

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>

УДК 621.311

Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь

Ю. С. Петруша¹⁾, Н. А. Попкова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Использование ветрогенераторов – одна из главных альтернатив традиционным технологиям производства электроэнергии. Исключение выбросов продуктов горения на ТЭС, работающих на углеводородном топливе, а также топливной составляющей себестоимости выработки электроэнергии делает технологию весьма привлекательной. Однако жесткость требований функционирования в составе электроэнергетических систем, низкая плотность потока первичного энергоресурса и его неуправляемость, низкий коэффициент использования установленной мощности, ограниченный срок службы, останов при шквалистых порывах ветра и гололедообразовании, большие площади отчуждаемых земель, шумовое воздействие и инфразвуковые вибрации, проблемы утилизации крупногабаритных элементов конструкции и фундаментов требуют всестороннего анализа условий их применения. Анализ природно-климатических условий Беларуси, несмотря на отсутствие пустынных мест и ограничения на строительство сверхвысоких сооружений, свидетельствует о том, что они благоприятны для развития ветроэнергетики. Принципиальной задачей является выбор площадки размещения ветроэнергетических установок с учетом требований охраны окружающей среды, температурно-влажностного атмосферного режима, рельефа местности и геологических особенностей места расположения. Результаты расчетов параметров ветрового потока показали предпочтительность совместного применения функций Вейбулла и Рэля, дающих доверительную область аппроксимации функции скорости ветра, а особенности рельефа позволяют рассчитывать на получение более высоких значений коэффициента использования установленной мощности. Очевидной перспективой ветровых станций следует считать развитие распределенной генерации при насыщении электрических сетей технологиями Smart Grid, что позволит предоставить новые возможности потребителям и уйти от монополии мощных электростанций и груза базовых издержек большой энергетики.

Ключевые слова: ветроэнергетика, надежность, экологичность, выбор площадок размещения, распределение Вейбулла и Рэля, коэффициент использования установленной мощности

Для цитирования: Петруша, Ю. С. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь / Ю. С. Петруша, Н. А. Попкова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>

Адрес для переписки

Петруша Юрий Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

Address for correspondence

Petrusha Uriy S.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus

U. S. Petrusha¹⁾, N. A. Papkova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The use of wind turbines to create wind energy is one of the main alternatives to the traditional technologies of power generation. The exclusion of combustion products emissions at thermal power plants that operate on hydrocarbon fuel, as well as the exclusion of the fuel component of the cost of electricity generation makes the wind power technology very attractive. However, the rigor of the operation requirements of wind turbines as part of power systems, low density of the flow of primary energy source and the lack of control of it, low utilization of installed capacity, limited operating life, shutdowns in the conditions of squally gusts of wind and ice formation, large areas of alienated land, the impact of noise and infrasonic vibrations and the problems of utilization of large-size structural elements and foundations require a comprehensive analysis of conditions of wind turbines application. Despite the absence of desert areas and of restrictions on the construction of ultra-high structures the analysis of natural and climatic conditions of Belarus demonstrates favorable natural and landscape conditions for the development of wind power generation. The principal task is to choose the location of wind power plants with due regard to environmental requirements, temperature and humidity conditions, terrain and geological features of the location. The results of calculations of the wind flow conditions showed the preference for the joint application of the Weibull and Rayleigh functions that provide the confidence interval of the approximation of the wind speed function, while the terrain specific features make it possible to expect to obtain higher values of the established capacity utilization factor. The development of a distributed energy generation accompanied by Smart Grid technology wide use over electric networks (which would provide new opportunities for consumers and make it possible to eliminate the monopoly of powerful power plants and to reduce burden of basic costs of big power production) ought to be considered as obvious prospect of wind power plants application.

Keywords: wind power production, reliability, environmental compatibility, site selection, Weibull and Rayleigh distribution, established capacity utilization factor

For citation: Petrusha U. S., Papkova N. A. (2019) The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2), 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134> (in Russian)

Введение

Использование ветрогенераторов – одна из главных альтернатив традиционным технологиям производства электроэнергии. Кажущаяся простота и доступность природного энергоресурса ограничиваются жесткостью требований функционирования в составе электроэнергетических систем. Фундаментальными недостатками использования энергии ветра являются низкая плотность потока первичного энергоресурса и его неуправляемость. Экологическими особенностями следует считать существенно большие площади отчуждаемых земель, шумовое воздействие, инфразвуковые вибрации, а также проблему утилизации крупногабаритных элементов конструкции и фундаментов.

Безусловное преимущество ветряных электростанций (ВЭС) по сравнению с традиционными – исключение выбросов продуктов горения на ТЭС,

работающих на углеводородном топливе, а также исключение топливной составляющей себестоимости выработки электроэнергии. По сравнению с АЭС ветроэнергетика не демонстрирует явных преимуществ.

В Республике Беларусь развитие технологий выработки электроэнергии на основе возобновляемых источников определяется стратегией развития национальной энергетики [1]. Ввод и использование альтернативных генерирующих источников регламентируется законом [2]. Целесообразность применения ветрогенераторов является предметом исследований и дискуссий.

Широкое распространение ВЭС требует анализа приемлемости географических и климатических условий, выбора наиболее целесообразных технических решений и параметров отдельных ВЭС и ветропарков в целом, учета условий и результатов эксплуатации введенных ВЭС и проверки методик расчета конструктивных и режимных параметров.

Применение ветроэнергетики в мировой энергетике и развитие технологий производства и эксплуатации пока не дали ответов на ряд фундаментальных и технологических ограничений в использовании ветряных электростанций. Упомянем некоторые из них:

- вынужденность места расположения;
 - ограниченный срок службы (20–25 лет);
 - низкий коэффициент использования установленной мощности (0,25–0,30);
 - недостаточная надежность покрытия графика нагрузки (наиболее опасными являются порывы ветра, провоцирующие останов всего ветропарка), приводящая к нестабильности работы энергосистемы;
 - необходимость дополнительной электрической сети по сбору электроэнергии;
 - гололедообразование как наиболее неблагоприятное явление в климатических условиях Беларуси.
- Было бы ошибкой считать работу ВЭС экологически безупречной:
- площадь ветропарка более чем в 100 раз превышает площадь отчуждения для традиционных ТЭС на единицу установленной мощности, а с учетом различия коэффициента использования установленной мощности цифра увеличивается еще в разы;
 - шум лопастей распространяется существенно дальше (до 2 км) принятых норм удаления ВЭС от мест проживания (300–500 м), вызывая тем самым перманентный стресс [3] и вероятность ухудшения здоровья людей;
 - мало изучена проблема генерации, распространения и влияния инфранизких вибраций и визуального воздействия на психику движущихся элементов исполинских объектов;
 - не решены вопросы эффективной утилизации оборудования (лопасти, мачта) и демонтажа фундаментов (тысячи тонн высокопрочного армированного бетона каждый).

Практика применения показывает:

- габариты и максимальные единичные мощности ВЭС подбираются к своим пределам (150–180 м, 10–12 МВт) из-за ограничений монтажа, прочности материалов и экономической целесообразности;
- наилучшая производительность получается при расположении в прибрежном мелководье, но требует вдвое больших капитальных вложений;
- уменьшение централизованного субсидирования в странах Европы снижает темпы роста мощностей ВЭС и ужесточает требования конкурентоспособности;
- оплата повышающего тарифа на покупку коммерческой ветровой электроэнергии в 2–3 раза превышает себестоимость ее получения на ВЭС Белэнерго.

Очевидной перспективой ветровых станций следует считать развитие распределенной генерации при насыщении электрических сетей технологиями Smart Grid как направления предоставления новых возможностей потребителям и уход от монополии мощных электростанций и груза базовых издержек большой энергетики.

Постановка задачи

Наиболее привлекательным в использовании ветрогенерации является отсутствие топливной составляющей в себестоимости производства электроэнергии. И значимость этого фактора будет возрастать. Целесообразность и масштабы использования ВЭС в Беларуси следует соотносить с такими показателями, как:

- приемлемость географических и климатических условий;
- анализ условий и результатов эксплуатации введенных ВЭС;
- экономические оценки;
- выбор наиболее целесообразных технических решений и параметров отдельных ВЭС и ветропарков в целом;
- проверка методик расчета конструктивных и режимных параметров.

Главная задача – освоение технологий организационного и технического характера для готовности широкомасштабного использования при возникновении благоприятных условий, учитывая природно-климатический потенциал страны.

По данным Государственного кадастра возобновляемых источников энергии [4], в Беларуси на конец 2017 г. работали 47 ветроэнергетических установок (ВЭУ) общей мощностью 84 МВт. Среднегодовая скорость ветра на территории страны не превышает 4,4 м/с, однако в отдельных районах, расположенных на холмах Минской, Оршанской и Городокской возвышенностей, наблюдается скорость ветра от 5,2 до 5,7 м/с на высоте 80–100 м [5], что является оптимальным для ВЭУ большой мощности.

Следует отметить, что, несмотря на обширность географического пространства, в Беларуси нет пустынных территорий, а строительство сверхвысоких объектов имеет ограничение по использованию воздушного пространства.

Успешное преобразование кинетической энергии ветрового потока в электрическую, кроме наличия подходящего ветрового потока, требует тщательного выбора площадки для строительства с учетом требований охраны окружающей среды, температурно-влажностного атмосферного режима, рельефа местности и геологических особенностей места расположения [5–7]. Выбор площадки для строительства будущего объекта – один из важнейших этапов исследовательских работ. Место установки ВЭС должно отвечать требованиям в области охраны окружающей среды с учетом ближайших и отдаленных экологических, экономических, социальных и иных последствий эксплуатации ВЭУ, с соблюдением приоритета сохранения благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия, рационального использования и воспроизводства природных ресурсов [8].

Первоочередными факторами при выборе площадки являются параметры ветрового потока. Для определения мест наиболее рационального размещения ВЭУ организуются измерения параметров ветра – средней максимальной скорости, направления ветра, повторяемости направления ветров (розы ветров). По результатам полученных параметров ветра или расчетным климатическим данным о них определяется ветроэнергетический потенциал (ВЭП) предполагаемой площадки размещения ВЭУ, оценивается ожидаемый выход электрической энергии, даются рекомендации по выбору ВЭУ [9]. На практике для определения ВЭП используют данные с опорных метеостанций, располагающихся на расстоянии до 40 км от площадки. Затем осуществляется пересчет для выбранной площадки с учетом высоты над уровнем моря и открытости местности.

Необходимо учитывать влияние рельефа местности на энергетические характеристики будущей ВЭУ. Характер поверхности размещения ВЭУ определяет возможное падение скорости ветрового потока, проходящего над поверхностью земли, а также изменение направления потока и возникновение касательных напряжений. При рассмотрении конкретной предполагаемой площадки размещения объекта ветроэнергетики нужно учитывать эффект влияния на поток изменений высоты рельефа вокруг площадки, например 5%-е увеличение высоты в ландшафте может иметь 5%-е воздействие на среднюю скорость ветра на уровне оси ветрогенератора, что приведет к 15%-му увеличению доступной мощности [10]. С учетом вышесказанного предпочтительным местом для размещения ВЭУ являются плоские вершины, а также местность, в ближайшем окружении которой отсутствуют высокие препятствия.

Характер грунта предполагаемой площадки влияет на фундамент будущей установки. От прочностных характеристик грунта зависят размер фундамента и глубина его заложения. Минимальная удаленность от жилых построек выбирается с учетом предельной величины допустимой акустической нагрузки от ветроагрегатов, которая не должна превышать для жилых районов 50 дБ днем и 35 дБ ночью [11].

Для оценки ветрового режима при отсутствии метеорологических станций в непосредственной близости от места предполагаемой установки ВЭУ прибегают к построению аналитической (теоретической) кривой повторяемости скорости ветра. Самыми распространенными для аппроксимации функции скорости ветра $f(v)$ в настоящее время являются функции Вейбулла и Рэля. При этом из простых аналитических распределений скоростей ветра наиболее точные результаты в диапазоне скоростей 4–20 м/с получаются при использовании двухпараметрического распределения Вейбулла [11]

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{A} \right)^k \right], \quad (1)$$

где k – параметр формы в распределении Вейбулла, характеризует крутизну распределения, индекс; A – масштабный параметр в распределении Вейбулла, имеющий размерность скорости, характеризует масштаб изменения функции по оси скоростей [7]; $\exp(x)$ – экспоненциальная функция.

При этом полученные результаты имеют тенденцию к занижению по сравнению с экспериментальными данными.

Функция Рэля имеет более сложный характер, требует дополнительных исходных данных и менее распространена. Рэлеевская плотность распределения вероятностей записывается в следующем виде:

$$f(v) = \frac{k}{\sigma^2} \exp \left[- \frac{v^2}{2\sigma^2} \right], \quad (2)$$

где σ – параметр масштаба,

$$\sigma = \frac{v_{\text{ср}}}{\left(\frac{\pi}{2} \right)^{1/2}}, \quad (3)$$

$v_{\text{ср}}$ – среднегодовая скорость ветра, м/с.

Исходными данными для каждой площадки являются значения коэффициентов A , k и $v_{\text{ср}}$, полученные с использованием базы данных и программного обеспечения WindPro. Для их пересчета с учетом высоты применяется специальный коэффициент пропорциональности

$$K = \frac{\text{Ln} \left(\frac{h_{\text{мачты}}}{z_0} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{h_{\text{изм}}}{z_0} \right)}, \quad (4)$$

где $h_{\text{мачты}}$ – высота мачты ВЭУ, м; $h_{\text{изм}}$ – то же измерений, $h_{\text{изм}} = 80$ м; z_0 – размер шероховатости, м.

Территорию Республики Беларусь по особенностям рельефа можно отнести к четырем классам, каждый из которых характеризуется своими элементами шероховатости [5, с. 10]. Краткая характеристика каждого класса приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика классов шероховатости территорий Республики Беларусь
Surface roughness classes characteristic of the territory of the Republic of Belarus

Класс шероховатости	Характерная особенность	z_0 , м
0	Поверхность водохранилищ и озер	0,0002
1	Открытые области с небольшими лесозащитными полосами. Могут быть фермерские постройки, отдельно растущие деревья или кустарники	0,0300
2	Территория характеризуется большими открытыми областями между лесозащитными полосами, придающими ландшафту открытый внешний вид. Территория может быть ровной или слегка холмистой, на ней может быть множество деревьев и зданий	0,1000
3	Территории с городскими застройками, лесом или сельскохозяйственные земли с многочисленными лесозащитными полосами	0,4000

Для условий площадки в районе д. Яновичи (Новогрудский район) значения параметров следующие: $A = 7,28$ м/с; $k = 2,41$; $v_{cp} = 6,37$ м/с; высота 80 и 67 м. Результаты расчета распределения скорости ветра приведены на рис. 1 и в табл. 2.

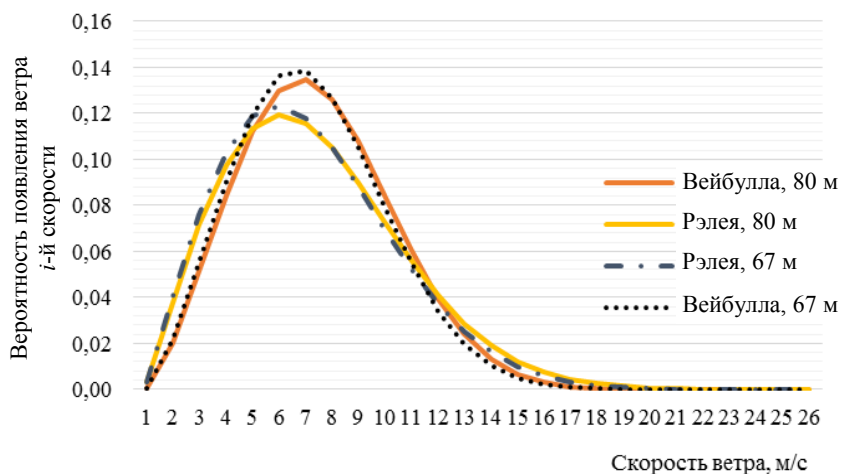


Рис. 1. Распределение скорости ветра на площадке

Fig. 1. The wind velocity distribution for the site

Как видно из табл. 2, ветрогенератор будет работать преимущественно в интервале скоростей ветра от 4 до 9 м/с. Наибольшая вероятность появления ветра со скоростью 6 м/с на высоте 67 м и 8 м/с на высоте 80 м. Данные показатели превосходят средние значения для стран с развитой ветроэнергетикой, таких как Германия и Нидерланды [12].

Таблица 2

**Результаты расчета распределения скорости ветра
 для площадки в районе д. Яновичи (Новогрудский район)**

**The results of the calculations of wind velocity distribution
 for the site near Yanovichy village (Novohrudok region)**

Скорость ветра, м/с	Дифференциальная повторяемость <i>i</i> -й скорости ветра (80 м)		Дифференциальная повторяемость <i>i</i> -й скорости ветра (67 м)	
	Вейбулла	Рэля	Вейбулла	Рэля
0	0,00066272074	0,0032355278	0,00071940773	0,00346179532
1	0,01998247320	0,0379695020	0,02167552680	0,04058932600
2	0,05121933398	0,0716550080	0,05538787799	0,07628632300
3	0,08428414523	0,0975679620	0,09057171515	0,10316823900
4	0,11236134176	0,1136064960	0,11953028869	0,11898605500
5	0,13008031866	0,1193048620	0,13640390598	0,12342996900
6	0,13457288382	0,1157103270	0,13844829115	0,11792873400
7	0,12610843929	0,1049637690	0,12664581610	0,10509630100
8	0,10777405859	0,0897304070	0,10508377263	0,08802450900
9	0,08427648099	0,0726420690	0,07932837712	0,06962794900
10	0,06038424453	0,0558765410	0,05454438309	0,05218813700
11	0,03965304210	0,0409349040	0,03415826781	0,03715338600
12	0,02385463371	0,0286115700	0,01946998318	0,02516657600
13	0,01313494815	0,0191051710	0,01008957265	0,01624151800
14	0,00661204280	0,0122003000	0,00474692309	0,00999666000
15	0,00303883051	0,0074568670	0,00202442873	0,00587306800
16	0,00127321127	0,0043651140	0,00078129304	0,00329567100
17	0,00048556124	0,0024486270	0,00027238743	0,00176736400
18	0,00016828411	0,0013168380	0,00008563377	0,00090616300
19	0,00005291665	0,0006791830	0,00002423274	0,00044437200
20	0,00001507235	0,0003360660	0,00000616129	0,00020849100
21	0,00000388238	0,0001595750	0,00000140497	9,36143E-05
22	0,00000090289	7,27284E-05	0,00000028682	4,0236E-05
23	0,00000018927	3,18225E-05	0,00000005232	1,65574E-05
24	0,00000003571	1,337E-05	0,00000000852	6,52457E-06
25	0,00000000605	5,3946E-06	0,00000000123	2,46241E-06
Проверка	1	1	1	1

Годовая выработка электроэнергии

$$\mathcal{E}_{\text{выр.год}} = \sum_{i=0}^{25} (p(v_i)P_{\text{ВЭУ}}(v_i)) \cdot 8760, \quad (5)$$

где $\mathcal{E}_{\text{выр.год}}$ – предполагаемая вырабатываемая турбиной за год мощность, кВт·ч; v_i – скорость ветра, м/с; $p(v_i)$ – дифференциальная повторяемость i -й скорости ветра; $P_{\text{ВЭУ}}(v_i)$ – мощность, вырабатываемая турбиной при данной скорости ветра.

Для характеристики технико-экономического совершенства ВЭУ воспользуемся коэффициентом использования установленной мощности ветроустановки $K_{\text{уст}}$. Данный параметр представляет собой отношение действительной выработки электроэнергии за какой-либо период времени (в статье рассмотрен год (8760 ч)) к максимально возможной выработке энергии [9]. Под максимально возможной выработкой электроэнергии принимается работа ВЭУ за рассматриваемый период с номинальной мощностью.

Результаты расчета выработки электрической энергии ветровыми турбинами различных конструкций мощностью 2 МВт приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Предполагаемая выработка электроэнергии
ветроэнергетической установкой мощностью 2 МВт
The estimated power generation by the wind turbines with a capacity of 2 MW**

Производитель	Высота, м	Диаметр ветроколеса, м	Выработка электрической энергии, кВт·ч		Коэффициент использования установленной мощности $K_{\text{уст}}$
			по Вейбуллу	по Рэлею	
Bonus	70	76	3833283,337	3533142,518	0,22735
Acciona	70	77	37572995,050	2877426,738	0,24687
Acciona	90	82	4959827,930	3943533,870	0,33831
Ecotecnia	90	80	4475920,040	3723931,032	0,28104
Fuhrlander	100	80	4872948,883	346885,077	0,23963
Gamesa	100	97	5689022,650	5463797,540	0,35159
Gamesa	120	114	7357492,340	6887328,497	0,44319
Vestas	120	104	6579307,943	60302260,019	0,38907

Таким образом, анализ результатов расчетов подтвердил предпочтительность совместного применения функций Вейбулла и Рэлея, а особенности ландшафта позволяют получить более высокие значения коэффициента использования установленной мощности по сравнению со среднестатистическими.

ВЫВОДЫ

1. Развитие ветроэнергетики следует соотносить с анализом уровня надежности работы ветряных электростанций – неуправляемостью потока

первичного энергоресурса, низким коэффициентом использования установленной мощности, остановом генератора при шквалистом ветре и обледенении лопастей.

2. Необходимость строительства электрической сети по сбору генерации и срок службы в пределах 25 лет требуют комплексного подхода при проведении технико-экономического обоснования, а географическая удаленность установок – дополнительных издержек на обслуживание и ремонт.

3. Экологическими особенностями следует считать неконтролируемое шумовое воздействие и инфразвуковые вибрации, а также проблему утилизации крупногабаритных элементов конструкции и фундаментов.

4. Природно-климатические условия Беларуси позволяют получить достаточные ветровые потоки на площадках с учетом ограничений на строительство сверхвысоких объектов.

5. Анализ результатов расчета параметров ветрового потока показал безусловную предпочтительность совместного применения функций Вейбулла и Рэля, дающих доверительную область аппроксимации функции скорости ветра.

6. Ландшафтные характеристики поверхности и отсутствие преград естественного и искусственного происхождения позволяют получить значения коэффициента использования установленной мощности ветряных электростанций от 35 до 44 %.

7. Наиболее вероятной перспективой ветровых станций следует считать развитие распределенной генерации при насыщении электрических сетей технологиями Smart Grid и уходе от монополии мощных электростанций и груза базовых издержек большой энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития энергетического потенциала Республики Беларусь [Электронный ресурс]: постановление Министерства энергетики Республики Беларусь, 9 августа 2010 г., № 1180 // Электроэнергетический Совет Содружества Независимых Государств. Режим доступа: <https://bit.ly/2srBTyM>. Дата доступа: 12.04.2018.
2. О возобновляемых источниках энергии [Электронный ресурс]: Закон Республики Беларусь от 27.12.2010 № 204-3 // Законодательство Республики Беларусь. Режим доступа: <http://pravo.newsby.org/belarus/zakon0/z312.htm>. Дата доступа: 12.04.2018.
3. Pierpont, N. Wind Turbine Syndrome: a Report on a Natural Experiment / N. Pierpont. Santa Fe: K-Selected Books, 2009. 295 p.
4. Государственный кадастр возобновляемых источников энергии Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Режим доступа: http://minpriroda.gov.by/ru/new_url_19948904-ru/. Дата доступа: 12.04.2018.
5. Справочник по климату Беларуси / Государственный комитет по гидрометеорологии Республики Беларусь, Республиканский гидрометеоцентр. Минск: БелНИЦ «Экология», 2003. Ч. 4: Ветер. Атмосферное давление. 124 с.
6. Wind Energy Council. Global Wind Figures [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gwec.net>. Дата доступа: 25.11.2017.
7. Дебиев, М. В. Системная классификация факторов, определяющих выбор вариантов размещения объектов ветроэнергетики / М. В. Дебиев, Г. А. Попов // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 2. С. 15–22.

8. Охрана окружающей среды и природопользование. Правила размещения и проектирования ветроэнергетических установок: ТКП 17.02-02–2010. Введ. 01.07.2010. Минск: Минприроды, 2010. 20 с.
9. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорологическая деятельность. Порядок проведения измерений параметров ветра и использования полученных данных при планировании размещения ветроэнергетических установок: ТКП 17.10-33–2011. Введ. 30.06.2011. Минск: Минприроды, 2010. 20 с.
10. Кодекс Республики Беларусь о Земле, 23 июля 2008 г., с изм. и доп. // Эталон-Беларусь [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Республики Беларусь. Минск, 2014. Режим доступа: http://kodeksy-by.com/kodeks_rb_o_zemle.htm. Дата доступа: 12.04.2018.
11. Квитко, А. В. Характеристики ветра, особенности расчета ресурса и экономической эффективности ветровой энергетики / А. В. Квитко, А. О. Хицкова // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 97. С. 359–374.
12. Key World Energy Statistics 2016 [Electronic Resource] / International Energy Agency. Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/331140984/Energy-Statistics-2016>. Дата доступа: 12.10.2017.

Поступила 04.07.2018 Подписана в печать 11.09.2018 Опубликована онлайн 29.03.2019

REFERENCES

1. *Strategy of Development of Energy Potential of the Republic of Belarus: Resolution of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus*, 9 August 2010, No 1180. Available at: <https://bit.ly/2srBTyM>. (Accessed 12 April 2018) (in Russian).
2. *Renewable Energy Sources: Law of the Republic of Belarus*, 27 December 2010, No 204. Available at: <http://pravo.newsby.org/belarus/zakon0/z312.htm>. (Accessed 12 April 2018) (in Russian).
3. Pierpont N. (2009) *Wind Turbine Syndrome: a Report on a Natural Experiment*. Santa Fe, K-Selected Books. 295.
4. *State Cadastre of Renewable Energy Sources of the Republic of Belarus*. Available at: http://minpriroda.gov.by/ru/new_url_19948904-ru/. (Accessed 12 April 2018) (in Russian).
5. Gol'berg M. A. (ed.) (2003) *Reference Book on the Climate of Belarus. Part 4. Wind. Atmosphere Pressure*. Minsk, BelNIC "Ecology". 124 (in Russian).
6. *Wind Energy Council. Global Wind Figures*. Available at: <http://www.gwec.net>. (Accessed 25 November 2017.)
7. Debiev M. V., Popov G. A. (2011) System Classification of Factors Determining the Choice of Options for Placing of Wind Power Facilities. *Vestnik Astrakhanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Ser.: Upravlenie, Vychislitel'naya Tekhnika i Informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Ser.: Management, Computer Science and Informatics*, (2), 15–22 (in Russian).
8. ТКП 17.02-02–2010. *Environmental Protection and Nature Management. Rules of Placement and Design of Wind Power Plants*. Minsk, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2010. 20 (in Russian).
9. ТКП 17.10-33–2011. *Environmental Protection and Nature Management. Hydrometeorological Activity. The Procedure for the Measurement of Wind Parameters and the Use of the Data Obtained when Planning the Placement of Wind Power Plants*. Minsk, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2010. 20 (in Russian).
10. *Land Code of the Republic of Belarus*, 23 July 2008. Available at: http://kodeksy-by.com/kodeks_rb_o_zemle.htm. (Accessed 12 April 2018) (in Russian).
11. Kvitko A. V., Khitskova A. O. (2014) Characteristics of Wind, Specific Features of Calculation of Resource and Economic Efficiency of Wind Energy. *Nauchnyi Zhurnal KubSAU = Scientific Journal of KubSAU*, (97), 359–374 (in Russian).
12. International Energy Agency (2016) *Key World Energy Statistics 2016*. Available at: <http://www.iea.org>. (Accessed 12 October 2017).

Received: 4 July 2018

Accepted: 11 September 2018

Published online: 29 March 2019