионов и административных субъектов, обусловленным быстрым развитием ветровой техники.

Проведённый авторами анализ показывает, что обеспечивающей наибольшую выработку удельной (с 1 км² территории) мощности и энергии в настоящее время является ВЭУ модели E126

первого ветрового класса производства компании Enercon (ФРГ) номинальной мощности 7,58 МВт с $D_{вк} = 126$ м и высотой башни $H_б = 135$ м. E126 обеспечивает съём мощности ветра до 5,5 МВт с 1 км² поверхности земли при скоростях ветра более 15 м/с и при размещении ВЭУ в узлах равносторонней треугольной сетки со стороной $10D_{вк}$ (1260 м). Учитывая возможность повышения мощности ВЭУ за

Технический ВЭП по данным разных источников

табл. 1

Наименование федерального округа (ФО)	Данные работ [6–9], ТВт·ч/год	Данные работ [10–13], ТВт·ч/год	Данные настоящей работы, ТВт·ч/год
Центральный ФО	607	588	908
Северо-Западный ФО	3461	1428	1919
Южный ФО (вкл. Северо-Кавказский ФО)	1428	564	734
Приволжский ФО	1890	874	1327
Уральский ФО	12 936	1577	5076
Сибирский ФО	12 104	2754	5245
Дальневосточный ФО	19 755	3689	6576
Россия в целом	52 181	11 473	21 783

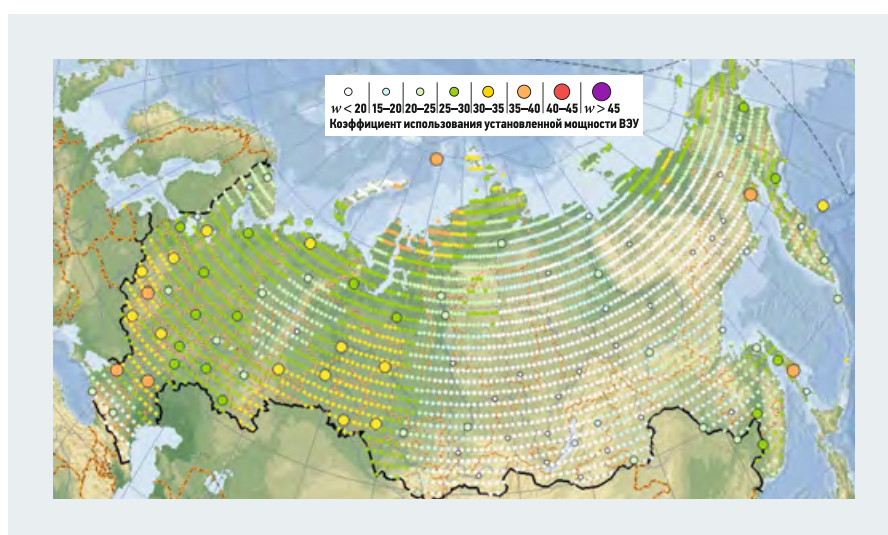


Рис. 2. Территориальное распределение $K_{нум}$ ВЭУ E126 с высотой башни 150 м

счёт роста скорости ветра с высотой при расчётах высота её башни гипотетически увеличена до 150 м (серийное производство башен с такими высотами освоены рядом производителей ВЭУ). Расчёт $K_{нум}$ ВЭУ E126 для административных субъектов Российской Федерации проведён с использованием методики [12, 13]. Карта распределения $K_{нум}$ ВЭУ E126 по территории России представлена на рис. 2.

Средний по территории России $K_{нум}$ ВЭУ V90 согласно проведённым расчётам составил 22,8 % против 19,8 % у ВЭУ V90, используемой в качестве тестовой в методике [10–13]. Как и в [10–13], технический ВЭП определялся в предположении размещения ВЭУ E126 на 10 % площади региона. Результаты расчёта технического ВЭП по методике [6–13] представлены в настоящей статье в табл. 1.

Расхождения значений технического ВЭП, полученных с использованием моделей [10–13] и использованных в данной работе, объясняется разницей примерно в 1,3 раза съёма ветровой энергии с 1 км² ВЭУ E126 и V90, а также различием в 1,2 раза и более их $K_{нум}$.

Рассчитанный технический ВЭП России на базе как ВЭУ V90, так и ВЭУ E126, соответствует его минимальному значе-



Рис. 3. Среднегодовая скорость ветра на высоте 100 м по данным аэрологических станций

нию, поскольку обе ВЭУ сконструированы под ветра первого класса, что по прочностным свойствам (в основном определяемым диаметрами ветроколёс ВЭУ $D_{вк}$) допускает их использование по всей территории страны со сколь угодно сильными ветрами. Однако в регионах со вторым (среднегодовые скорости ветра $V_{ср}$ от 7,5 до 8,5 м/с) и третьим ($V_{ср} < 7,5$ м/с) классами ветров по МЭК 61400 допустимо использование ВЭУ с увеличенными $D_{вк}$ и, соответственно, с большими (в 1,1–1,2 раза) значениями $K_{иум}$.

Таким образом, оценённый по предлагаемой методике технический ВЭП России при достигнутом уровне ветротехники не менее чем в 20 раз превышает современное потребление электроэнергии. Обращает на себя внимание и благоприятное для практики распределение технического ВЭП по территории страны.

Оценённый технический ВЭП наиболее населённых округов РФ (Северо-Западного, Центрального, Южного и Приволжского), в которых проживает более 75 % населения России, пятикратно превышает электропотребление всей страны.

Определение экономического потенциала региона

Согласно [6–9] экономический ВЭП региона определяется величиной годовой выработки электроэнергии ВЭУ региона [кВт·ч/год], получение которой экономически оправдано для региона при существующем уровне цен на строительство ВЭУ, оборудование, производство, транспортировку и распределение энергии при соблюдении экологических норм [6–9].

Экономическая оправданность зависит от системы экономической поддержки ВЭУ и от интересов субъектов, реализующих и использующих проекты ВЭС.



В настоящее время и до 2024 года в Российской Федерации субъектами, определяющим экономическую оправданность, являются инвесторы, основным критерием которых является предоставляемая принятым законодательством по ВЭС [1] возможность возврата средств, вложенных в реализацию проектов ветроэнергетических установок.

Оценённый по предлагаемой методике технический ВЭП РФ при достигнутом уровне ветротехники не менее чем в 20 раз превышает современное потребление электроэнергии. Оценённый технический ВЭП наиболее населённых округов РФ, где проживает более 75 % населения России, почти пятикратно превышает электропотребление всей страны

Существующая в России система экономической поддержки ВЭУ [1] построена на возврате за 15 лет (при сроках гарантированной работы ВЭУ в 20 лет) средств, вложенных в строительство ВЭУ, определённых в ходе конкурсов на заключение договоров поставки мощности (ДПМ) по критерию минимальных капитальных затрат при условии работы ВЭУ с $K_{иум} > 27\%$ и получении некоторой (не более 20–25 % от капитальных затрат) прибыли от продажи электроэнергии ВЭУ по ценам оптового рынка (немногим более 1 руб./кВт·ч). Правило 27 % для $K_{иум}$ требует установления ветрового класса региона, определяемого по среднегодовым скоростям ветра на высоте оси ветрового колеса, и подбора для него ветроэнергетической установке соответствующего ветрового класса.

Распределение по территории России среднегодовой скорости ветра на высоте 100 м, смоделированной по методике [12, 13] по аэрологическим данным, приведено на рис. 3 [12].

В данной работе значения экономического ВЭП, соответствующего действующей в России до 2024 года правовой базе реализации проектов ВЭУ, определены в соответствии с методическими положениями работ [12, 13] и рядом дополнений к ним следующим образом. Для каждого субъекта РФ определены классы ветров и выбраны из известных серийных ВЭУ соответствующего ветрового класса. Для выбранных ВЭУ по методике НИЦ «Атмограф» [12, 13] рассчитаны их средние региональные $K_{иум}$. При определении экономического ВЭП пренебрегалось действующими ограничениями по ежегодным и суммарным (3,6 ГВт к 2024 году) объёмам вводов ВЭУ, установленным для сдерживания тарифов на электроэнергию (исходя из больших капитальных затрат на ВЭУ).

Основанием для такого допущения является расчёт на то, что в законодательство по ВЭУ будут внесены предлагаемые авторами поправки по изменению критерия конкурсного отбора проектов ВЭУ с минимума капитальных затрат на минимум себестоимости электроэнергетики (сумма капитальных и эксплуатационных затрат, делённая на выработку, или $K_{\text{иум}}$ ВЭУ), обеспечивающие по расчётам авторов сдерживание и даже снижение (а не повышение) тарифов.

При таких поправках в правовой базе ВЭС ограничения по масштабам и темпам ввода, определённые в [1], могли бы быть ослаблены и даже сняты. В противном случае всякие рассуждения об экономическом потенциале ВЭП, который реализуется суммарными мощностями ВЭС более 3,6 ГВт, теряют смысл.

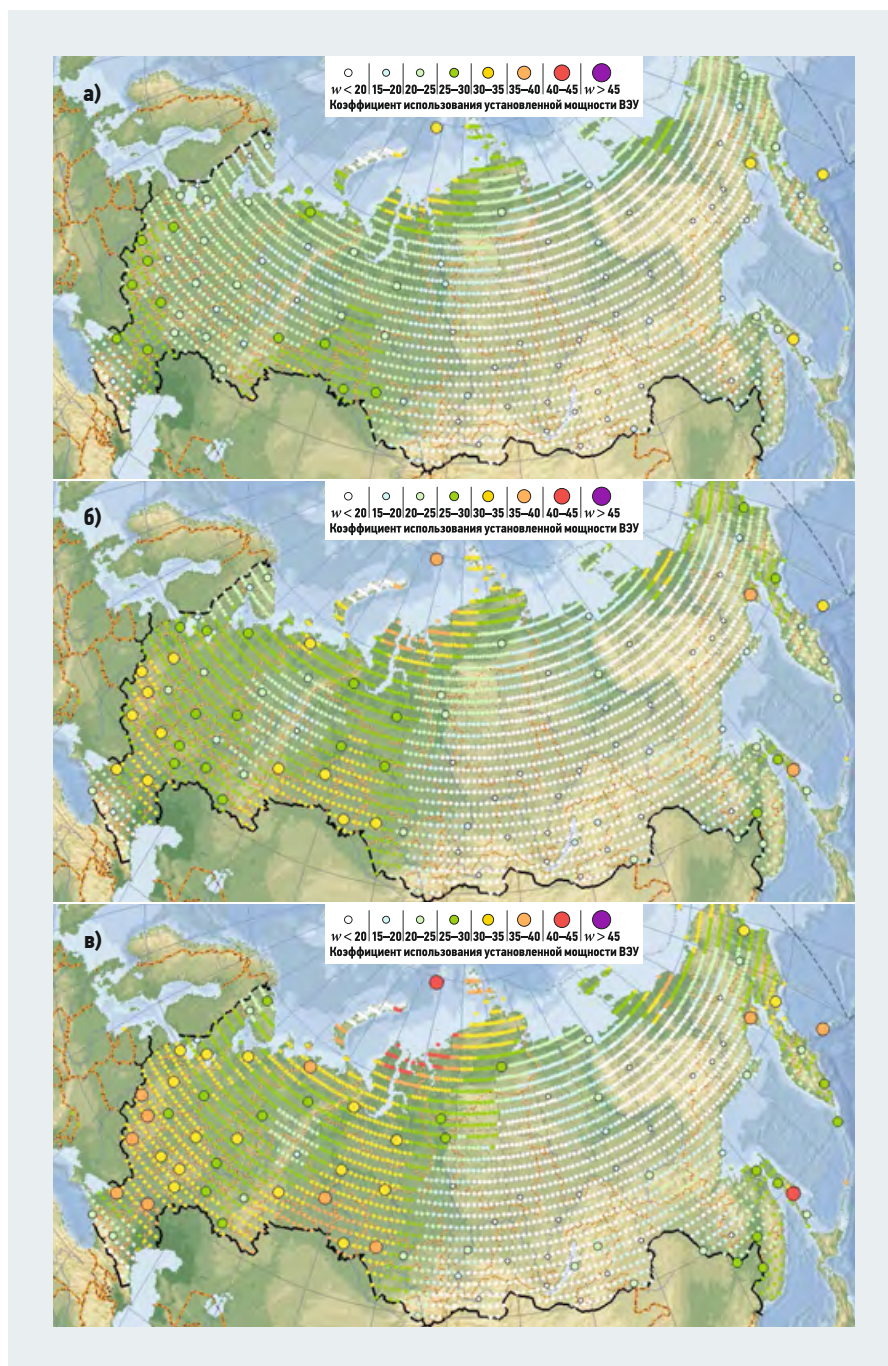
То обстоятельство, что ВЭУ разного ветрового класса имеют разные $K_{\text{иум}}$ в одном регионе, было уточнено в предлагаемой методике определения экономического ВЭП региона. Для этого в качестве тестовых ВЭУ с известными рабочими характеристиками выбран модельный ряд из трёх ВЭУ (FL2500-80, FL2500-90 и FL2500-100 — все номинальной мощности 2,5 МВт и высотой башни 100 м) разработки немецкой компании Fuhrländer, укомплектованных штатными лопастями разной длины и, соответственно, с разными диаметрами ветроколёс (80, 90 и 100 м), обеспечивающими возможность работы данного модельного ряда ВЭУ в регионах с ветрами всех трёх классов. Серийное производство этих ВЭУ налажено в ряде стран, в том числе на Украине.

Выбранные ВЭУ с $D_{\text{вк}} = 80, 90$ и 100 м, при их размещении в узлах равносторонней треугольной сетки со стороной, равной $10D_{\text{вк}}$, обеспечивают съём мощности ветра с 1 км^2 поверхности земли до 4,51; 3,56 и 2,89 МВт, соответственно, что является одним из лучших показателей для современных ВЭУ.

Возрастание $K_{\text{иум}}$ ВЭУ с увеличением диаметра их ветроколёс и, соответственно, выработки ими электроэнергии проиллюстрировано на рис. 4а, б, в.

Размещение ВЭУ модельного ряда FL 2500 соответствующего ветрового класса по субъектам РФ проведена с учётом установленного в [12] распределения средних многолетних значений скоростей ветра на высоте 100 м (рис. 2). Определение экономического ВЭП проведено по рассчитанным для субъектов РФ значениям $K_{\text{иум}}$ ВЭУ соответствующего класса.

Определение экономического ветрового потенциала в работах [10–13] основывалось на введённом авторами крите-



•• Рис. 4. Территориальное распределение $K_{\text{иум}}$ ВЭУ FL с $D_{\text{вк}} = 80$ (а), 90 (б) и 100 м (в) с высотой башни 100 м

рии, в соответствии с которым ВЭУ считались экономически эффективными для региона, если себестоимость выработанной ими электроэнергии за установленной (20-летний) срок их службы не

При таких поправках в правовой базе ВЭС ограничения по масштабам и темпам ввода, определённые в [1], могли бы быть ослаблены и даже сняты. В противном случае всякие рассуждения об экономическом потенциале ВЭП, который реализуется суммарными мощностями ВЭС более 3,6 ГВт, теряют смысл

превышал себестоимости электроэнергии, выработанной традиционными тепловыми электростанциями на газе (наиболее экономичный источник электроэнергии в РФ) той же, что и ВЭУ, выработки с учётом стоимости топлива (газа), вновь построенными и введёнными одновременно с ВЭУ в том же регионе.

Экономический ВЭП региона определялся как сумма выработки определённых таким образом ВЭУ, размещённых на части территории региона, допускающей строительство и эксплуатацию ВЭС с учётом наличия сетевой и дорожно-транспортной инфраструктуры.

Авторы полагают, что в субъектах РФ с развитым земледелием размещение ВЭС возможно на всех посевных площа-



дах, данные о которых взяты из официальных изданий Росстата [14]. Основанием для этого являются очевидные соображения, согласно которым посевные площади обеспечены подъездными путями, в основном расположены вблизи мест достаточно плотного проживания населения, где, за редким исключением, имеется электросетевая инфраструктура и сбыт электроэнергии. А размещение ВЭУ на расстояниях порядка 1 км друг от друга не только не является помехой для сельскохозяйственных операций, но и может способствовать им (ранее в [13] было показано, что ряд ВЭУ вполне заменяет лесополосы по снегозадержанию).

В субъектах РФ с отсутствующим земледелием или с малой плотностью населения (Севера, Дальний Восток) из соображений сопоставимости с подходом [6–9], землеотвод под ВЭС принят равным 10 % от территории региона.

Результаты расчёта экономического ВЭП по методикам [6–13] и предложенной в данной статье приведены в табл. 2. Расхождение значений экономического ВЭП, полученных с использованием методики [6–9], [10–13] и предлагаемой в статье объясняется принципиальной разницей определения экономической эффективности ВЭУ, зависящей от законодательной базы экономической поддержки ВЭУ, повышенной площадью землеотвода под ВЭС и различиями их $K_{\text{иум}}$.

Величина экономического ВЭП, определённого по методикам [10–13] и предлагаемой, оказывается существенно выше оценённого в работах [6–9] и сопоставима (при оценке по методике [10–13]) и даже существенно (в 2,5 раза) превышает (по предлагаемой методике) современное потребление электроэнергии в России (потребление электроэнергии в Единой энергосистеме России в 2016 году соста-

вило, по данным АО «СО ЕЭС», 1027 млрд кВт·ч/год). Полученные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейшего развития понятия экономического потенциала ветровой энергии и определения его характеристик с целью возможностей его практического использования в отечественной ветроэнергетике.

В субъектах РФ с отсутствующим земледелием или с малой плотностью населения (Дальний Восток) из соображений сопоставимости с подходом [6–9], землеотвод под ВЭС принят равным 10 % от территории региона

Технологические ограничения масштабов использования ВЭС

Наиболее существенным ограничением масштабов использования ВЭС является установленное мировой практикой правило о непревышении ввода суммарных мощностей ВЭС более 20 % мощности существующей энергосистемы во избежание нарушения стабильности её работы и снижения качества электроэнергии.

Экономический ВЭП по данным разных источников

табл. 2

Наименование федерального округа (ФО)	Данные работ [6–9], млрд кВт·ч/год	Данные работ [10–13], млрд кВт·ч/год	Данные настоящей работы, млрд кВт·ч/год	Данные настоящей работы*, млрд кВт·ч/год
Центральный ФО	3,03	144,8	287,3	19,3
Северо-Западный ФО	17,30	90,2	161,0	11,1
Южный ФО (вкл. Северо-Кавказский ФО)	7,14	68,0	527,6	6,7
Приволжский ФО	9,45	120,4	1101,4	16,1
Уральский ФО	64,7	252,2	74,0	27,6
Сибирский ФО	60,5	20,8	353,8	14,9
Дальневосточный ФО	98,8	24,6	148,8	3,5
Россия в целом	261	721	2654	99,3

* Экономический ВЭП федеральных округов РФ с учётом технологических ограничений.

Известны примеры ряда стран ЕС (Дании, Португалии и др.), когда энергосистемы этих стран обеспечивали качественную выработку энергии и при больших (до 50 % и более) вкладах мощности ВЭС, но это обеспечивалось переброской избыточных мощностей ВЭС в соседние страны и высоким качеством электросетевого хозяйства в Европе. В целом же это ограничение практически в обязательном порядке учитывается при проектировании ВЭС за рубежом и должно учитываться в России, особенно с учётом снижения в последние десятилетия качества её электросетевого хозяйства.

Расчёт возможных с учётом этого ограничения объёмов ввода экономически эффективных ВЭУ по субъектам РФ до 2024 года рассчитан и приведён в последнем столбце табл. 2.

Расчёты основаны на данных Росстата об объёмах выработки и потребления электроэнергии по субъектам Российской Федерации за 2016 год [14] и планах развития российского электроэнергетического комплекса согласно «Энергетической стратегии 2035» [15].

Согласно [15] предусматривается опережающее развитие электроэнергетики для реализации масштабной электрификации страны и повышение электровооружённости труда в стране с ростом установленной мощности электростанций к 2035 году более чем на 1/3 и увеличением душевого потребления электроэнергии на 57 %.

При реализации [15] допустимое по общепринятому 20 %-му ограничению суммарное потребление электроэнергии ВЭС в России к 2035 году может достигать 99,3 млрд кВт·ч/год (до 7 % от суммарного потребления электроэнергии в стране), а соответствующая суммарная допустимая установленная мощность только сетевых ВЭС может составить 40 ГВт. Ещё около 5 ГВт ВЭС согласно [13] может быть эффективно использовано в изолированных зонах России.



Источник: блог «Домашко», <http://eco-domishko.blogspot.ru>

В заключение следует отметить большие возможности эффективного использования ВЭС гигаватной мощности для увеличения экспорта электроэнергии в сопредельные с Россией страны. Данная идея получила развитие в ходе совместной российско-китайской разработки в 2014–2015 годах уникального для мировой практики по масштабам и технологическому уровню проекта строительства и использования крупных ветроэлектрических станций суммарной мощностью до 50 ГВт (ГигаВЭС) на российских побережьях морей Северного Ледовитого и Тихого океанов с передачей электроэнергии в Китай [16].

В ходе исследования были установлены три больших района и в каждом районе два-три полигона площадью 15–20 тыс. км², достаточной для размещения ГигаВЭС мощностью 50 ГВт, из них: два полигона на полуострове Гыданский (Ямало-

Ненецкий АО) в районах с центрами в посёлках Гыда-Ямо и Антипаюта, три полигона на полуострове Таймыр (Долгано-Ненецкий АО) с центрами в посёлках Диксон, Караул и Сопкарга и два полигона на севере острова Сахалин в районах посёлков Охи — Рыбновска и Погиби — Чайво. Для них были спланированы маршруты оптимальных по протяжённости и географическому расположению ЛЭП по линиям электропередачи постоянного тока ультравысокого напряжения (до 1100 кВ) постоянного тока для

Следует отметить большие возможности эффективного использования ВЭС гигаватной мощности для увеличения экспорта электроэнергии в сопредельные с Россией страны

транспортировки электроэнергии от ГигаВЭС до границы с Китаем.

Согласно проведённым оценкам экономических показателей ГигаВЭС в выбранных районах, исходя из китайских (ввиду отсутствия российского опыта) расценок на строительство и обслуживание ГигаВЭС, резервирующих тепловых электрических станций (угольных либо газовых) и систем передачи их мощности до границы с Китаем, установлена достижимость себестоимости вырабатываемой ГигаВЭС электроэнергии менее 66 \$/МВт·ч при внутренней норме доходности проектов до 9–11 % и приемлемых сроках окупаемости.

Согласно результатам инициативных исследований авторов перспективным представляется увеличение экспорта электроэнергии ГигаВЭС, расположенных на Сахалине и его шельфе, в Японию, КНДР и Республику Корея на обоюдных выгодных энергетических и экономических условиях. Перспективным представляется также использование ГигаВЭС для увеличения мощности проектируемого Большого азиатского энергетического кольца, объединяющего энергосистемы России, Китая, Кореи, Монголии и Японии.

Высокоперспективным представляется также сотрудничество в ветроэнергетике России с Казахстаном, ряд районов которого вместе со степными районами южной Сибири обладают богатыми (свыше 100 млрд кВт·ч/год) ветровыми ресурсами, позволяющими реализовывать совместные проекты ГигаВЭС и эффективно использовать имеющуюся объединённую сетевую инфраструктуру для реализации их электроэнергии внутри России и Казахстана, для энергетического обеспечения «Нового шёлкового пути» и ряда совместных проектов стран БРИКС, а также её экспорта в страны Средней Азии, Китая и Индии. ●

1. Распоряжение Правительства РФ от 08.01.2009 №1-р «Об утверждении Основных направлений государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2024 года» (с изм. на 28.02.2017, внесён. Распоряжениями Правительства РФ №861-р от 28.05.2013; №1472-р от 28.07.2015; №2279-р от 10.11.2015; №850-р от 05.05.2016; №354-р от 28.02.2017).
2. Global Wind Energy Outlook 2016. Green Peace, 2017.
3. Красовский Н.В. Генеральный план электрификации СССР: Ветровые энергоресурсы и перспективы их использования. Т. 1. — М., 1932. С. 440–464.
4. Симонов Н.В. Запасы энергии ветра Казахстана: Материалы для изучения естественных производительных сил СССР — Л., 1927. №62.
5. Wind Force 12 & Blueprint to Achieve 12% of the World's Electricity from Wind Power by 2020. Green Peace, 2003.
6. Безруких П.П., Арбузов Ю.Д., Виссарионов В.И. и др. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в РФ. — М.: Наука, 2002.
7. Безруких П.П. Научно-техническое и методологическое обоснование ресурсов и направлений использования ВИЭ [Текст]: Дисс. докт. техн. наук. по спец. 05.14.08; защищ. 30.09.2003; утв. 16.01.2004. — М.: ВИАЭСХ, 2003. 268 с.
8. Концепция использования ветровой энергии в России / Под ред. Безруких П.П. Комитет РосСНИО по проблемам использования ВИЭ. — М., 2005.
9. Безруких П.П., Дегтярёв В.В., Елистратов В.В., Панцаха Е.С., Петров Э.С., Пузаков В.Н., Сидоренко Г.И., Тарнижевский Б.В., Шпак А.А., Ямпольский А.А. Справочник по ресурсам ВИЭ России и местным видам топлива. — М.: ИАЦ «Энергия», 2007.
10. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. — М.: НИЦ «Атмограф», 2008.
11. Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Y.I., Walther R., Willems P. Prospects of development of Renewable Energy Sources in Russia. Moscow. Research & Information Center "Atmograph". 2010.
12. Николаев В.Г. Ресурсное и технико-экономическое обоснование широкомасштабного развития и использования ветроэнергетики в России. — М.: НИЦ «Атмограф», 2011.
13. Николаев В.Г. Методология ресурсного и технико-экономического обоснования использования ветроэнергетических установок [Текст]: Дисс. докт. техн. наук. по спец. 05.14.08; защищ. 24.01.2012; утв. 28.01.2013. — М.: ВИАЭСХ, 2012. 305 с.
14. Регионы России. Социально-экономические показатели 2016 года: Стат. сб. — М.: Росстат, 2017.
15. Проект энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года (ред. от 01.02.2017). — М.: Министерство энергетики Российской Федерации, 2017.
16. Кожуховский И.С., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И., Николаев В.Г., Николаев В.В. Результаты российско-китайских исследований перспектив освоения ветроэнергетических ресурсов российского Заполярья и Дальнего Востока для совместного производства и использования электроэнергии // Энергетик, 2017. №1. С. 3–7.

References — see p. 95.

On the possible and feasible total installed capacity of wind power stations in Russia. Pages 88–94.

Yu.I. Kudryashov, V.G. Nikolaev, Research & Information Center “Atmograph”

1. *Rasporjazhenie Pravitel'stva RF ot 08.01.2009 No. 1-r* “Ob utverzhenii Osnovnykh napravlenij gosudarstvennoj politiki v sfere povyshenija jenergeticheskoy jeffektivnosti jelektrojenergetiki na osnove ispol'zovaniya vozobnovljajemykh istochnikov jenerгии na period do 2024 goda” [Order of the Government of the Russia of January 8, 2009 No. 1-r “On approval of the main directions of the state policy in the sphere of increasing the energy efficiency of the electric power industry on the basis of the use of renewable energy sources for the period until 2024”] (rev. on February 28, 2017, by the orders of the Government of the Russia No. 861-r on May 28, 2013; No. 1472-r on July 28, 2015; No. 2279-r on November 10, 2015; No. 850-r on May 5, 2016; No. 354-r on February 28, 2017).
2. Global Wind Energy Outlook 2016. GWEC. *Green Peace*. Brussels. 2017.
3. Krasovskij N.V. *General'nyj plan jelektrifikacii SSSR: Vetrovyje jenergoresursy i perspektivy ih ispol'zovaniya* [General plan for the electrification of the USSR: Wind energy resources and prospects for their use]. Vol. 1. Moscow. 1932. Pp. 440–464.
4. Simonov N.V. *Zapasy jenerгии vetra Kazahstana: Materialy dlja izuchenija estestvennykh proizvoditel'nyh sil SSSR* [Wind energy reserves of Kazakhstan: Materials for studying the natural productive forces of the USSR]. Leningrad. 1927. No. 62.
5. Wind Force 12 & Blueprint to Achieve 12% of the World's Electricity from Wind Power by 2020. *Green Peace*. 2003.
6. Bezrukih P.P., Arbuzov Ju.D., Vissarionov V.I. et al. *Resursy i jeffektivnost' ispol'zovaniya vozobnovljajemykh istochnikov jenerгии v Rossii* [Resources and efficiency of renewable energy sources in Russia]. Moscow. *Nauka* [“The science” Publishers]. 2002.
7. Bezrukih P.P. *Nauchno-tehnicheskoe i metodologicheskoe obosnovanie resursov i napravlenij ispol'zovaniya vozobnovljajemykh istochnikov jenerгии* [Scientific, technical and methodological substantiation of resources and directions for the use of renewable energy sources: The thesis of the Doctor of Technical Sciences in spec. No. 05.14.08]; was prot. on September 30, 2003; was appr. on January 16, 2004. Moscow. *Federal Scientific Agro-Engineering Center “VIM”*. 2003. 268 p.
8. *Koncepcija ispol'zovaniya vetrovoj jenerгии v Rossii* [The concept of using wind energy in Russia] / Edited by Bezrukih P.P. *Komitete RosSNIO po problemam ispol'zovaniya VJe* [Committee of the Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations on Problems of the Use of Renewable Energy Sources]. Moscow. 2005.
9. Bezrukih P.P., Degtjar'ov V.V., Elistratov V.V., Panchava E.S., Petrov Je.S., Puzakov V.N., Sidorenko G.I., Tarnizhevskij B.V., Shpak A.A., Jampol'skij A.A. *Spravochnik po resursam VJe Rossii i mestnym vidam topliva* [Handbook on Renewable Energy Resources in Russia and Local Fuels]. Moscow. *IAC “Jenergija”* [Information and Analytical Center “The energy”]. 2007.
10. Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Ju.I. *Kadastr vetrojenergeticheskikh resursov Rossii i metodicheskie osnovy ih opredelenija* [Cadastre of wind power resources of Russia and methodical bases of their definition]. Moscow. *NITS “Atmograf”* [Research & Information Center “Atmograph”]. 2008.
11. Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Y.I., Walther R., Willems P. *Prospects of development of Renewable Energy Sources in Russia*. Moscow. *RIC “Atmograph”*. 2010.
12. Nikolaev V.G. *Resursnoe i tehniko-jekonomicheskoe obosnovanie širokomasshtabnogo razvitija i ispol'zovaniya vetrojenergetiki v Rossii* [Resource and feasibility rationale of large-scale development and use of wind power in Russia]. Moscow. *NITS “Atmograf”* [RIC “Atmograph”]. 2011.
13. Nikolaev V.G. *Metodologija resursnogo i tehniko-jekonomicheskogo obosnovaniya ispol'zovaniya vetrojenergeticheskikh ustanovok* [Methodology of resource and feasibility study of use of wind power plants]: The thesis of the Doctor of Technical Sciences in spec. No. 05.14.08; was prot. on January 24, 2012; was appr. on January 28, 2013. Moscow. *Federal Scientific Agro-Engineering Center “VIM”*. 2012. 305 p.
14. *Regiony Rossii. Social'no-jekonomicheskie pokazateli 2016 goda: Stat. sb.* [Regions of Russia. Social and economic indicators in 2016: Statistical compil.]. Moscow. *Rosstat*. 2017.
15. *Proekt jenergeticheskoy strategii RF na period do 2035 goda* [Draft Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035] (rev. on February 1, 2017).
16. Kozhuhovskij I.S., Ganaga S.V., Kudryashov Ju.I., Nikolaev V.G., Nikolaev V.V. *Rezul'taty rossijsko-kitajskih issledovanij perspektiv osvoenija vetrojenergeticheskikh resursov rossijskogo Zapoljar'ja i Dal'nego Vostoka dlja sovmestnogo proizvodstva i ispol'zovaniya jelektrojenerгии* [The results of Russian-Chinese studies of the prospects for the development of wind power resources of the Russian Far North and the Far East for joint production and use of electricity]. *Jenergetik* [“Energetik” magazine]. 2017. No. 1. Pp. 3–7.