

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК 620.92

DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-14

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕТРОВЫХ ТУРБИН ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Д. А. Елинов, О. В. Бирюкова, А. И. Долотин

Актуальность

Борьба с глобальным потеплением и ограничение техногенного воздействия на окружающую среду являются одними из наиважнейших задач, стоящих перед человечеством. Согласно прогнозам [1] температура на планете к 2100 г. может подняться на 4 °С. Серьезность проблемы подтверждается рядом международных документов и соглашений, содержащих меры по ограничению выбросов парниковых газов. В частности, в рамках 21-й международной конференции по климату, прошедшей в Париже, было принято соглашение, поставившее целью не допустить повышения температуры на планете более чем на 2 °С. При этом основным путем достижения этой цели является снижение выбросов парниковых газов в атмосферу странами-подписантами. На рис. 1 приведены объемы выбросов парниковых газов по отраслям в Российской Федерации согласно данным отчетов [2].

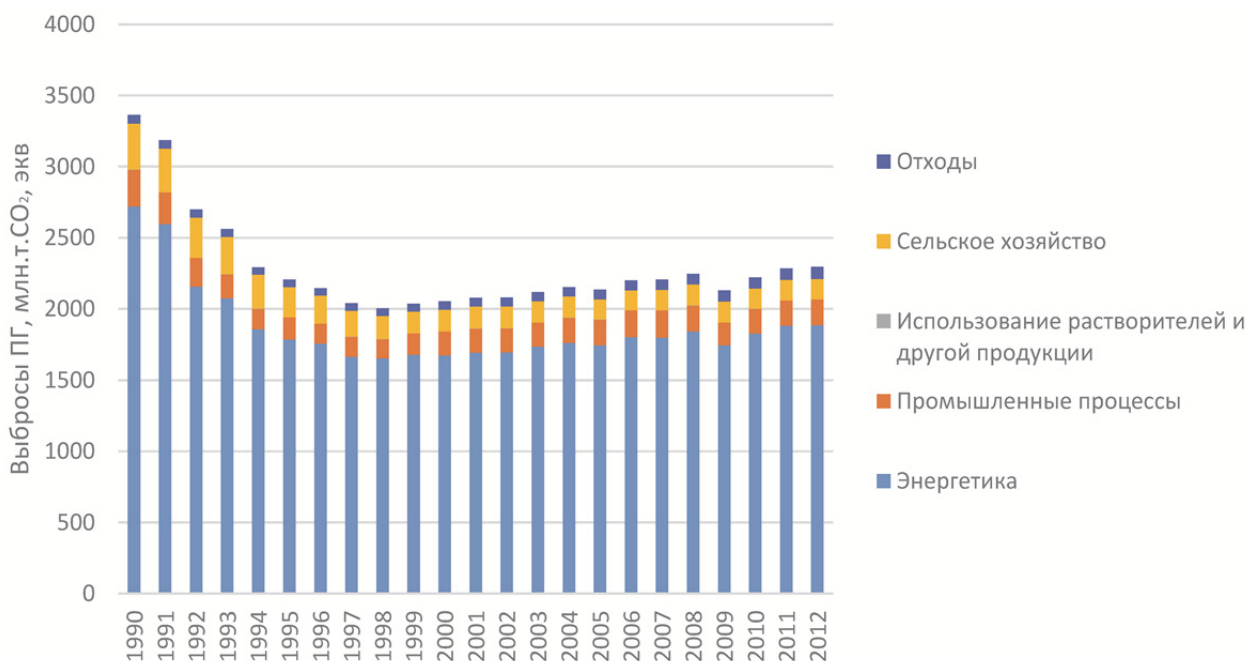


Рис. 1. Объемы выбросов парниковых газов по отраслям в 1990–2012 гг.

Таким образом доля выбросов парниковых газов наиболее существенна в энергетике и составляет порядка 80 % от общего объема выбросов по стране. Следовательно, производство энергии играет основную роль в загрязнении окружающей среды парниковыми газами и является наиболее перспективной областью для внедрения инноваций, снижающих выбросы. На рис. 2 приведены данные по разным странам [3], показывающие объем выброса парниковых газов при производстве электроэнергии.

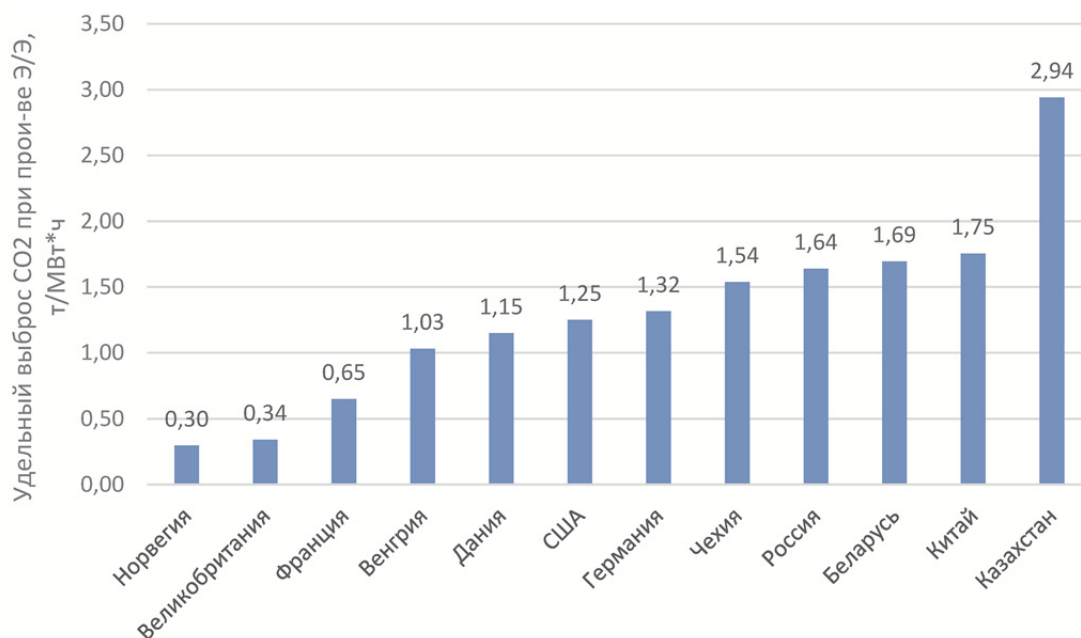


Рис. 2. Удельный выброс CO₂ при производстве электроэнергии

Решением, позволяющим снизить выброс парниковых газов в атмосферу, может стать использование возобновляемых источников электроэнергии. На рис. 3 приведены показатели выброса парниковых газов при производстве электроэнергии на различных типах электростанций [4].

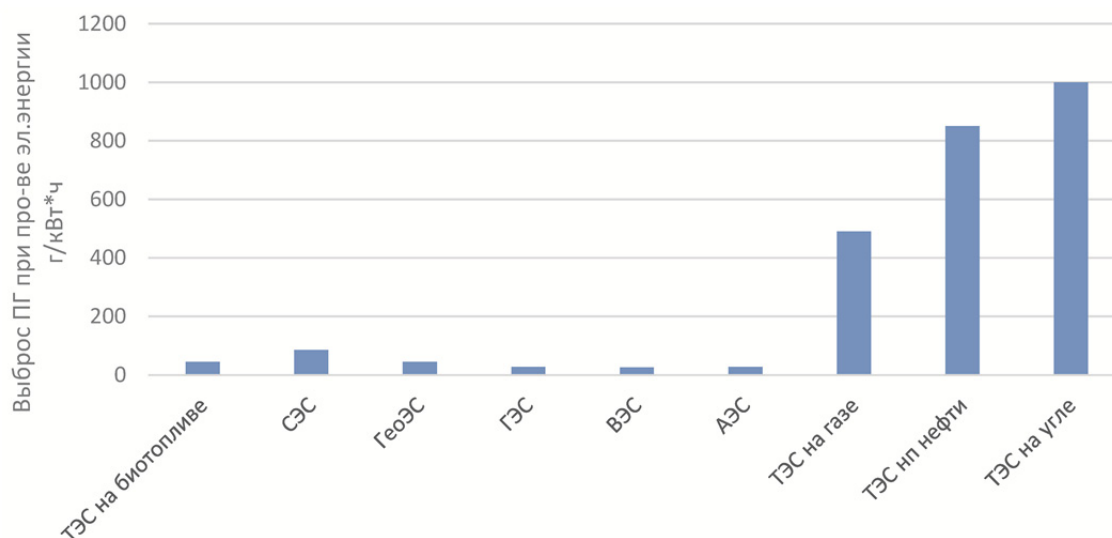


Рис. 3. Количество парниковых газов, выбрасываемых в окружающую среду при производстве электроэнергии

Таким образом, рассмотрение возможности применения электростанций на возобновляемых источниках электроэнергии представляется актуальной задачей.

Структура генерации электрической энергии в Пензенской области

На территории Пензенской области расположены следующие электростанции:

- 1) ТЭЦ-1, установленная мощность 385 МВт;
- 2) ТЭЦ-2, установленная мощность 16 МВт;
- 3) ТЭЦ-3, установленная мощность 4 МВт.

При этом максимальное потребление электрической мощности в 2015 г. согласно данным системного оператора [5] составило 828,4 МВт. Выработка электроэнергии составила 2511,7 млн кВт·ч, потребление – 8075 млн кВт·ч.

Таким образом, установленная мощность генераторов в Пензенской области покрывает 49 % пикового потребления, а собственная генерация покрывает только 31 % от нужд энергопотребления. Следовательно, регион является энергодефицитным, и развитие собственной генерации является актуальной задачей. Кроме того, вся генерация осуществляется на электростанциях на невозобновляемых источниках электроэнергии.

Оценка ветровых ресурсов Пензенской области

Пензенская область расположена между 42° и 47° восточной долготы и между 54° и 52° северной широты в зоне с умеренно-континентальным климатом. Пензенская область находится на четвертом месте в Приволжском федеральном округе по валовому потенциалу ветровой энергии [6].

На основе данных с метеостанций в период с 09.02.2015 по 09.02.2016 г. была проведена оценка ветровых ресурсов на территории Пензенской области в следующих точках (рис. 4):

- а) Кузнецк (м/с 27927);
- б) Сердобск (м/с 34056);
- в) Пачелма (м/с 27858);
- г) Исса (м/с 27760).



Рис. 4. Расположение контрольных точек на карте Пензенской области

По результатам анализа были построены ветровые диаграммы, приведенные на рис. 5.

Как видно из диаграмм, на территории Пензенской области преобладают западные ветры со скоростью ветра 2–4 м/с, и только на севере области преобладают ветры со скоростью 4–7 м/с.

Были произведены расчеты удельной мощности ветрового потока по следующей формуле [7]:

$$P_y = 0,59 \cdot 0,5\rho V^3, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха (1,225 кг/м³); V – скорость воздушного потока; а также удельной выработки электроэнергии в год (кВт·ч/м²):

$$W_y = 8,76 \cdot 10^{-2} D_{\%} P_y, \quad (2)$$

где $D_{\%}$ – доля случаев ветра заданного диапазона скоростей (%); P_y – удельная мощность для заданного диапазона скоростей ветра.

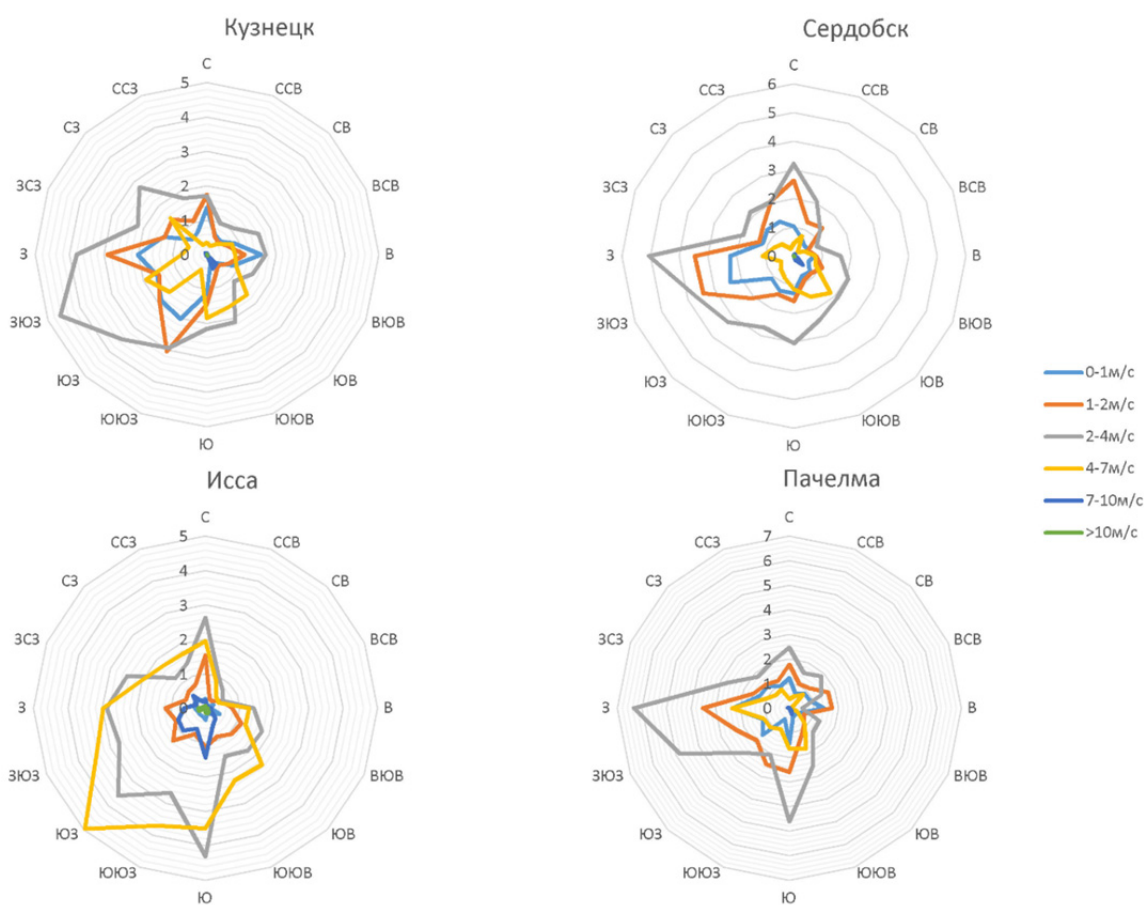


Рис. 5. Ветровые диаграммы в контрольных точках

Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Скорость ветра, м/с	Удельная мощность, Вт/м ²	Кузнецк		Сердобск		Пачелма		Исса	
		Доля ветра, %	Пр-во ЭЭ, кВт·ч/год	Доля ветра, %	Пр-во ЭЭ, кВт·ч/год	Доля ветра, %	Пр-во ЭЭ, кВт·ч/год	Доля ветра, %	Пр-во ЭЭ, кВт·ч/год
0–1	0,046	17,7	0,07	17,65	0,07	16,7	0,07	3,83	0,02
1–2	1,24	21	2,28	26,3	2,86	27,12	2,95	13,92	1,51
2–4	9,92	35,5	30,85	39,5	34,33	39,9	34,67	32,56	28,29
4–7	61,14	15,8	84,62	12,5	66,95	14,6	78,20	34,8	186,38
7–10	225,7	1,06	20,96	0,82	16,21	0,58	11,47	7,25	143,34
>10	367,5	0,034	1,09	0,034	1,09	0	0,00	1,2	38,63
Суммарная выработка э.э. кВт·ч/год			138,78		120,41		127,35		359,55

Анализ приведенных результатов показывает, что ветер на территории Пензенской области дует в среднем 95 % времени. При этом удельная выработка электроэнергии составляет примерно 130 кВт·ч/м² в год и только на севере области – 360 кВт·ч/м². Полученные результаты позволяют оценить экономические показатели при производстве электроэнергии на ветровых турбинах на территории Пензенской области.

Оценка экономической обоснованности использования энергии ветра при генерации электроэнергии в Пензенской области

Для оценки экономических показателей производства электроэнергии на ветровых электростанциях воспользуемся следующим выражением [7]:

$$L_f = \frac{C_{kW} r_f}{W_{\text{тк}W}}, \quad (3)$$

где L_f – удельная стоимость производства электроэнергии (руб./кВт·ч); C_{kW} – удельная стоимость электростанции (руб./кВт); r_f – фиксированная ставка в процентах; $W_{\text{тк}W}$ – годовая выработка электроэнергии на электростанции на киловатт установленной мощности.

Годовая выработка электроэнергии может быть получена исходя из данных по удельной выработке

$$W_{\text{т}} = W_y \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4)$$

где d – размах лопастей ветровой турбины.

Таким образом, подставляя (4) в выражение (3), получим

$$L_f = \frac{4C_{kW} r_f P}{W_y \pi d^2}. \quad (5)$$

Согласно данным исследований [8] удельная стоимость электростанций C_{kW} колеблется от 600 (Китай) до 2000 \$/кВт (Австрия). Для наших расчетов будем ориентироваться на значение в 1000 \$/кВт. Параметр r_f отражает ежегодные затраты в процентном соотношении к стоимости электростанции, а также различные субсидии. При расчетах параметр r_f будет меняться от 10 до 19 % с шагом 1 %. Также была исследована зависимость стоимости электроэнергии от размаха лопастей турбины. Мощность ветровой турбины принята равной 1 кВт. Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 6.

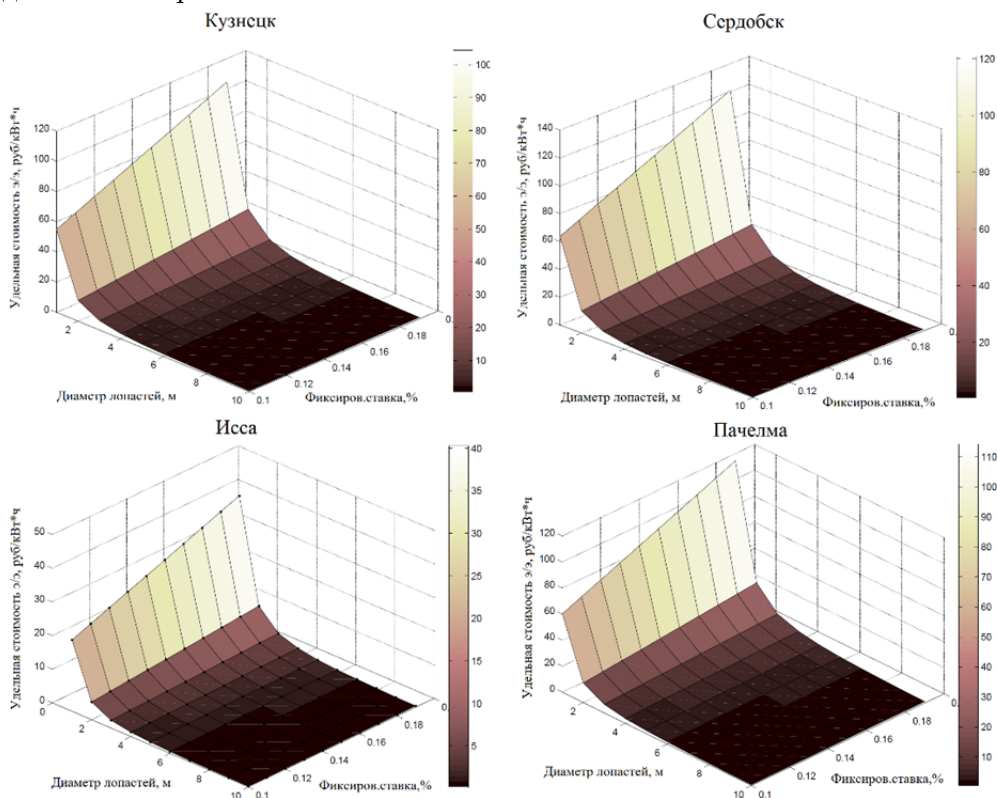


Рис. 6. Графики зависимости удельной стоимости электроэнергии от размаха лопастей турбины и значения фиксированной ставки

Результаты исследований показывают, что на большей части Пензенской области себестоимость электроэнергии составляет от 50 до 140 руб. за кВт·ч для ветровой турбины с размахом лопастей 1 м и от 0,65 до 1,23 руб. за кВт·ч для турбины с размахом лопастей 10 м. При этом следует сказать, что на севере области эти значения составляют от 23 до 44 руб. за кВт·ч и от 0,22 до 0,43 руб. за кВт·ч соответственно. Таким образом, генерация электроэнергии на ветровых турбинах на территории Пензенской области экономически обоснована, но для этого следует адаптировать технологию к применению ветровых турбин с лопастями большего размаха.

Если, к примеру, использовать ветровую турбину типа Enercon E-126 с размахом лопастей 126 м и номинальной мощностью 7500 кВт, рассчитанную на скорость ветра 9 м/с, то на севере области она будет вырабатывать в год 4,6 млн кВт·ч. В течение этого времени она только в 8,45 % случаев будет работать на номинальной скорости ветра. Себестоимость производимой электроэнергии при фиксированной ставке 0,1 составит 11,4 руб/кВт·ч. Для оценки целесообразности применения конкретной ветровой турбины предлагается ввести понятие форм-фактора ветровой турбины, отражающего ее конструктивные особенности. Для этого следует в выражение (5) привести к следующему виду:

$$\frac{W_y \pi d^2}{4P} = \frac{C_{kW} r_f}{L_f} \tag{6}$$

Далее введем следующую замену:

$$\frac{W_y \pi d^2}{4P} = K_f, \tag{7}$$

где K_f – форм-фактор.

Тогда с учетом (7) выражение (6) преобразуется к следующему виду:

$$K_f = \frac{C_{kW} r_f}{L_f} \tag{8}$$

Данное представление выражения (5) позволяет построить графики зависимостей себестоимости производимой электроэнергии от конструктивных особенностей турбины. На рис. 7 приведены зависимости $K_f(L_f)$ для различных C_{kW} .

Также следует отметить, что на основе форм-фактора можно производить оценку экономической эффективности турбины в конкретных условиях и определить основные пути повышения эффективности турбины на основе конструктивных изменений, осуществляемых либо за счет уменьшения мощности единичной установки, либо за счет увеличения размаха лопастей.

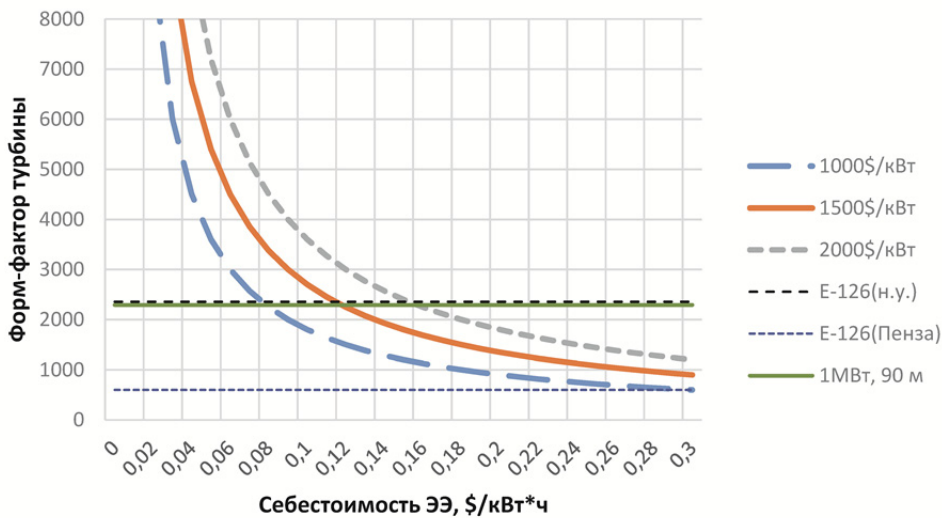


Рис. 7. Графики зависимостей $K_f(L_f)$ для различных значений удельной стоимости

На рис. 7 показано значение форм-фактора для турбины Enercon E-126 при номинальных показателях в условиях Пензенской области, а также для ветровой турбины номинальной мощностью 1 МВт и размахом лопастей 90 м. Как видно из графика, применение турбины типа Enercon E-126 в условиях Пензенской области ведет к понижению значения форм-фактора и росту себестоимости электроэнергии, а применение турбины мощностью 1 МВт с размахом лопастей 90 м практически соответствует применению турбины Enercon E-126 в ее расчетных условиях. При этом увеличение размера строительной части турбины не приведет к значительному удорожанию электроустановки, так как стоимость башни составляет только 10 % в общей стоимости ветровой установки [9]. Также следует отметить, что зарубежные источники [10] ориентируются на себестоимость электроэнергии на ветровых электростанциях на уровне 7,3 центов за 1 кВт·ч, или 4,75 руб. за 1 кВт·ч, что делает конкурентоспособной генерацию энергии на ветровых турбинах без учета господдержки в зонах, не входящих в ОРЭМ, где стоимость электроэнергии колеблется в районе 1 руб. за 1 кВт·ч [11].

Для создания инвестиционной привлекательности проектов, связанных с возобновляемой энергетикой, был принят ряд мер, стимулирующих развитие данного направления. В частности, были приняты правила определения цены на мощность [12], поставляемую на ОРЭМ от возобновляемых источников энергии, учитывающей компенсацию затрат генерирующим компаниям. При этом следует отметить, что в целом механизмы стимулирования генерации электроэнергии на возобновляемых источниках энергии носят непрозрачный характер, а наличие требования к степени локализации генерирующего объекта является сдерживающим фактором на начальном этапе развития ветроэнергетики, который в данный момент переживает Россия [13].

Рассмотренные меры позволяют снизить значения фиксированной ставки r_f . Поэтому также следует рассмотреть влияние экономических параметров на себестоимость электроэнергии, генерируемой на ветровых турбинах.

Если взять значение K_f равным 2300, что соответствует приведенным выше расчетам, то можно рассчитать значения L_f при различных значениях удельной стоимости электростанции и фиксированной ставки, преобразовав выражение (8) к следующему виду:

$$L_f = \frac{C_{kW} r_f}{K_f}. \quad (9)$$

Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 2

Таблица 2

Себестоимость производства электроэнергии на ветровой турбине, руб./кВт·ч

Удельная стоимость электростанции C_{kW} , \$/кВт	Значение фиксированной ставки r_f , %									
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
500	1,41	1,55	1,69	1,83	1,98	2,11	2,26	2,4	2,54	2,68
1000	2,82	3,1	3,4	3,67	3,95	4,23	4,52	4,8	5,1	5,36
1500	4,24	4,66	5,08	5,51	5,93	6,36	6,78	7,2	7,63	8,05
2000	5,65	6,22	6,78	7,34	7,91	8,47	9,04	9,6	10,1	10,74

В табл. 2 выделены значения себестоимости, которые меньше значений одноставочного тарифа на электроэнергию по Пензенской области на 2016 г.

Удобство представления результатов расчета себестоимости электроэнергии в предложенном виде заключается также в том, что при использовании другого значения форм-фактора турбины нет необходимости производить расчеты заново, а просто умножить значения табл. 2 на коэффициент

$$k = \frac{2300}{K'_f}, \quad (10)$$

где 2300 – исходное значение форм-фактора; K'_f – новое значение форм-фактора.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- 1) Пензенский регион является перспективным с точки зрения внедрения технологии генерации электроэнергии на возобновляемых источниках;
- 2) на территории Пензенской области наиболее перспективным является север региона, который подходит для генерации электроэнергии на современных ветровых турбинах;
- 3) при использовании ветровых турбин следует адаптировать их конструкцию к использованию на средних скоростях ветра в диапазоне 4–7 м/с;
- 4) без субсидий применение ветровых турбин на территории Пензенской области ограничено только решением задач локального электроснабжения и не позволяет осуществлять поставку электроэнергии на ОРЭМ.

Список литературы

1. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley. – Cambridge, United Kingdom ; New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2013. – 1535 p.
2. Отчеты в рамках РКИК. – URL: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8108.php (дата обращения: 09.02.2016).
3. Key world energy statistics. International energy agency. – France : Chirat, 2015 – 81 p.
4. IPCC, 2011 Summary for Policymakers / ed. by O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schloemer, C. von Stechow // IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. – Cambridge, United Kingdom ; New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2012. – 246 p.
5. Сайт системного оператора Единой энергетической системы. – URL: http://so-ups.ru/?id=rdu_penza (дата обращения: 09.02.2016).
6. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / под ред. П. П. Безруких. – М. : ИАЦ Энергия, 2007. – 272 с.
7. Johnson, G. L. Wind energy systems / G. L. Johnson. – Manhattan, KS, 2001 – 384 p.
8. D. Gielen Renewable energy technologies: cost analysis series. Vol. 1: Power Sector. Iss. 5/5: Wind Power. – IRENA. – June 2012. – 64 p.
9. Patel, M. R. Wind and solar power systems: design, analysis, and operation / Mukund R. Patel. – 2nd ed. – CRC Press, 2006. – 448 p.
10. 2013 Cost of Wind Energy. Review / C. Moné, A. Smith, B. Maples, M. Hand. – USA: National Renewable Energy Laboratory, 2015. – 74 p.
11. Сайт администратора торговой системы оптового рынка электроэнергии. – URL: www.atsenergo.ru/results/rsv/hubs_extra/hubs_extra2/index.htm (дата обращения: 09.02.2016).
12. Постановление Правительства от 28.05.2013 № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности». – URL: <http://base.garant.ru/70388616/>
13. Елистратов, В. В. Развитие ветроэнергетики Украины и ее состояние в России / В. В. Елистратов, А. Е. Конеченков, Г. Б. Шмидт // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – №3. – С. 101–109.

Елинов Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра технического сервиса и электроэнергетики,
Московский государственный университет
технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет) Пензенский филиал
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)
E-mail: edorm86a@gmail.com

Бирюкова Ольга Вячеславовна

старший преподаватель,
Московский государственный университет
технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет) Пензенский филиал
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)
E-mail:mgutu_tsie@mail.ru

Elinov Dmitry Aleksandrovich

candidate of technical science, associate professor,
sub-department of technical service and electricity,
Moscow State University of Technology
and management named after K. G. Razumovsky –
Penza branch
(440026, 6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Biryukova Olga Vyacheslavovna

lecturer,
Moscow State University of Technology
and management named after K. G. Razumovsky –
Penza branch
(440026, 6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Долотин Алексей Иванович

кандидат технических наук,
заведующий кафедрой технического сервиса
и электроэнергетики,
Московский государственный университет
технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет) Пензенский филиал
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)
E-mail:mgutu_tsie@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено экологическое воздействие энергетики на окружающую среду по выбросам углекислого газа при генерации электроэнергии. Приведена структура генерации на территории Пензенской области, а также обосновывается целесообразность развития генерации на возобновляемых источниках энергии. Проанализирована ветровая обстановка на территории Пензенской области в разных точках, даны рекомендации по применению ветровых турбин. Приведены результаты анализа экономической эффективности применения ветровых турбин для генерации электроэнергии на территории Пензенской области в зависимости от конструктивных особенностей, а также от изменения экономических факторов.

Ключевые слова: ветровая турбина, генерация, электроэнергия, возобновляемые источники энергии, себестоимость электроэнергии.

Dolotin Aleksey Ivanovich

candidate of technical science,
head of sub-department of technical service and
electricity,
Moscow State University of Technology
and management named after K. G. Razumovsky –
Penza branch
(440026, 6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Abstract. The paper considers the environmental impact of energy on the environment by carbon dioxide emissions from electricity generation. The article describes the structure of the generation in the Penza region, as well as the expediency of generating renewable energy. In the article have been analyzed the wind situation on the territory of the Penza region at different points, given the recommendations on the use of wind turbines. The paper described results of the analysis of economic efficiency of wind turbines for electricity generation in the Penza region, depending on the design features, as well as from changes in economic factors.

Key words: wind turbine, generation, electricity, renewable energy, the cost of electricity.

УДК 620.92

Елинов, Д. А.

Оценка возможности применения ветровых турбин для генерации электроэнергии на территории Пензенской области / Д. А. Елинов, О. В. Бирюкова, А. И. Долотин // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 97–105. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-14.