

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 620.9

МУРАВЛЕВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСАНДРОВНА¹

E-mail: katya.muravleva@gmail.com

РУДОБАШТА СТАНИСЛАВ ПАВЛОВИЧ, докт. техн. наук, профессор¹

E-mail: rudobashta@mail.ru

JERRY HUDGINS, профессор²

E-mail: jhudgins2@unl.edu

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

² Университет Небраска – Линкольн, 209N Инженерный центр имени Скотта, Линкольн, Небраска 68588-0511, США

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФЕРМЕРСКИХ ХОЗЯЙСТВ

Ветроэнергетические установки малой мощности (5-10 кВт) пока не нашли должного применения в сельском хозяйстве на территории России. Это объясняется низкой осведомленностью населения об альтернативных источниках энергии, отсутствием информации о возможности применения установок в фермерском хозяйстве, отсутствием точных схем выбора оборудования и примеров применения установок и рекомендаций по их выбору. Целью исследования являлось определение наиболее подходящих технических параметров установки (установленная мощность и высота расположения ветроколеса) для фермерских хозяйств в России. По результатам исследования и проведенным расчетам был составлен график, которым можно руководствоваться при выборе ветровой энергоустановки малой мощности в регионах со среднегодовой скоростью ветра от 3 до 7,2 м/с. Показано, что в целом по стране наиболее подходящими для фермерских хозяйств России являются ветроустановки мощностью 6-10 кВт с высотой расположения ветроколеса на уровне 18...30 м. Пороговым значением скорости ветра, при котором производство энергии превышает ее потребление, чаще всего является 4...6 м/с. Установлено, что только 21% из проанализированных регионов страны имеет среднегодовую скорость ветра, превышающую это значение.

Ключевые слова: выбор ветровой электроустановки, электроустановки малой мощности, автономное электроснабжение, фермерское хозяйство.

Введение. Несмотря на то, что Россия обладает огромными ресурсами ветровой, геотермальной, солнечной энергии, энергии биомассы, гидроэнергетическими ресурсами, в настоящее время возобновляемые источники энергии (ВИЭ), за исключением крупных гидроэнергетических систем, используются в стране весьма ограниченно. Так, доля России в производстве электроэнергии на базе ВИЭ в 2012-2015 гг. составила лишь 0,001% [1]. Согласно Постановлению Правительства РФ доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергоснабжении страны к 2020 г. должна увеличиться на 0,5...4,5% [2]. Основные усилия по увеличению доли ВИЭ в топливно-энергетическом секторе направлены на введение в эксплуата-

цию электростанций больших мощностей [3-5]. Применению установок малой мощности на основе ВИЭ не уделяется должного внимания, хотя они в определенной мере способствуют решению проблемы электрификации обособленных фермерских хозяйств. К ветроэнергетическим установкам малой мощности относятся установки мощностью до 40 кВт, но наиболее приемлемыми из них в фермерских хозяйствах являются ВЭУ мощностью 5-10 кВт с высотой установки ветроколеса на уровне 12...30 м [6].

Цель исследования – определение рациональных значений мощности ветровой электроустановки и высоты расположения ветроколеса, способных покрыть нагрузку фермерского хозяйства, располо-

женного в регионах страны с различными показателями среднегодовой скорости ветра.

Материал и методы. В качестве примера колебания электрических нагрузок для фермерского дома в течение года были взяты данные индивидуального фермерского дома, расположенного в городе Линкольн, штат Небраска, США.¹

На рисунке 1 представлено среднее ежемесячное значение нагрузок по данным энергопотребления за 2011-2015 гг. Площадь рассмотренного фермерского дома составляет 300 м², в котором на постоянной основе проживают 3 чел. К основным энергопотребителям относятся кухонное, мультимедийное оборудование, уборочные механизмы, стиральная машина и сплит-система. Из приведенных на рисунке 1 данных следует, что электрическая нагрузка рассмотренного фермерского дома существенно ко-

леблется в течение года. Годовое потребление электроэнергии в среднем составляет 7653,4 кВт·ч. С декабря по февраль, а также в июле, августе и сентябре потребление электроэнергии превышает среднее ежемесячное значение 637,78 кВт·ч/мес. Это объясняется дополнительной электрической нагрузкой, потребляемой электрообогревателем или кондиционером соответственно в зимние и летние месяцы.

Для анализа эффективности использования ветроэнергетической установки (ВЭУ) малой мощности для электроснабжения фермерского дома в различных климатических зонах России было отобрано 10 регионов со среднегодовой скоростью ветра, находящейся в пределах 3,1...7,2 м/с (табл. 1). Регионы подобраны таким образом, чтобы интервал между среднегодовыми скоростями ветра в них на высоте 10 м составлял в среднем 0,5 м/с.

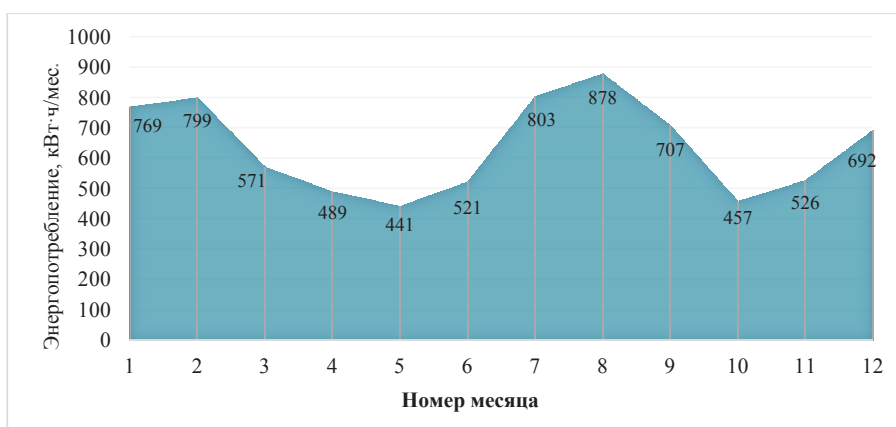


Рис. 1. Помесячный график потребления электроэнергии фермерским домом по данным LES (Lincoln Electric Systems)

Таблица 1

Распределение скорости ветра в регионе на высоте 10 м, м/с

№	Регион, город	Месяц												V _{ср.год}
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Москва	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0	2,7	2,8	3,0	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0
2	Челябинск	3,6	3,6	3,5	3,5	3,7	3,2	3,1	3,2	3,5	3,6	3,5	3,6	3,5
3	Рязань	4,4	4,5	4,4	4,0	3,9	3,6	3,3	3,4	3,8	4,0	4,1	4,2	4,0
4	Мурманск	5,2	5,1	4,7	4,4	4,0	4,0	3,8	3,7	4,0	4,8	4,9	5,0	4,5
5	Рыбновск	5,9	5,6	4,9	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	4,2	5,9	6,3	6,2	5,0
6	Диксон	5,6	5,5	5,7	5,5	5,4	5,0	5,8	5,6	5,4	5,5	5,6	5,5	5,5
7	Махачкала	6,0	6,5	6,1	5,8	5,5	5,4	5,9	6,0	5,8	5,9	6,4	6,5	6,0
8	Южно-Сахалинск	7,4	6,8	6,6	6,7	6,1	5,2	5,1	5,4	5,8	7,2	7,7	7,6	6,5
9	Курильск	8,4	8	7,4	7,0	6,2	5,2	5	5,2	5,6	7,3	8,3	8,7	6,9
10	о. Беринга	8,5	8,7	8,0	7,0	6,0	5,3	5,2	5,8	6,1	7,8	8,7	8,8	7,2

¹ Анализ проведен во время прохождения годичной стажировки Е.А. Муравлевой по гранту Fulbright в университете Небраска – Линкольн, штат Небраска, США.

Данные по скорости ветра в нормативных документах и климатических картах обычно представлены для высоты 10 м. Высота установки ветроколеса для ВЭУ малых мощностей 5-10 кВт в среднем составляет 12...30 м. Известно, что при удалении от поверхности земли скорость ветра увеличивается. Воспользовавшись формулой (1) [7], рассчитали доступную скорость ветра (v_h) на высоте установки ветроколеса $h = 12...30$ м в 10 выбранных регионах. Результаты расчета приведены в таблице 2.

$$v_h = v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где v_1, v_2 – скорость ветрового потока на высоте соответственно h_1 и h_2 , м/с; α – коэффициент сдвига (при неизвестном значении, $\alpha = 1/7$).

Таблица 2

Средняя годовая скорость ветра по регионам на высоте 10...30 м, м/с

№	Регион, город	Высота, м			
		10	12	18	30
1	Москва	3,0	3,1	3,3	3,5
2	Челябинск	3,5	3,6	3,8	4,1
3	Рязань	4,0	4,1	4,3	4,6
4	Мурманск	4,5	4,6	4,9	5,2
5	Рыбновск	5,0	5,1	5,4	5,9
6	Диксон	5,5	5,7	6,0	6,4
7	Махачкала	6,0	6,1	6,5	7,0
8	Южно-Сахалинск	6,5	6,6	7,0	7,6
9	Курильск	6,9	7,0	7,5	8,0
10	о. Беринга	7,2	7,3	7,8	8,4

В качестве ВЭУ в расчетах рассматривались серийно выпускаемые установки различных фирм мощностью 5-10 кВт с высотой расположения ветроколеса 12...18 м (табл. 3).

Таблица 3

ВЭУ мощностью 5-10 кВт с высотой установки ветроколеса 12...30 м

Наименование ВЭУ	Мощность, кВт	Высота установки ветроколеса, м		
		12	18	30
Evance ISKRAR9000	5	+	+	+
Eoltec SciroccoE5.6-6	6	+	+	+
Bergey Excel-R7,5	7,5	-	+	+
Bergey Excel 10	10	-	+	+

Энергия, производимая установками в течение месяца ($P_{\text{выр}}$), рассчитывается на основе данных по скорости ветра (v_h) (табл. 2) и характеристик мощностей ВЭУ в зависимости от силы ветра, взятых из паспортных данных:

$$P_{\text{выр}} = ((P = f(P_{\text{вых}}, v_h)) \cdot 24 \cdot n_{\text{дн}}) / 1000, \quad (2)$$

где $P_{\text{выр}}$ – выработанная электроэнергия за месяц, кВт·ч; v_h – скорость ветра на высоте (h) установки ветроколеса, м/с; $P_{\text{вых}}$ – мощность установки, взятая с кривой мощности установки, кВт; $n_{\text{дн}}$ – количество дней в месяце.

Результаты расчетов представлены на рисунке 2.

Результаты и обсуждение. Полученные графики позволяют определить приемлемую ВЭУ для фермерского хозяйства с наиболее подходящей установленной мощностью и высотой установки ветроколеса.

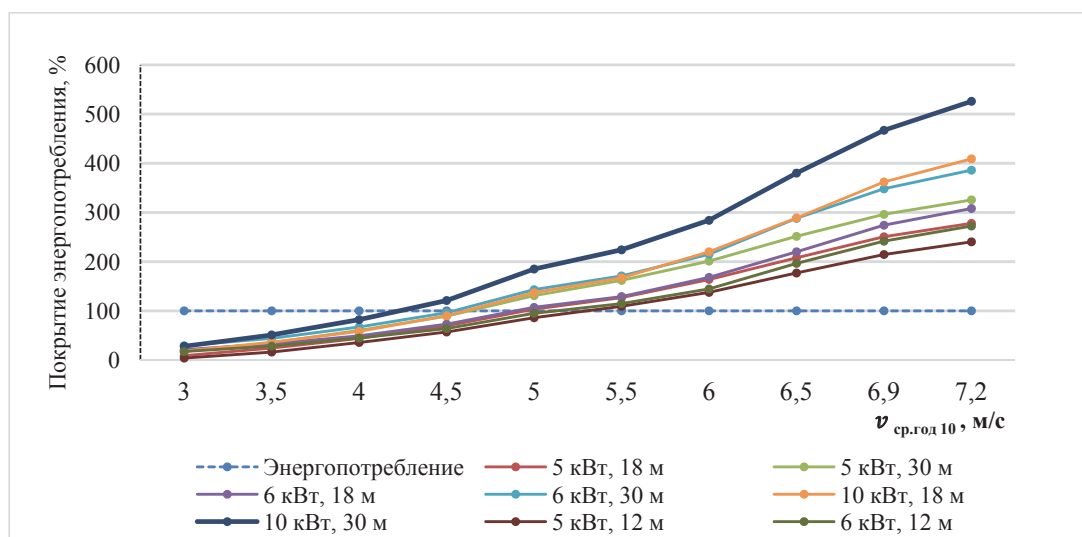


Рис. 2. Покрытие энергопотребления с помощью ВЭУ разной мощности и высоты установки ветроколеса

Из рисунка 2 и таблицы 2 следует, что для регионов со среднегодовой скоростью ветра на высоте 10 м $v_{\text{ср.год } 10} = 3...4$ м/с из всех проанализированных ВЭУ наиболее подходит установка Bergey Excel 10, мощность 10 кВт с высотой ветроколеса 30 м, так как ее график проходит наиболее близко к кривой энергопотребления и данная установка способна покрыть потребность в электроэнергии на 28% при среднегодовой скорости 3 м/с; на 51% при скорости 3,5 м/с и на 83% при 4 м/с соответственно. В регионах со среднегодовой скоростью ветра 4 м/с и 5 м/с годовая выработка энергии сразу у нескольких ВЭУ способна покрыть годовую потребность. Так, для $v_{\text{ср.год } 10} = 4,5$ м/с следует выбирать между Eoltec Scirocco E5.6-6, мощностью 6 кВт с $h = 30$ м и Bergey Excel 10, мощностью 10 кВт с $h = 18$ м, а для $v_{\text{ср.год } 10} = 5$ м/с – между Scirocco E5.6-6, мощностью 6 кВт с $h = 18$ м, Scirocco E5.6-6, мощно-

стью 6 кВт с $h = 12$ м и Evance ISKRAR9000, мощностью 5 кВт с $h = 18$ м. Для территорий со среднегодовой скоростью ветра, лежащей в пределах 5,5...7,2 м/с, следует сделать выбор в пользу установки Evance ISKRAR9000, Excel 10, $P_{\text{уст.}} = 10$ кВт с $h = 18$ м, а для $v_{\text{ср.год } 10} = 5$ м/с между установками Scirocco E5.6-6, $P_{\text{уст.}} = 6$ кВт с $h = 18$ м, Scirocco E5.6-6, $P_{\text{уст.}} = 6$ кВт с $h = 12$ м и Evance ISKRAR9000, $P_{\text{уст.}} = 5$ кВт с $h = 12$ м. В этом случае переизбыток энергии будет минимальным по сравнению с другими вариантами ВЭУ, составив для $v_{\text{ср.год } 10} = 5,5$ м/с лишь 9%, для $v_{\text{ср.год } 10} = 6$ м/с – 37%, для $v_{\text{ср.год } 10} = 6,5$ м/с, 6,9 м/с и 7,2 м/с – 77%, 114% и 140% соответственно.

Проанализировав далее скорость ветра в 447 населенных пунктах, расположенных в 80 субъектах РФ, получили, что в 293 из них среднегодовая скорость ветра лежит в пределах 3...4 м/с (табл. 4) [8].

Таблица 4

Количество населенных пунктов с сортировкой среднегодовой скорости ветра по интервалам

Округ	Количество населенных пунктов	Среднегодовая скорость ветра по интервалам, м/с					
		2...3	3...4	4...5	5...6	6...7	7...8
Центральный	26	8	15	3	-	-	-
Приволжский	35	-	2	27	6	-	-
Южный	17	-	6	11	-	-	-
Сибирский	118	5	102	10	1	-	-
Северо-Кавказский	13	-	6	5	1	1	-
Уральский	26	-	24	1	1	-	-
Северо-Западный	57	7	37	10	2	1	-
Дальневосточный	155	25	76	32	9	11	2
Российская Федерация	447	47	293	78	14	13	2

Сопоставляя графики рисунка 2 и данные, полученные после анализа ветровых ресурсов (табл. 4), получили, что наиболее подходящими установками малой мощности для покрытия нагрузки рассмотренного индивидуального фермерского дома в большинстве проанализированных населенных пунктов (293 города с $v_{\text{ср.год } 10} = 3...4$ м/с и 78 городов с $v_{\text{ср.год } 10} = 4...5$ м/с) являются установки мощностью 10 и 6 кВт соответственно с креплением ветроколеса на высоте 18...30 м.

Для установки Eoltec Scirocco ($P_{\text{уст.}} = 6$ кВт) с высотой расположения ветроколеса 18 м пороговым показателем, при котором производство энергии превышает ее энергопотребление, является среднегодовая скорость ветра, равная 5 м/с. На рисунке 3 представлены более развернутые результаты проведенных исследований для установки Eoltec Scirocco ($P_{\text{уст.}} = 6$ кВт) при $v_{\text{ср.год } 10} = 5$ м/с.

Несмотря на то, что общегодовой показатель выработанной энергии $P_{\text{выр.год}} = 8186$ кВт·ч, в данном случае превышает годовой показатель потребляемой энергии $P_{\text{потр.год}} = 7663$ кВт·ч, с мая по сентябрь и в феврале потребность в электроэнергии не может быть покрыта только за счет ВЭУ. В июле и августе установка способна покрыть только 41 и 34% требуемой энергии, в июне и сентябре – около половины (65 и 51%), а в феврале и мае – практически полностью: на 98 и 96% соответственно.

Проведенный анализ показывает, что точно подобрать универсальную установку, которая будет вырабатывать ровно такое количество энергии, необходимое потребителю, невозможно. Ветровой показатель является достаточно непостоянной величиной, поэтому всегда будет присутствовать недостаток или избыток энергии. В месяцы с недостат-

ком энергии следует предусмотреть дублирующий источник электроснабжения, а в регионах с переизбытком энергии целесообразнее подсоединение ВЭУ к распределительной линии электропередач с последующей продажей электроэнергии в сеть.

Взяв в основу данные рисунка 2 для различных ветроэнергетических установок и регионов страны, можно выбрать рациональные ВЭУ для фермерского дома с иным годовым значением энергопотребления, чем рассмотрено в примере.

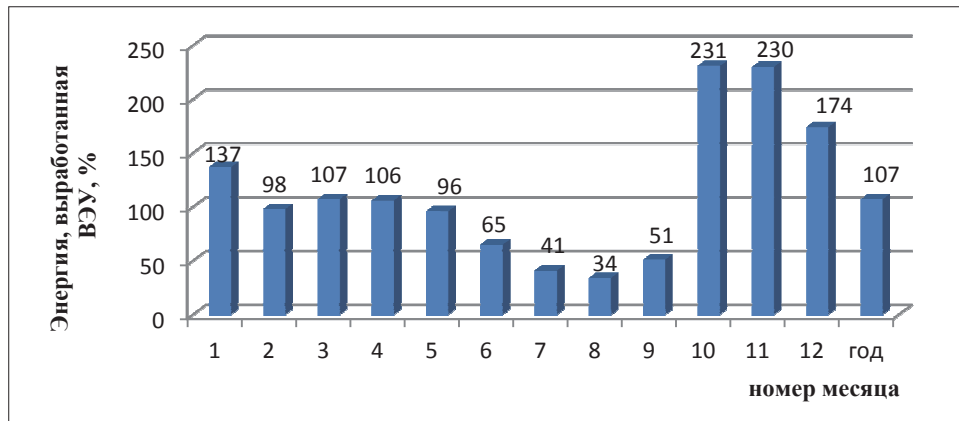


Рис. 3. Процент энергии, выработанной установкой Eoltec Scirocco мощностью 6 кВт при среднегодовой скорости ветра 5 м/с, по отношению к потребляемой энергии

Выводы

1. Путем проведения расчетов для ветровых электроустановок мощностью 5...10 кВт с высотой установки ветроколеса 12...30 м получен общий график, которым можно руководствоваться для быстрого определения наиболее подходящей ВЭУ с конкретными значениями $P_{уст.}$ и h в регионах с различными показателями среднегодовой скорости ветра для фермерского дома с заданным значением годового энергопотребления.

2. Наиболее благоприятными ВЭУ малой мощности для России в целом являются установки мощностью 6 и 10 кВт с креплением ветроколеса на высоте 18...30 м, так как в большинстве проанализированных населенных пунктов (371 из 447) покрытие нагрузки индивидуального фермерского дома за счет установок данного типа ВЭУ является наиболее приемлемой.

3. При расчете и выборе ВЭУ для конкретного фермерского хозяйства рекомендуется проводить более детальные расчеты по каждому месяцу. Даже если годовое производство электроэнергии превышает ее годовое потребление, не будут исключены месяцы, в течение которых можно наблюдать дефицит электроэнергии, поэтому необходимо предусмотреть дублирующий ее источник.

Библиографический список

1. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика / В.В. Елистратов. Изд. 2-е, доп. СПб.: Наука, 2013. 308 с.
 2. Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru>.

3. Коробова О.С. Перспективы использования возобновляемых источников энергии в России / О.С. Коробова // Горный информационно-аналитический бюллетень: Научно-технический журнал. 2009. № 5. С. 175-187.

4. Идрисова А.А. Повышение энергетической эффективности за счет использования регенеративной энергии: ветроэнергетика / А.А. Идрисова // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 20. С. 291-294.

5. Кулаков А.В. Ветроэнергетика в России: проблемы и перспективы развития / А.В. Кулаков // Межрегиональная научно-практическая конференция: Строительство и жилищно-коммунальный комплекс. Энергоэффективность. Инвестиции. Инновации: Сб. статей. Ярославль, 2010. С. 38-41.

6. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т»; Севастополь, 2004. 519 с.

7. Bing Wu, Yongqiang Lang, Navid Zargari, Samir Kouro. Power Conversion and Control of Wind Energy- Institute of Electrical and Electronics Engineers: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2011. 481 p.

8. Скорость ветра по широте и долготе местности. База данных по климатологии и солнечной энергии Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA Surface meteorology and Solar Energy) [Электронный ресурс]. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi>

Статья поступила 5.11.2016 г.

DETERMINATION OF APPROPRIATE POWER FOR SMALL WIND TURBINES ON FARMS

EKATERINA A. MURAVLEVA¹

E-mail: katya.muravleva@gmail.ru

STANISLAV P. RUDOBASHTA, DSc (Eng), Professor¹

E-mail: rudobashta@mail.ru

JERRY HUDGINS, Professor²

E-mail: jhudgins2@unl.edu

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

² University of Nebraska – Lincoln, 209N Scott Engineering Center, Lincoln, NE68588-0511

Small power wind turbine installations (5-10 kW) have not found a proper use in the agriculture of Russia. This may be due to low public awareness of alternative energy source availability, insufficient information on opportunities of applying wind turbines by farm enterprises, the lack of proper algorithms of equipment selection, as well as practical examples and selection recommendations. The purpose of the considered research is to determine the most appropriate technical parameters of wind turbines (indicated capacity and the windwheel height) that are most suitable for farms in Russia. Basing on the research results and performed calculations the author has developed a graph that can be used as a guideline for choosing small wind turbines for farms in the regions with an average annual wind speed from 3 to 7.2 m/s. The research results show that the most suitable installations for farms in Russia are wind turbines with a capacity of 6-10 kW and the windwheel height of 18-30 meters. The threshold wind speed values, with the power consumption exceeding the production power, are often 4-6 m/s. It has been proved that only 21% of the analyzed regions in Russia fall within this wind speed range.

Key words: choosing wind power installation, small-size wind power installations, autonomous power supply, farm enterprise.

References

1. Elistratov V.V. Vozobnovlyаемая энергетика [Renewable energy] / V.V. Elistratov // 2nd Ed. ext. SPb.: Science, 2013. 308 p.
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 13.11.2019 № 1715-p Ob Energeticheskoy strategii Rossii na period do 2030 goda [Russian Government Decree from 13.11.2009 № 1715-r "Energy Strategy of Russia till 2030"] [electronic resource]. URL: <http://www.consultant.ru>.
3. Korobova O.S. Perspektivy ispol'zovaniya vozobnovlyаемых источников energii v Rossii [Prospects of using renewable energy in Russia] / O.S. Korobova // Gorniy informatsionno-energeticheskii byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal). 2009. Issue 5. Pp. 175-187.
4. Idrisova A.A. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti za schet ispol'zovaniya regenerativnoy energii: vetroenergetika [Increasing energy efficiency by using renewable energy: wind energy] / A.A. Idrisova // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2013. Issue 20. Pp. 291-294.
5. Kulakov A.V. Vetroenergetika v Rossii: problem i perspektivy razvitiya [Wind power in Russia: problems and development trends] / A.V. Kulakov // Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: Stroitel'stvo i zhilishchno-kommunal'nyy kompleks. Energoeffektivnost'. Investitsii. Innovatsii: sb. statey. Yaroslavl', 2010. Pp. 38-41.
6. Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. Neischerpaemaya energiya. Kn. 2. Vetroenergetika [Inexhaustible energy. B. 2. Wind power] / V.S. Krivtsov, A.M. Oleynikov, A.I. Yakovlev: Uchebnik. Kharkov: Nats.aerokosm. un-t "Khark. aviats. in-t"; Sevastopol', 2004. 519 p.
7. BingWu, Yongqiang Lang, Navid Zargari, Samir Kouro. Power Conversion and Control of Wind Energy-Institute of Electrical and Electronics Engineers: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2011. 481 p.
8. Skorost' vetra po shirote i dolgote mestnosti. Baza danih po klimatologii i solnechno' energii Natsional'nogo upravleniya po vozdukhoplavaniyu i issledovaniyu kosmicheskogo prostranstva [Wind speed according to latitude and longitude. NASA Surface meteorology and Solar Energy]. [Electronic resource]. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi>.

Received on November 5, 2016