



Экономическое обоснование использования вертикально-осевой ветроэнергетической установки в условиях ветрового режима России

© Б.П. Хозяинов, Т.Н. Свистунова

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

Резюме: Цель – экономически обосновать эффективность использования вертикально-осевых ветроэнергетических установок, использующих принцип дифференциального лобового сопротивления лопастей, в условиях малых природных скоростей ветра от 1 до 15 м/с. Сметная стоимость определена ресурсно-индексным методом. Расчеты выполнены в два этапа: 1 – составлена ведомость, в которой определен расход ресурсов на проектный объем работ по сборникам государственных элементных сметных норм; 2 – составлена локальная ресурсная смета, расход ресурсов в натуральных измерителях переведен в стоимостные (в ценах 2000 г.). Локальные сметные расчеты составлены с помощью программного комплекса ГРАНД-СМЕТА. Все расходы на материалы для изготовления ветротурбины и поддерживающей конструкции принимались по коммерческой стоимости, которая переводилась с помощью дефляторов на бюджетную стоимость октября 2019 г. К стоимости материалов и эксплуатации машин (без оплаты труда машинистов), к сумме оплаты труда рабочих монтажников и машинистов использовались индексы перехода от цен 2000 г. к ценам 2019 г. Стоимость комплекта установки, рассчитанной по прочности на природную скорость 20 м/с, составила 1643,591 тыс. руб., что позволило определить стоимость 1 кВт·ч, зависящую от срока эксплуатации и среднегодовой скорости ветра. При скорости ветра 4 м/с стоимость составила 7,12 руб/кВт·ч; при скорости ветра 8 м/с – 2,19 руб/кВт·ч, соответственно. При скоростях ветра от 5 м/с до 11 м/с при равных промежутках времени воздействия средняя стоимость 1 кВт·ч будет в пределах 3,14 руб/кВт·ч. Проведенные исследования подтвердили эффективное использование предлагаемой вертикально-осевой ветроэнергетической установки в условиях малых природных скоростей ветра (являющейся конкурентоспособной в сравнении с традиционными способами выработки энергии) на территории России.

Ключевые слова: капитальные затраты, стоимость, эффективная работа, ветротурбина, мощность, вертикальная ось

Для цитирования: Хозяинов Б.П., Свистунова Т.Н. Экономическое обоснование использования вертикально-осевой ветроэнергетической установки в условиях ветрового режима России. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1285–1296. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1285-1296>

Economic justification for the use of a vertical axis wind power plant in wind conditions of Russia

Boris P. Khozyainov, Tatyana N. Svistunova

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

Abstract: The purpose of the study is to provide an economic justification of the application efficiency of vertical axis wind-driven power plants using the principle of differential blade drag under low natural wind speeds from 1 to 15 m/s. The estimated cost is determined by the resource-index method. Calculations are made in two stages: at the first stage a statement is compiled where the consumption of resources for the design volume of work is determined according to the state unit estimate standards collections; at the second stage a local resource estimate is made, and the resource consumption in natural units is converted to cost estimates (in the prices of 2000 year). Local estimates are made using the GRAND-SMETA software package. All costs of construction materials for the wind turbine and supporting structure were assumed at the commercial cost, which was translated to the budget cost of October 2019 using deflators. The transition indices from the prices of 2000 to the prices of 2019 are applied to the cost of materials and machinery operation (without remuneration of engine-drivers) as well as to the amount of labour remuneration for installers and engine-drivers. The cost of the installation set calculated by the strength at 20 m/s natural speed is 1643.591 thousand rubles. This allowed to determine the cost of 1 kWh, which depends on the service life and the average annual wind speed. At a wind speed

of 4 m/s the cost is 7.12 rub/kWh; at a wind speed of 8 m/s it is 2.19 rub/kWh. At wind speeds from 5 m/s to 11 m/s with equal exposure time intervals, the average cost of 1 kWh will be within 3.14 rub/kWh. Conducted studies have confirmed the effective use of the proposed vertical axis wind power plant under conditions of low natural wind speeds in Russia. The installation is proved to be competitive in comparison with the traditional methods of energy generation.

Keywords: capital expenditures, cost, efficient operation, wind turbine, power, vertical axis

For citation: Khozyainov BP, Svistunova TN. Economic justification for the use of a vertical axis wind power plant in wind conditions of Russia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1285–1296. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1285-1296>

ВВЕДЕНИЕ

Строительство предприятий и различных сооружений в неосвоенных территориях сопряжено с трудностями энергоснабжения. Приходится решать задачи по экономической эффективности вариантов энергоснабжения. При этом следует учитывать:

- а) большую протяженность линий электропередач;
- б) осуществление энергоснабжения с помощью дизельных электростанций;
- в) использование ветро- и гидроэнергетики.

Если строительство находится в районах, где скорость ветра 3 м/с и более, то возможно использование ветроэнергетики.

Тогда следует напомнить, что одной из причин недостаточного развития ветроэнергетики в России является то, что традиционные ветротурбины запускаются при ветре 5...7 м/с, а это неприемлемо для ветрового режима России (рис. 1).

Актуальным представляется исследование экспериментальных и теоретических основ новых вертикально-осевых ветроэнергетических установок (ВО ВЭУ) в условиях ма-

лых природных скоростей ветра.

На кафедре строительных конструкций, водоснабжения и водоотведения Кузбасского государственного технического университета была разработана ВО ВЭУ, использующая принцип дифференциального лобового сопротивления, которая работает в условиях малых природных скоростей ветра. Это дальнейшее развитие ветрогенераторов Савониуса. Среди заметных исследований были отмечены как зарубежные авторы [1–8], так и отечественные ученые, среди них можно назвать Д.Н. Горелова [9] и других. Для разработки методик по вычислению угловой скорости вращения ветротурбины, вращающего момента и мощности были использованы исследования авторов Дж. Л. Менет, Н. Боурабао и Дж. Твайделла.

Основная идея работы заключалась в:

– расширении ветрового диапазона работы ветротурбины от 1 до 15 м/с в результате применения ветронаправляющих экранов, позволяющих повысить скорости воздушного потока в объеме ветротурбины и предотвратить ее разрушения при ураганах;



Рис. 1. Среднегодовая скорость ветра
Fig. 1. Average annual wind speed



– повышении эффективности работы ветротурбины с применением новых лопастей, использующих принцип «дифференциального лобового сопротивления» с изменяющимися размерами и высокими аэродинамическими характеристиками (в данной статье это не учитывалось) с использованием исследований, указанных в литературном источнике [4];

– разработке новых методик по вычислению угловой скорости вращения ветротурбины, величины вращающего момента и ее мощности, с учетом численного моделирования, указанного в источнике [5];

– обосновании геометрических размеров поддерживающей конструкции и всех основных элементов ветротурбины, ее массы и комплектации для более эффективной работы с использованием предлагаемых методик, представленных в трудах [2, 3].

В данной статье дается обоснование экономической эффективности работы предлагаемой ВО ВЭУ. Используя данные теоретических разработок, выполненных ранее^{1,2} [10–15], были разработаны новые методики по вычислению оптимальных: угловой скорости вращения, вращающего момента и мощности ветротурбины с использованием новых конструкций лопастей [16–20].

Постановка задачи. Доказать экономическую эффективность использования вертикально-осевой ветроэнергетической установки и ее конкурентоспособность в сравнении с традиционными способами выработки энергии в условиях ветрового режима России.

ОБЗОР МЕТОДОВ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ

Для анализа методов экономического обоснования был использован источник³.

1. Базисно-индексный метод определения стоимости. Этот метод определяет стоимость работ, используя данные единичных расценок и показатели индексов перерасчета в текущие цены. Следовательно, базисно-

индексный метод может получать сметную стоимость на дату ее составления. Кроме того, сметная прибыль, налог на добавленную стоимость и накладные расходы прибавляются к сумме прямых затрат. Этот метод используется чаще всего для разработки смет на 1 вид работ.

2. Ресурсный метод определения стоимости. Этот метод применяется для определения цен на разработку смет по реальной стоимости частей, составляющих смету. Метод точен, но трудоемок, и обосновать цену на некоторый материал сложно.

3. Ресурсно-индексный метод. Это комбинированный метод применяется для вычисления сметной стоимости, который соединяет в себе ресурсный и индексный методы. С помощью первого метода может быть вычислена стоимость на материалы в действующих ценах, заработная плата рабочих с помощью дополнительных коэффициентов.

4. Базисно-компенсационный метод. Этот метод выполняет сложение стоимости, определяемой базисной ценой с дополнением затрат, обусловленных ростом цен на потребляемые ресурсы. В итоге стоимость определяется базисными ценами на начало строительства и всех затрат – это так называемый компенсационный фонд.

5. На основе стоимостных показателей по объектам-аналогам. В этом методе для смет принимаются расценки из смет на аналогичные объекты.

При анализе и сравнении методов для дальнейших расчетов был выбран ресурсно-индексный метод, который считается наиболее точным и больше подходит для нашего случая.

Основным документом для определения сметной стоимости была принята «Методика определения сметной стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации» (МДС 81-35-2004⁴).

¹ Безруких П.П. Ветроэнергетика: справ. и метод. пособ. М.: ЭНЕРГИЯ, 2010. 320 с.

² Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика: учеб. пособ. для вузов. М.: Высш. шк., 1970. 424 с.

³ Ардинов В.Д., Барановская Н.Т., Курочкин А.И. Сметное дело в строительстве: Самоучитель. 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: Питер, 2017. 464 с.

⁴ МДС 81-35-2004. Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035529> (27.08.2020).

Расчеты выполнены в два этапа. На первом составлялась ведомость, в которой определялся расход ресурсов (трудовых, технических, материальных) на проектный объем работ по сборникам государственных элементных сметных норм (ГЭСН). На втором составлялась локальная ресурсная смета, в которой расход ресурсов в натуральных измерителях переводился в стоимостные (сметные цены 2000 г.). Расчеты выполнены с помощью программного комплекса ГРАНД-СМЕТА.

Сметная стоимость, определенная первоначально в базисном уровне цен 2000 г., переведена в уровень цен октября 2019 г. с помощью региональных индексов, предлагаемых Центром инвестиционных программ и ценообразования в строительстве и публикуемых ежемесячно в сборниках «Цены в строительстве» (в нашем случае № 10, октябрь 2019 г.).

Коэффициенты перехода от цен 2000 г. к ценам 2019 г. Применены к:

- стоимости материалов;
- сумме оплаты труда рабочих-монтажников и машинистов;
- стоимости эксплуатации машин (без оплаты труда машинистов).

Следует заметить, что в ряде случаев нормативный расход материалов корректировался под технические возможности ВО ВЭУ, а отсутствующие сметные цены на материалы заменялись коммерческими, которые с помощью дефляторов переводились в сметные цены октября 2019 г.

Математическая модель. Для определения стоимости 1кВт·ч в рублях необходимо знать $KЗ$ – капитальные затраты в рублях, N – мощность ветротурбины (кВт), C_o – срок эксплуатации (лет), D – дней в году, $Ч$ – число часов в сутках. Тогда стоимость 1 кВт·ч в рублях ($Ц$) сможем рассчитать по формуле:

$$Ц = \frac{KЗ}{N \cdot C_o \cdot D \cdot Ч} \quad (1)$$

Для определения стоимости 1 кВт·ч в рублях для ветротурбины, установленной для конкретной местности, необходимо знать процентное соотношение скоростей ветра в заданный период времени (например, года). В таком случае воспользуемся формулой:

$$\begin{aligned} \sum Ц_{\text{СР.ГОД}} = Ц_3 &= \frac{KЗ}{N \cdot C_o \cdot D \cdot Ч} \cdot n_{0,3} + \\ + Ц_4 &= \frac{KЗ}{N \cdot C_o \cdot D \cdot Ч} \cdot n_{0,2} + \\ + Ц_5 &= \frac{KЗ}{N \cdot C_o \cdot D \cdot Ч} \cdot n_{0,5}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\sum Ц_{\text{СР.ГОД}}$ – средняя стоимость 1кВтч в рублях за год, $n_{0,3}$, $n_{0,2}$, $n_{0,5}$ указывают процент (30%, 20%, 50% в год) воздействия фиксированной скорости ветра к общему количеству времени (за 1 год).

Методы решения задачи. Выполним расчеты стоимости ВО ВЭУ на примере установки расчетной мощностью 1 кВт, геометрические размеры и масса которой были определены по источникам [17, 18].

Используя методику, изложенную в источниках [14, 16], вычислим геометрические размеры ветроэнергетической установки расчетной мощностью 1 кВт при воздействии природной скорости ветра $U = 3,25$ м/с, полученные результаты даны в табл. 1.

Дополнительные сведения: аэродинамический коэффициент лопасти $C_{\text{ха}} = 0,882$; количество лопастей $n = 3$; усредненная площадь лопасти при обдувании ее воздушным потоком с поворотом на 360° $S_L = 17,81$ м², ширина ветронаправляющего экрана 5 м; $R_i = 1,72$ м – расстояние от центра геометрической площади лопасти до оси вращения ветротурбины. Вид ВО ВЭУ мощностью 1 кВт представлен на рис. 2.

Таблица 1. Характеристики установки расчетной мощностью 1 кВт
Table 1. Characteristics of 1 kW wind power plant

Мощность, кВт	Размер ветротурбины		Размер поддерживающей конструкции		Размер лопасти, бхвхдхх, м	Размер тора		Масса ветротурбины, кг	Ri, м
	Dm, м	Hm, м	Dy, м	Hу, м		Dn, м	dv, м		
1	4,35	21,75	14,86	25,26	0,91×1,82×4,35	4,35	2,53	1428	1,72

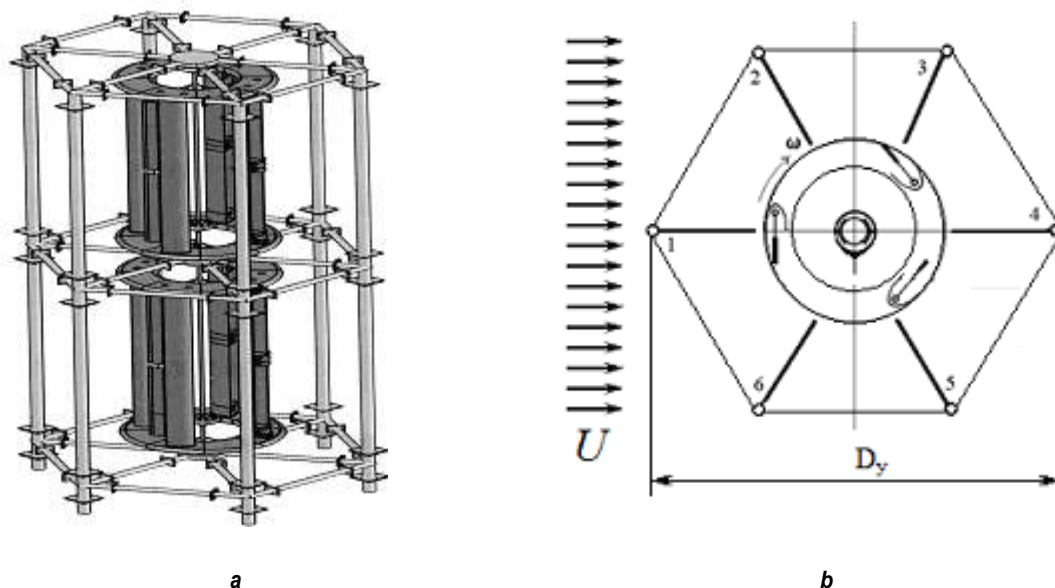


Рис. 2. Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка а – общий вид установки (ветронаправляющие экраны условно не показаны); б – план установки с ветронаправляющими экранами, обозначенными цифрами от 1 до 6

Fig. 2. Vertical axis wind power plant a – general view of the installation (wind guiding screens are conventionally not shown); b – installation plan with wind guiding screens numbered from 1 to 6

Расход материалов на ветроэнергетическую установку определялся после предварительно выполненных расчетов по прочности: ветротурбины методом конечных элементов по программе «Лира-САПР 2016» при скорости ветра $U = 20$ м/с и поддерживающей конструкции при экранах, расположенных по ее контуру (прикрывающие ветротурбину от ураганных ветров) при $U = 20$ м/с.

В табл. 2 перечислены ресурсы и прямые затраты на изготовление ветротурбины, в табл. 3 рассчитана сметная стоимость на материалы поддерживающей конструкции этажерочного типа, в табл. 4 представлена сметная стоимость на изготовление поддерживающей конструкции этажерочного типа по ГЭСН 09-03-039-05⁵.

Все материалы для изготовления ветротурбины и поддерживающей конструкции принимались по коммерческой стоимости, которая переводилась с помощью дефляторов на бюджетную стоимость октября 2019 г. Отсюда следует, что накладные расходы, сметную прибыль и налог на добавленную

стоимость принимаем только на оплату труда рабочих-монтажников, стоимость эксплуатации машин и приспособлений, оплату труда машинистов, стоимость которых составляет 74,111 тыс. руб.

Сметная стоимость ветротурбины мощностью 1 кВт и поддерживающей конструкции этажерочного типа на материалы и изготовление без мультипликатора и генератора 1543,591 тыс. руб. Система мультипликатор-генератор 100,0 тыс. руб. Общая сметная стоимость комплекта установки 1643,591 тыс. руб.

Результаты решения. Мощность установки, указанная в табл. 6, вычислена по методике, приведенной в источнике [16]. Анализ графика (рис. 3) показывает, что даже в условиях ветрового режима России возможно эффективное использование ветроэнергетики не только на прибрежных территориях и в море, но и в глубине материка, используя предлагаемую конструкцию ВО ВЭУ, методики расчета по вычислению угловой скорости вращения ветротурбины, величины вращающего момента и мощности.

⁵ГЭСН 09-03-039-05. Монтаж опорных конструкций: этажерочного типа [Электронный ресурс]. URL: https://www.defsmeta.com/rgsn/gsn_09/giesn-09-03-039-05.php (27.08.2020).

Таблица 2. Расчет прямых затрат на изготовление ветротурбины расчетной мощностью 1 кВт
Table 2. Calculation of direct costs for manufacturing of a wind turbine with the estimated capacity of 1 kW

№ п/п	Виды ресурсов	Единица измерения	Расход	Затраты в ценах на октябрь 2019 г., тыс. руб.
1	Конструкционная стеклоткань на лопасти и торы Т-10 ГОСТ 19170-2001 ⁶	м ²	1708,7	180,913
	Эпоксидная смола на всю ветротурбину ЭД-20 ГОСТ 10587-84 ⁷	кг	493,5	126,484
	Отвердитель Этал-45 на всю ветротурбину ТУ 2257-045-18826195-01 ⁸	кг	214,08	55,954
	Канат двойной свивки ТК, конструкции 6×19(1+6+12)+1 о.с., оцинкованный из проволоки марки В, Ø 4,8 мм ГОСТ 2688-80 ⁹	м.п.	130	2,638
	Осевая труба стальная бесшовная горячедеформированная Ø 102×4 l = 18 м.п. ГОСТ 8732-78 ¹⁰	т	0,174	2,683
	Сопутствующие материалы	–	–	36,867
	ИТОГО:	–	–	405,539
2	Трудовые ресурсы	–	–	–
	Затраты труда рабочих	чел. ч	55,94	12,276
3	Машины и механизмы	–	–	–
	Кран на автомобильном ходу до 10 т	маш. ч	0,3025	0,29
	Автомобили бортовые грузоподъемностью до 5 т	маш. ч	0,5042	0,41
	ИТОГО:	–	–	12,276
	ВСЕГО:	–	–	418,515

А также используя способы регулирования угловой скорости вращения ветротурбины, вращающего момента в зависимости от среднегодовой скорости ветра местности и ее рельефа [16, 20], которые в табл. 6 и на рис. 3 не учтены, но, несомненно, повысят эффективность работы ветротурбины. Использование предлагаемой ВО ВЭУ в условиях жилой застройки возможно, так как из-за малой угловой скорости вращения ветротурбины шумовые эффекты отсутствуют. Кроме того, отметим, что на Крайнем Севере стоимость 1 кВт·ч составляет от 10 до 12 руб., а скорость ветра значительно выше 5 м/с. Следовательно, показатели, представленные в табл. 6 и на рис. 3, дают полную уверенность в том, что использование ВО ВЭУ на

территории России не только возможно, но и необходимо.

Для того чтобы определить целесообразность строительства установки, необходимо знать временное процентное соотношение ветров разной величины. К примеру, в месте строительства скорость ветра $U_{ПР} = 4$ м/с – составляет $n = 30\%$ от общего времени эксплуатации, $U_{ПР} = 5$ м/с – $n = 20\%$, $U_{ПР} = 6$ м/с – $n = 50\%$. Тогда, используя формулы (2) и данные таблицы 6, получим:

$$\begin{aligned}
 C_{\Sigma} &= C_{0,3} + C_{0,2} + C_{0,5} = \\
 &= 7,06 \cdot 0,3 + 4,22 \cdot 0,2 + 2,66 \cdot 0,5 = \\
 &= 3,69 \frac{\text{р}}{\text{кВт}} \cdot \text{ч}.
 \end{aligned}$$

⁶ГОСТ 19170-2001. Стекловолокно. Ткань конструкционного назначения. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-19170-2001> (27.08.2020).

⁷ГОСТ 10587-84. Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-10587-84> (29.05.2020).

⁸Отвердитель Этал-45М ТУ 2257-045-18826195-01 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sibenergo38.com/polimery/otverditel-etala-45m-tu-2257-045-18826195-01> (29.08.2020).

⁹ГОСТ 2688-80. Канат. [Электронный ресурс]. URL: https://tnmk-irk.ru/kanat-gost-2688-80?gclid=EAlalQobChMImaaLtqOf7QIVzueyCh26uADaEAAYASAAEgJ5VPD_BwE (29.08.2020).

¹⁰ГОСТ 8732-78. Труба бесшовная. [Электронный ресурс]. URL: https://tnmk-irk.ru/truba-besshovnaya?gclid=EAlalQobChMIImNGF-qOf7QIVCx7Ch1q8Q04EAAYASAAEgKKcfD_BwE (30.08.2020).



Таблица 3. Сметная стоимость на материалы поддерживающей конструкции этажерочного типа
Table 3. Estimated cost of supporting tier-type construction materials

№ п/п	Сметная стоимость на материалы поддерживающей конструкции этажерочного типа для ветротурбины мощностью 1 кВт ГЭСН 09-03-039-05 ⁵	Единица измерения	Расход	Цены на октябрь 2019 г., тыс. руб.
1	Бетон класса В20 для изготовления фундаментов ГОСТ 26633-91 ¹¹	м ³	1,8	4,382
2	Анкерные болты Ø 24 мм Тип 1.1 ГОСТ 24379.1-2012 ¹²	шт.	24	1,948
3	Наружные стойки из стальных горячедеформированных бесшовных труб Ø 194×5,5 l = 25,26 м, n = 6 шт. ГОСТ 8732-78 ¹⁰	т	3,848	176,635
4	Внутренние стойки из стальных горячедеформированных бесшовных труб Ø 140×5 l = 25,26 м, n = 6 шт. ГОСТ 8732-78 ¹⁰	т	2,521	113,532
5	Горизонтальные ригели из стальных горячедеформированных бесшовных труб Ø 140×5 l = 7,45 м n = 36 шт. ГОСТ 8732-78 ¹⁰	т	4,462	200,944
6	Связи Ø 30 мм l = 12,5 м n = 12 шт. ГОСТ 8732-78 ¹⁰	т	1,422	47,351
	Установка фланцевых соединений на стальных трубах ГЭСН 16-02-007-07 ¹³	т	–	–
7	Электроды УОНИ 13/55 Ø 5 мм ГОСТ 9466-75	т	0,07	4,943
8	Болты с шестигранной головкой, с гайками и шайбами Ø 20 l = 70 мм ГОСТ Р 52644-2006 ¹⁴	шт.	280	10,705
9	Фланцы стальные плоские приварные 0,3×0,3×0,005 м 180 шт. ГОСТ 19281-2014 ¹⁵	т	0,635	21,417
10	Ветронаправляющие экраны, изготовленные из оцинкованного профнастила СКН 153-900-0,8 ¹⁶ , СТО 57398459-18-2006 ¹⁷	м ²	405	269,798
	Сопутствующие материалы 10%	–	–	78,00
	ИТОГО:	–	–	929,655

ВЫВОДЫ

1. Общая стоимость предлагаемой ВО ВЭУ расчетной мощностью 1 кВт составляет 1643,591 тыс. руб.

2. Стоимость 1 кВт·ч ВО ВЭУ зависит от срока эксплуатации и среднегодовой скорости ветра. При предполагаемом сроке эксплуатации, указанном в табл. 6, цена 1 кВт·ч:

для скорости ветра 4 м/с составляет 7,12 руб/кВт·ч; при скорости ветра 8 м/с соответствует 2,19 руб/кВт·ч. По данным табл. 6, очевидно, что при природных скоростях ветра в пределах от 5 м/с до 11 м/с (в диапазоне, где работают традиционные ветроэнергетические установки) при равных промежутках времени воздействия средняя стоимость

¹¹ГОСТ 26633-91. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9052221> (29.08.2020).

¹²ГОСТ 24379.1-2012 Болты фундаментные. Конструкция и размеры [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200097393> (29.08.2020).

¹³ ГЭСН 16-02-007-07. Установка фланцевых соединений на стальных трубопроводах диаметром: 200 мм [Электронный ресурс]. URL: https://www.defsmeta.com/rgsn/gsn_16/giesn-16-02-007-07.php (29.08.2020).

¹⁴ГОСТ Р 52644-2006 (ИСО 7411:1984). Болты высокопрочные с шестигранной головкой с увеличенным размером под ключ для металлических конструкций. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200051504> (23.08.2020).

¹⁵ГОСТ 19281-2014 Прокат повышенной прочности. Общие технические условия [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200113779> (23.08.2020).

¹⁶СКН 153-900-0,8. Оцинкованный профнастил СКН 153 с полезной шириной 900 мм производится из оцинкованной стальной заготовки толщиной 0,8 мм [Электронный ресурс]. URL: <http://www.proflist.ru/products/7/46/> (23.08.2020).

¹⁷СТО 57398459-30-2008 (СТП/ПП/30). Профили стальные листовые гнутые для сталебетонных перекрытий [Электронный ресурс]. URL: <http://www.proflist.ru/techinfo/> (24.08.2020).

Таблица 4. Сметная стоимость на изготовление поддерживающей конструкции этажерочного типа по ГЭСН 09-03-039-05⁵

Table 4. Estimated cost for manufacturing of the tier-type supporting structure according to GESN (State unit estimate standards for construction work) 09-03-039-05⁵

№ п/п	Сметная стоимость на изготовление поддерживающей конструкции этажерочного типа для ветротурбины мощностью 1 кВт, ГЭСН 09-03-039-05 ⁵	Единица измерения	Расход	Цена на октябрь 2019 г., тыс. руб.
1	Бурение скважин на базе автомобилей (ГЭСН 05-01-056-03 ¹⁸) Ø 0,5 м / =1.5× 6 =9 м	маш. ч	0,64	8,317
2	Бетонный автомиксер 58146Т КАМАЗ 43118-3017-46 ¹⁹	маш. ч	1,8	3,474
3	Затраты труда рабочих. Разряд 4,8	чел. ч	1,93	3,632
	ИТОГО:	–	–	15,423
4	Эксплуатация крана на автомобильном ходу до 10 т	маш. ч	0,12	0,252
5	Аппарат для газовой сварки и резки	маш. ч	2,24	0,050
6	Эксплуатация бортовых автомобилей грузоподъемностью до 5 т	маш. ч	0,19	0,309
7	Затраты труда рабочих монтажников. Разряд 3,8	чел. ч	19,38	3,53
	ИТОГО:	–	–	4,141
	Монтаж ветронаправляющих экранов ГЭСН 09-04-006-02	–	–	–
8	Эксплуатация крана на автомобильном ходу до 10 т	маш. ч	0,34	0,713
9	Эксплуатация бортовых автомобилей грузоподъемностью до 5 т	маш. ч	0,5	0,817
10	Дрели электрические	маш. ч	2,41	0,088
11	Аппарат для газовой сварки и резки	маш. ч	3,36	0,0756
12	Преобразователи сварочные	маш. ч	0,18	0,0415
13	Затраты труда рабочих монтажников, разряд 3,5	чел. ч	105,3	52,812
	ИТОГО:			54,547
	ВСЕГО (на изготовление ветротурбины, поддерживающей конструкции этажерочного типа и монтаж ветронаправляющих экранов):			74,111

1 кВт·ч будет в пределах 3,14 руб/кВт·ч, при скорости ветра от 2 до 15 м/с составит 8,15 руб/кВт·ч.

3. Предлагаемая конструкция ВО ВЭУ способна работать в широком диапазоне природных скоростей ветра, в том числе и

при малых скоростях ветра от 1 до 15 м/с, что позволяет ей работать более эффективно в ветровых условиях малых среднегодовых скоростей ветра, используя рельеф местности и особенности городской застройки.

Таблица 5. Определение накладных расходов, сметной прибыли и налога на добавленную стоимость на изготовление ветротурбины, поддерживающей конструкции этажерочного типа и монтаж ветронаправляющих экранов

Table 5. Determination of overhead costs, estimated profit and value-added tax of manufacturing of a wind turbine supporting tier structures and wind guiding screen installation

Вид дополнительных начислений на изготовление ветротурбины и поддерживающей конструкции этажерочного типа и монтаж ветронаправляющих экранов	Цена, тыс. руб.
Накладные расходы определены по ставке 108×0,85=91,8%: 74,111×0,918=68,034 тыс. руб.	68,034
Сметная прибыль определена по ставке 65×0,8=52%: 74,111×0,52=38,54 тыс. руб.	38,54
Налог на добавленную стоимость определен 20% от сметной стоимости работ: 74,111×0,2=14,82 тыс. руб.	14,82
ИТОГО:	121,394

¹⁸ГЭСН 05-01-056-03. Бурение скважин диаметром 500 мм вращательным (роторным) способом в грунтах и породах группы: 3 [Электронный ресурс]. URL: https://www.defsmeta.com/rgsn/gsn_05/giesn-05-01-056-03.php (25.08.2020).

¹⁹Автобетоносмеситель 58146Т на шасси КАМАЗ-43118-3017-46 [Электронный ресурс]. URL: <https://td-ka.ru/abs-58146/58146T/> (25.08.2020).



Таблица 6. Определение стоимости 1 кВт·ч вертикально-осевых ветроэнергетических установок в зависимости от срока эксплуатации и их производительности

Table 6. Determination of the cost of 1 kWh of vertical axis wind turbines depending on their service life and efficiency

Средняя скорость ветра U , м/с	Ширина экрана, м	N , кВт	Стоимость, руб/кВт·ч	Срок эксплуатации, лет	КИЭВ*
1	5,00	0,0294	318,92	20	0,847
2	5,00	0,235	44,29	18	0,847
3	5,00	0,794	14,76	16	0,847
3,25	5,00	1,010	11,61	15	0,847
4	5,00	1,883	7,12	14	0,847
5	5,00	3,677	4,25	12	0,847
6	5,00	6,354	2,68	11	0,847
7	4,65	8,092	2,32	10	0,679
8	4,29	9,519	2,19	9	0,535
9	3,58	7,883	2,97	8	0,311
10	3,23	7,909	3,39	7	0,228
11	2,87	7,424	4,21	6	0,161
12	0	6,494	5,78	5	0,108
13	0	8,257	5,68	4	0,108
14	0	10,313	6,06	3	0,108
15	0	12,684	7,40	2	0,108

*КИЭВ – коэффициент использования энергии ветра.

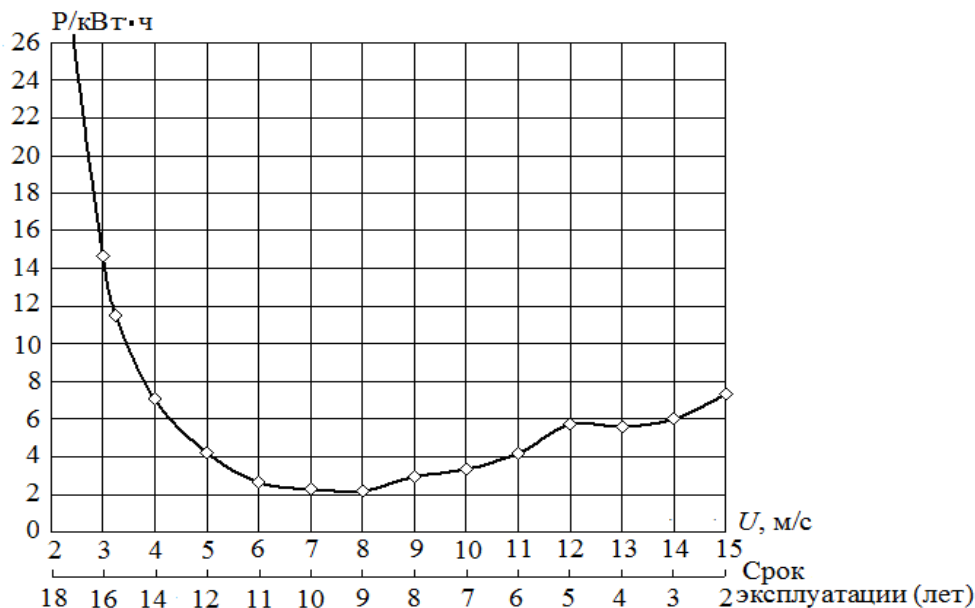


Рис. 3. Стоимость 1 кВт·ч вертикально-осевой ветроэнергетической установки расчетной мощностью 1кВт в зависимости от среднегодовой скорости ветра и срока эксплуатации

Fig. 3. Cost of 1 kW-h of vertical axis wind power plant with the estimated capacity of 1 kW depending on the average annual wind speed and service life

4. При скорости ветра более 15 м/с ветронаправляющие экраны прикрывают ветротурбину, предотвращая ее разрушение.

5. Некоторое завышение стоимости 1 кВт·ч при скорости ветра более 8 м/с связано с неэффективной работой ветронаправляющих экранов и обтеканием ветротурбины воздушным потоком при быстром ее вращении.

6. Применение перспективных разработок, изложенных в источниках [16, 19, 20],

позволит регулировать угловую скорость вращения ветротурбины, вращающий момент и мощность, а наличие двухъярусной ветротурбины (см. рис. 2) позволит вращаться ее частям разнонаправленно, что значительно повысит эффективность ее работы в зависимости от изменения природной скорости ветра.

7. Использование облегченной лопасти с изменяющимися размерами [20] будет спо-

способствовать эффективному ее использованию в условиях изменяющегося положения лопастей в объеме ветротурбины, что дополнительно снизит стоимость 1 кВт·ч.

8. Коэффициент использования энергии ветра в диапазоне ветров от 1 до 9 м/с находится в пределах от 0,847 до 0,311, что указывает на эффективную работу представленной ВО ВЭУ в условиях ветрового режима России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчетная мощность 1 кВт была получена при скорости ветра 3,25 м/с, а стоимость представленной ВО ВЭУ была определена расчетом по прочности при скорости ветра 20 м/с и с учетом этого составила 1643,591 тыс.

руб. Это позволило определить стоимость 1кВт·ч, которая зависит от срока эксплуатации и среднегодовой скорости ветра. При скорости ветра 4 м/с стоимость составляет 7,12 руб/кВт·ч; при скорости ветра 8 м/с соответствует 2,19 руб/кВт·ч. При скоростях ветра от 5 м/с до 11 м/с при равных промежутках времени воздействия средняя стоимость 1 кВт·ч будет в пределах 3,14 руб/кВт·ч.

Таким образом, подтверждено эффективное использование предлагаемой ВО ВЭУ в условиях малых природных скоростей ветра на территории России, которая вполне конкурентоспособна в сравнении с традиционными способами выработки энергии, особенно в отдаленных поселках и производствах.

Список литературы

1. Driss Z., Mlayeh O., Driss S., Maaloul M., Abid M. S. Study of a small incurved savonius wind rotor: experimental validation // International Journal of Mechanics and Applications. 2015. Vol. 5. № 2. С. 31–36. <https://doi.org/10.5923/j.mechanics.20150502.01>
2. Wahyudi B., Soeparman S., Hoesijmakers H.W.M. Optimization design of Savonius diffuser blade with moving deflector for hydrokinetic cross flow turbine rotor // Energy Procedia. 2015. № 68. С. 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.253>
3. Driss Z., Mlayeh O., Driss S., Maaloul M., Abid M.S. Numerical study of an unconventional Savonius wind rotor with a 75° bucket arc angle // American Journal of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 3. No. 3A. P. 15–21. <https://doi.org/10.12691/ajme-3-3A-3>
4. Tian Wenlong, Song Baowei, Van Zwieten J.H., Pyakurel P. Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes // Energies. 2015. Vol. 8. No. 8. P. 7915–7929. <https://doi.org/10.3390/en8087915>
5. Al-Faruk A., Sharifian A. Geometrical optimization of a swirling Savonius wind turbine using an open jet wind tunnel // Alexandria Engineering Journal. 2016. Vol. 55. Issue 3. P. 2055–2064. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.005>
6. Kludzinska K., Tesch K., Doerffer P. Investigation of the aerodynamics of an innovative vertical-axis wind turbine // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 530. No. 4. P. 739–754. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/530/1/012007>
7. Моди Ф. Характеристики ветродвигателя Савониуса // Современное машиностроение. 1989. № 10. С. 139–148.
8. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии / пер. с англ. Под ред. В.А. Коробкова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 392 с.
9. Горелов Д.Н. Экспериментальное исследование энергетических характеристик двухъярусного ротора Савониуса // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12. № 4. С. 693–696.
10. Стребков, Д.С., Харитонов В.П., Муругов В.П., Сокольский А.К. Ветроэнергетика России // Сельский механизатор. 1996. № 2. С. 21–22.
11. Редчиц Д.А. Аэродинамика трехлопастного ротора Савониуса // Вестник двигателестроения. 2009. № 3. С. 71–76.
12. Поляков П.Ю., Васильчук Д.Ф. Экспериментальное исследование и разработка математической модели ветродвигателя с вертикальной осью вращения // Альтернативная энергия и экология. 2008. № 9. С. 53–58.
13. Сабинин Г.Х. Теория идеального ветряка // Труды Центрального АэроГидродинамического Института. Вып. 32. М.: Типо-Литография В.Т.У. им. Т. Дунаева, 1927. 27 с.
14. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. М.: Энергоатомиздат, 1983. 200 с.
15. Хозяинов Б.П. Пути достижения лидерства в ветроэнергетике // Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 22-24. С. 59–67. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.22-24.059-067>
16. Хозяинов Б.П. Экспериментальные и аналитические исследования вертикально-осевой ветроэнергетической установки // Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 22-24. С. 51–58. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.22-24.051-058>
17. Хозяинов Б.П. Анализ влияния массы вертикально-осевой ветротурбины на эффективность ее работы // Промышленная энергетика. 2020. № 2. С. 60–65. <https://doi.org/10.34831/EP.2020.99.69.008>
18. Хозяинов Б.П. Влияние геометрических параметров на эффективность работы вертикально-осевой ветроэнергетической установки // Промышленная энергетика. 2020. № 1. С. 44–50.



<https://doi.org/10.34831/EP.2020.39.11.008>

19. Пат. № 2502893, Российская Федерация, МПК F03D 3/04. Способ регулирования величины вращающего момента, угловой скорости вращения вертикально-осевой ветротурбины / Б.П. Хозяинов, Д.Б. Хозяинов, М.Б. Лобанова. № 2012137350; заявитель и правообладатель Б.П. Хозяинов. Заявл. 31.08.2012;

опубл. 27.12.2013. Бюл. № 36.

20. Пат. 2722792, Российская Федерация, МПК F03D 3/00. Ветротурбина с воздухоносными конструкциями и изменяющимися габаритами лопастей / Б.П. Хозяинов, Д.Б. Хозяинов, М.Б. Лобанова; заявитель и правообладатель Б.П. Хозяинов. № 2019129662. Заявл. 19.09.2019; опубл. 03.06.2020. Бюл. № 16.

References

1. Driss Z, Mlayah O, Driss S, Maaloul M, Abid M. S. Study of a small incurved Savonius wind rotor: experimental validation. *International Journal of Mechanics and Applications*. 2015;5(2):31–36.
2. Wahyudi B, Soeparman S, Hoesjmakers HWM. Optimization design of Savonius diffuser blade with moving deflector for hydrokinetic cross flow turbine rotor. *Energy Procedia*. 2015;68:244–253. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.253>
3. Driss Z, Mlayeh O, Driss S, Maaloul M, Abid MS. Numerical study of an unconventional Savonius wind rotor with a 75° bucket arc angle. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2015;3(3A):15–21. <https://doi.org/10.12691/ajme-3-3A-3>
4. Tian Wenlong, Song Baowei, Van Zwieten JH, Pyakurel P. Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes. *Energies*. 2015;8(8):7915–7929. <https://doi.org/10.3390/en8087915>
5. Al-Faruk A, Sharifian A. Geometrical optimization of a swirling Savonius wind turbine using an open jet wind tunnel. *Alexandria Engineering Journal*. 2016;55(3):2055–2064. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.005>
6. Kludzinska K, Tesch K, Doerffer P. Investigation of the aerodynamics of an innovative vertical-axis wind turbine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014;530(4):739–754. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/530/1/012007>
7. Modi F. Characteristics of Savonius wind turbine. *Sovremennoe mashinostroenie*. 1989;10:139–148. (In Russ.)
8. Twidell Dzh, Weir A. Renewable energy sources, 1990, 392 p. (Russ. ed.: *Vozobnovlyаемые istochniki energii*. Moscow, Energoatomizdat, 1990, 392 p.)
9. Gorelov DN. Experimental study of power characteristics of two-tier Savonius rotor. *Teplofizika i aeromekhanika = Thermophysics and Aeromechanics*. 2005;12(4):693–696.
10. Strebkov DS, Haritonov VP, Murugov VP, Sokol'skij AK. Russian wind power engineering. *Selskiy Mehanizator*. 1996;2:21–22. (In Russ.)
11. Redchic DA. Aerodynamics of Savonius three-bladed

rotor. *Vestnik dvigatelestroeniya*. 2009;3:71–76.

12. Polyakov PYu, Vasil'chuk DF. Experimental study and development of a mathematical model of a wind turbine with a vertical axis of rotation. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2008;9:53–58. (In Russ.)
13. Sabinin GH. The theory of ideal wind turbine. *Trudy Central'nogo AeroGidrodinamicheskogo Instituta = Proceedings of Central Aerohydrodynamic Institute*. Issue 32. Moscow: Tipo-Litografiya V.T.U. imeni T. Dunaeva; 1927, 27 p. (In Russ.)
14. Shefter Yal. Using wind energy. Moscow: Energoatomizdat; 1983, 200 p. (In Russ.)
15. Khozyainov BP. The ways to achieve leadership in wind energy. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2018;(22-24):59–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.22-24.059-067>
16. Khozyainov BP. Experimental and analytical studies of vertical axis wind turbines. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2018;(22-24):51–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.22-24.051-058>
17. Hozyainov BP. Analysis of the effect of vertical axis wind turbine weight on turbine operation efficiency. *Promyshlennaya energetika*. 2020;2:60–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.34831/EP.2020.99.69.008>
18. Hozyainov BP. Influence of geometric parameters on vertical axis wind turbine efficiency. *Promyshlennaya energetika*. 2020;1:44–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.34831/EP.2020.39.11.008>
19. Hozyainov BP, Hozyainov DB, Lobanova MB. Control method of the magnitude of vertical axis wind turbine torque and angular rotation speed. Patent RF, no. 2502893; 2013. (In Russ.)
20. Hozyainov BP, Hozyainov DB, Lobanova MB. Wind turbine with air-carrying structures and variable dimensions of blades. Patent RF, no. 2722792; 2020. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Хозяинов Борис Петрович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры строительных конструкций,
водоснабжения и водоотведения,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева,
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия;
✉ e-mail: khozyainov-bp@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris P. Khozyainov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Building
Structures, Water Supply and Sanitation,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennaya St., Kemerovo 650000, Russia;
✉ e-mail: khozyainov-bp@mail.ru

Свистунова Татьяна Николаевна,
кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры производственного менеджмента,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева,
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия;
e-mail: svtnick2007@rambler.ru

Tatyana N. Svistunova,
Cand. Sci. (Economics), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Production
Management,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennaya St., Kemerovo 650000, Russia;
e-mail: svtnick2007@rambler.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.09.2020; одобрена после рецензирования 04.11.2020; принята к публикации 18.12.2020.

Information about the article

The article was submitted 24.09.2020; approved after reviewing 04.11.2020; accepted for publication 18.12.2020.