

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ*****Б.П. Хозяинов**Кузбасский государственный технический университет им. П.Т. Горбачева
д. 28, ул. Весенняя, Кемерово, 650000, Россия
тел.: +7(3842)39-63-31; e-mail: khozyainov-bp@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.22-24.051-058

Заключение совета рецензентов: 15.12.16 Заключение совета экспертов: 10.05.17 Принято к публикации: 12.03.18

В статье приводятся экспериментальные и аналитические исследования трехлопастной ветроэнергетической установки. Дана методика определения угловой скорости вращения ветротурбины в зависимости от скорости ветра, вращающего момента и ее мощности. Выполнено сравнение результатов вычислений по предлагаемым формулам с показателями испытаний ветротурбины, выполненных в природных условиях. Испытания проводились при скоростях ветра от 0,709 м/с до 6,427 м/с.

Известно, что коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ) для идеальной традиционной установки составляет 0,45. По результатам аналитических вычислений коэффициент использования энергии ветра ветротурбины, оборудованной 3-мя стеклопластиковыми лопастями и 6-ю ветронаправляющими экранами, при скорости ветра от 0,709 м/с до 6,427 м/с составил 0,317, а в диапазоне скоростей от 0,709 м/с до 4,5 м/с – 0,351, при этом значение экспериментального коэффициента значительно больше.

Анализ изменения КИЭВ показал, что работа установки с ветронаправляющими экранами при незначительных средних скоростях воздушного потока в заданный период времени оказалась более эффективной, чем работа без этих направляющих. С увеличением скорости воздушного потока значение КИЭВ постепенно снижалось. Такое близкое совпадение экспериментальных данных с аналитическими вычислениями подтверждается сравнением расчетного критерия Фишера с его табличными значениями. Это позволит при проектировании ветротурбин определять их мощность, задавать геометрические параметры и массу всех деталей и обеспечит их эффективную работу.

Ключевые слова: ветротурбина; вертикальная ось; угловая скорость вращения; вращающий момент; мощность; эффективность.

**EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDIES
OF VERTICAL AXIS WIND TURBINES****B.P. Khozyainov**T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
28 Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russia
tel.: +7 (3842) 39 63 31, e-mail: khozyainov-bp@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.22-24.051-058

Referred 15 December 2016 Received in revised form 10 May 2017 Accepted 12 March 2018

The article carries out the experimental and analytical studies of three-blade wind power installation and gives the technique for measurements of angular rate of wind turbine rotation depending on the wind speeds, the rotating moment and its power. We have made the comparison of the calculation results according to the formulas offered with the indicators of the wind turbine tests executed in natural conditions. The tests were carried out at wind speeds from 0.709 m/s to 6.427 m/s.

The wind power efficiency (WPE) for ideal traditional installation is known to be 0.45. According to the analytical calculations, wind power efficiency of the wind turbine with 3-bladed and 6 wind guide screens at wind speeds

*Хозяинов Б.П. Экспериментальные и аналитические исследования вертикально-осевой ветроэнергетической установки // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;22-24:51-58.



from 0.709 to 6.427 is equal to 0.317, and in the range of speed from 0.709 to 4.5 m/s – 0.351, but the experimental coefficient is much higher.

The analysis of WPE variations shows that the work with the wind guide screens at insignificant average air flow velocity during the set period of time appears to be more effective, than the work without them. If the air flow velocity increases, the wind power efficiency gradually decreases.

Such a good fit between experimental data and analytical calculations is confirmed by comparison of F-test design criterion with its tabular values. In the design of wind turbines, it allows determining the wind turbine power, setting the geometrical parameters and mass of all details for their efficient performance.

Keywords: wind turbine; vertical axis; angular speed of rotation; the rotating moment; power; efficiency.



*Борис Петрович
Хозяинов
Boris Khozainov*

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент Кузбасский государственный технический университет им. П.Т. Горбачева

Образование: Кузбасский государственный технический университет им. П.Т. Горбачева (1968 г.).

Награды: Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, Почетный строитель России.

Область научных интересов: разработка и исследование новых конструкций ветроэнергетических установок, работающих при малых скоростях ветра; исследование аэродинамики новых конструкций лопастей ветродвигателей; разработка устройств, усиливающих скорость воздушного потока в объеме ветротурбины; разработка конструкций установок, использующих энергию морских и речных течений.

Публикации: 68, из них 1 монография, 11 патентов РФ на изобретения, 2 свидетельства на полезную модель.

h-index 4; ORCID 0000 0002 0141 8084

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Education: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 1968.

Awards: Honorary Figure of Higher Education of Russian Federation, Honorary Builder of Russian Federation.

Research interests: development and research of new designs of wind-powered engines, operating at low wind speeds; research of aerodynamics of new wind-powered blades designs; development of devices, increasing air flow velocity in wind turbine; development of design of installations, using sea and river current energy.

Publications: 68, including 1 monograph, 11 Russian Federation patents for inventions and 2 utility model certificates.

1. Введение

Ученые многих стран занимаются разработкой новых конструкций ветротурбин и методик по определению их мощности [1, 2]. По прогнозам М. Jakubowski к 2060 г. более 70 % необходимой человечеству энергии будет производиться за счет возобновляемых источников, но уже сейчас в Швеции, Швейцарии, Австрии,

Норвегии и Канаде вклад возобновляемых источников энергии в энергетику этих стран превысил 25 % [3]. Определенное внимание к ветроэнергетике наблюдается и в России [4, 5]. При разработке конструкций ветротурбин для территории нашей страны необходимо учитывать ветровой режим, который значительно отличается от большинства стран, расположенных в прибрежных морских зонах (рис. 1).



Рис. 1 – Ветровые энергоресурсы России
Fig. 1 – Wind energy resources of Russia

Анализ карты указывает на то, что существующие конструкции ветротурбин можно применять только в районах, которые мало заселены. Для того чтобы использовать ветротурбины на всей территории России, требуется разработать новые конструкции, которые будут способны функционировать при малых скоростях ветра. Запуск ветротурбин при малых скоростях ветра характерен для установок типа Савониуса. Исследования таких установок проводились, например в [6]: одна из установок состояла из 2-х вставленных одна в другую полуокружности, а в другой были объединены установки Савониуса и Дарье, при этом модели данных установок были выполнены в упрощенном виде. В результате исследований было выявлено, что коэффициент полезного действия моделей составляет $15 \div 20 \%$, а мощность достигает 30 Вт/м^2 .

В Кузбасском государственном техническом университете создана усовершенствованная ветротурбина типа Савониуса с вертикальной осью вращения,

работа которой основана на принципе дифференциального лобового сопротивления с высокими аэродинамическими характеристиками – четырехлопастная ветротурбина начинает работать при скорости ветра от $0,5 \text{ м/с}$, а трехлопастная – от $1,0 \text{ м/с}$. Анализ материалов [1–6] показал, что необходимо создать новую более эффективную ветротурбину с вертикальной осью вращения, оборудованную лопастями, использующими принцип дифференциального лобового сопротивления.

В данной работе впервые обозначаются направления дальнейшего развития ветроэнергетики с применением новых ветротурбин, эффективно работающих в условиях малых скоростей ветра. Для этих ветротурбин предлагается аналитическое вычисление угловой скорости вращения, вращающего момента, мощности и сравнение их с экспериментальными показателями.



Список обозначений	
<u>Буквы греческого алфавита</u>	
α	Уровень значимости при сравнении критерия Фишера
ρ	Плотность воздуха
ω	Угловая скорость вращения ветротурбины
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
b	Ширина лопасти при обдувании ее воздушным потоком с поворотом на 360°
C	Средний аэродинамический коэффициент лопасти
F	Критерий Фишера
K_z	Коэффициент заполнения объема ветротурбины лопастями
$K_{\text{экp}}$	Коэффициент увеличения скорости воздушного потока в объеме ветротурбины с помощью ветронаправляющих экранов
M	Оптимальный вращающий момент ветротурбины
M	Сумма моментов, препятствующих вращению ветротурбины
m	Масса i -й части ветротурбины и крепежных деталей
N	Мощность ветротурбины, Вт
n	Количество лопастей в ветротурбине
R	Радиус ветротурбины
R	Усредненное расстояние от центров тяжести частей ветротурбины до оси вращения
S	Площадь
U	Скорость воздушного потока
<u>Индексы нижние</u>	
1	Для определения массы воздушного потока, проходящего через миделевую площадь сечения ветротурбины $b_i = 1\text{м}$
L	Расстояние от центра тяжести активной площади лопасти до оси вращения ветротурбины
L_{CP}	Средняя площадь лопасти при обдувании ее с поворотом вокруг вертикальной оси на угол 360°
x_a	Обдувание лопасти с поворотом вокруг вертикальной оси на угол 360°
BP, O	Оптимальный вращающий момент ветротурбины
BX	Входная
BYX	Выходная
3	Заполнение объема ветротурбины лопастями
PR	Природная
p	Расчетный
cp	Средняя
T	Ветротурбина
T_i	Расстояние от центра массы i -й детали ветротурбины до оси ее вращения
TA	Ветротурбина без ветронаправляющих экранов (аналитически)
$TREN$	Момент трения качения в подшипниках, моменты трения деталей ветротурбины, мультипликатора и т.п.
t	Табличный
ЭКP	Ветронаправляющие экраны

2. Теоретический анализ

Были проведены исследования по разработке методик вычисления угловой скорости вращения ветротурбины [7], вращающего момента и мощности [8]. Как указывалось в статье [7], формула для вычисления угловой скорости вращения ветротурбины была выведена из равенства кинетических энергий поступательного движения воздушного потока, проходящего через миделевое сечение ветротурбины и вращающейся ветротурбины. При выводе формулы для вычисления значения вращающего момента учитывались: ветровое давление, аэродинамический коэффициент лопасти и ее площадь, количество лопастей, угловая скорость вращения, расстояние от центра активной площади лопасти. Поскольку ранее не все факторы были учтены, в настоящей статье приводятся дополнительные результаты экспериментального и аналитического исследования.

3. Экспериментальная часть

Были проведены многочисленные испытания моделей в аэродинамической трубе и установки в натур-

ных условиях при различном количестве лопастей с наличием ветронаправляющих экранов, концентрирующих воздушный поток на лопастях ветротурбины, и при их отсутствии. Результаты испытаний были учтены при разработке методик по вычислению угловой скорости вращения ветротурбины и вращающего момента, что позволило экспериментально определить мощность ветротурбины и ее эффективность. При испытаниях были учтены основные величины, характеризующие свойства ветроустановок [9].

Исследования проводились на ветротурбине с геометрическими, весовыми и аэродинамическими параметрами, описанными в работе [10]. В этой же публикации была предложена методика вычисления скорости воздушного потока в объеме ветротурбины. Методики вычислений угловой скорости вращения ветротурбины, вращающего момента и мощности разрабатывались на основе [11, 12]. Значительную помощь при выводе аналитических формул оказали материалы [13]. В качестве трубки тока приняты ветронаправляющие экраны, где отношение площади входного отверстия в объем ветронаправляющих экранов к площади выходного отверстия составляет $S_{ВХ}/S_{ВЫХ}$ (рис. 2 и 3).

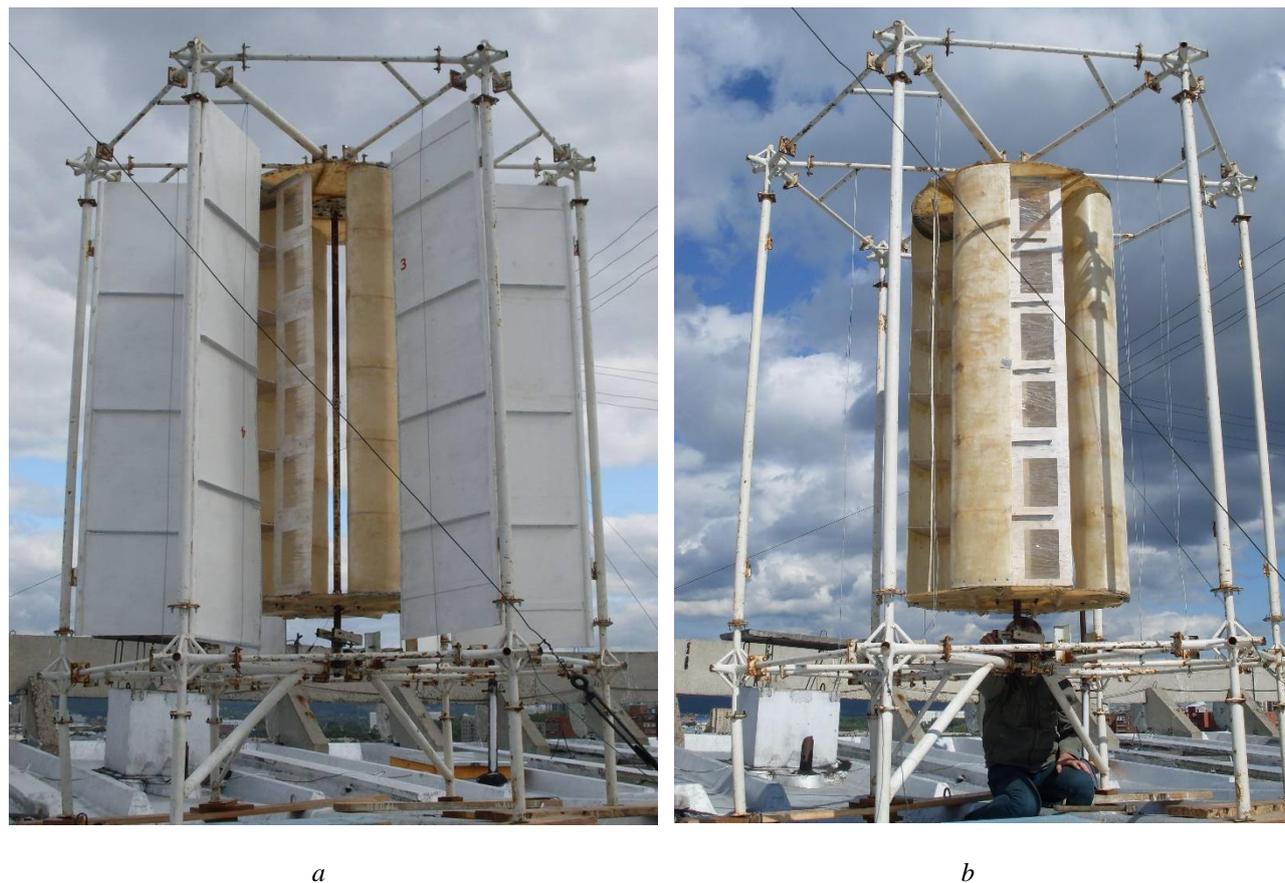


Рис. 2 – Опытные установки на крыше жилого дома: *a* – 3-лопастная установка с 6-ю ветронаправляющими экранами (ЗБСПЛ+6Э); *b* – 4-х лопастная установка без ветронаправляющих экранов (4БСПЛ)
Fig. 2 – The pilot installations on a house roof: *a* – 3-bladed installation with 6 wind guide screens (ЗБСПЛ+6Э); *b* – 4-bladed installation without wind guide screens (4БСПЛ)

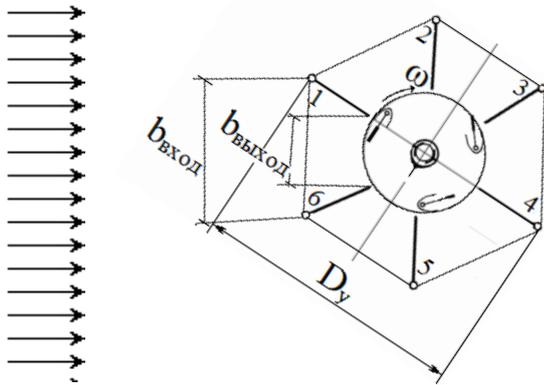


Рис. 3 – План ветротурбины с ветронаправляющими экранами

Fig. 3 – The layout of the wind turbine with wind guide screens

В результате исследований была выведена уточненная формула:

$$U_T = U_{\text{пр}} \cdot K_{\text{экр}}, \quad (1)$$

где U_T – скорость воздушного потока в объеме ветротурбины; $U_{\text{пр}}$ – скорость ветра; $K_{\text{экр}}$ – коэффициент увеличения скорости воздушного потока в объеме ветротурбины с помощью ветронаправляющих экранов, определяемый по формуле:

$$K_{\text{экр}} = \frac{S_{\text{вх}}}{S_{\text{вых}}} (1 - K_3). \quad (2)$$

Здесь K_3 – коэффициент заполнения объема ветротурбины лопастями, который рассчитывается следующим образом:

$$K_3 = \frac{b_{\text{ср}} \cdot n}{2 \cdot \pi \cdot R_T}, \quad (3)$$

где $b_{\text{ср}}$ – средняя ширина лопасти при обдувании ее воздушным потоком с поворотом на 360° ; n – количество лопастей в ветротурбине; R_T – радиус ветротурбины.

С учетом этого формула по вычислению угловой скорости вращения ветротурбины, приведенная в источниках [8, 9], будет выглядеть следующим образом:

$$\omega = \frac{U_{\text{пр}} \cdot K_{\text{экр}}}{R_{T1}} \sqrt{\frac{C_{x\alpha} \cdot \rho \cdot S_T \cdot b_1}{\sum_{i=1}^n m_{Ti}}} \quad (4)$$

где R_{T1} – усредненное расстояние от центров тяжести частей ветротурбины до оси вращения, которое можно определить по формуле:

$$R_{T1} = \frac{\sum_{i=1}^n m_{Ti} \cdot R_{Ti}}{\sum_{i=1}^n m_{Ti}}; \quad (5)$$

где R_{Ti} – расстояние от центра массы i -й детали ветротурбины до оси ее вращения; m_{Ti} – масса i -й части ветротурбины и крепежных деталей; $C_{x\alpha}$ – средний аэродинамический коэффициент лопасти при обдувании ее с поворотом вокруг вертикальной оси на угол 360° ; ρ – плотность воздуха; S_T – площадь миделевого сечения ветротурбины; $b_1 = 1$ м для определения массы воздушного потока, проходящего через миделевую площадь сечения ветротурбины.

Изменилась и формула для вычисления вращающего момента, представленная в источниках [2, 4–6]:

$$M_{\text{вр,0}} = \frac{\rho (U_{\text{пр}} \cdot K_{\text{экр}} - \omega \cdot R_L)^2}{2} C_{x\alpha} S_{L,\text{ср}} n R_L - M_{\text{трени}}, \quad (6)$$

где R_L – расстояние от центра тяжести активной площади лопасти до оси вращения ветротурбины; $S_{L,\text{ср}}$ – средняя площадь лопасти при обдувании ее с поворотом вокруг вертикальной оси на угол 360° ; $M_{\text{трени}}$ – сумма моментов, препятствующих вращению ветротурбины (момент трения качения в подшипниках; моменты трения деталей ветротурбины, мультипликатора, генератора и т.п.).

Выяснив значения вращающего момента и угловой скорости вращения ветротурбины, вычисляем ее мощность:

$$N = M_{\text{вр}} \cdot \omega, \quad (7)$$

где значения $M_{\text{вр,0}}$ и ω вычислены по формулам (4) и (6).

4. Результаты и их обсуждение

Для установления пригодности выведенных формул необходимо сравнить вычисленные показатели с экспериментальными данными, полученными при испытании трехлопастной ветротурбины. Испытания проводились при радиально расположенных ветронаправляющих экранах и стационарно закрепленных по оси симметрии лопасти стабилизирующих плоскостях.

На рис. 4 представлен график угловой скорости вращения ветротурбин ЗБСПЛ+6Э (с ветронаправляющими экранами) и ЗБСПЛ (без ветронаправляющих экранов), полученной с помощью экспериментальных и аналитических методов. Дополнительный



индекс «Э» указывает на экспериментальные данные, а индекс «А» – на аналитические вычисления.

Установки оборудованы 3-мя стеклопластиковыми лопастями с коэффициентом заполнения объема ветротурбины лопастями $K_3 = 0,394$ и весом ветротурбины $S_T = 2,0 \text{ м}^2$. Более подробная информация приведена в [10]. Обработка 63 точек экспериментальных данных и расчётных показателей установ-

ки ЗБСПЛ+6Э при сравнении расчетного критерия Фишера с его табличными значениями соответствует: $F_p = 1,493 < F_T = 1,54$; проверка проводилась при $\alpha = 0,05$. Коэффициент корреляции составил $r = 0,834$. Обработка 50 точек экспериментальных данных и вычисленных показателей установки ЗБСПЛ при сравнении расчетного критерия Фишера с его табличными значениями соответствует: $F_p = 1,001 < F_m = 1,6$; проверка проводилась: $\alpha = 0,05$.

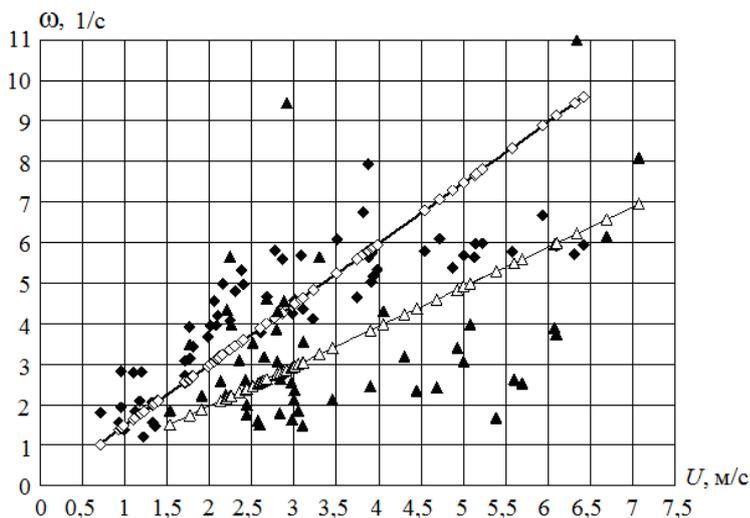


Рис. 4 – График теоретических и экспериментальных значений угловой скорости вращения ветротурбин:
 ◆ – ЗБСПЛ+6Э Э; —◆— ЗБСПЛ+6Э А;
 ▲ – ЗБСПЛ Э; —▲— ЗБСПЛ А
Fig. 4 – Experimental and analytical values of the wind turbines rotation:
 ◆ – ЗБСПЛ+6Э Э; —◆— ЗБСПЛ+6Э А;
 ▲ – ЗБСПЛ Э; —▲— ЗБСПЛ А

На рис. 5 представлен график вращающего момента ветротурбин перечисленных установок, значения которого были получены экспериментально и рассчитаны аналитически. Обработка 63 точек экспериментальных и расчетных показателей установки ЗБСПЛ+6Э при сравнении расчетного критерия Фишера с его табличными значениями соответству-

ет: $F_p = 1,083 < F_T = 1,54$; проверка проводилась при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Обработка 50 точек экспериментальных и расчётных показателей установки ЗБСПЛ при сравнении расчетного критерия Фишера с его табличными значениями соответствует: $F_p = 1,578 < F_T = 1,6$; проверка проводилась при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

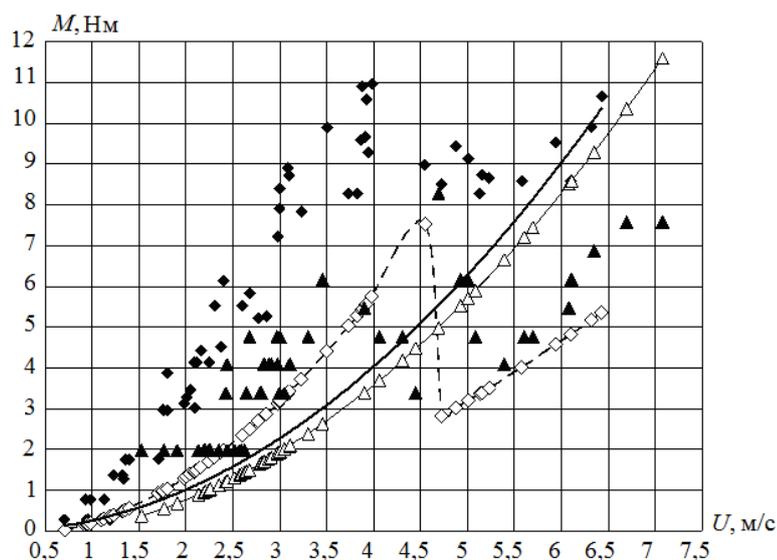


Рис. 5 – График теоретических и экспериментальных значений вращающего момента ветротурбин:
 ◆ – ЗБСПЛ+6Э Э; —◆— ЗБСПЛ+6Э А;
 ▲ – ЗБСПЛ Э; —▲— ЗБСПЛ А;
 — линия тренда (ЗБСПЛ + 6Э А)
Fig. 5 – Layout of the experimental and analytical values of rotating moment of wind turbines:
 ◆ – ЗБСПЛ+6Э Э; —◆— ЗБСПЛ+6Э А;
 ▲ – ЗБСПЛ Э; —▲— ЗБСПЛ А;
 — trend line (ЗБСПЛ + 6Э А)

Следует отметить, что при скорости $U_{ПР} = 4 \text{ м/с}$ ветронаправляющие экраны начинают препятствовать прохождению воздушного потока к ветротурби-

не. Это замечено по экспериментальным показателям (см. рис. 4 и 5) и при замерах скорости воздушного потока анемометрами. Поэтому принято решение

при $U \geq 4,5$ м/с использовать $K_{ЭКР} = 1,11$, соответствующий экспериментальным показателям. Этим объясняется скачок графика аналитических вычислений для установки ЗБСПЛ+6Э.

На рис. 6 представлен график мощности ветротурбин перечисленных установок, значения которой были получены экспериментально и рассчитаны аналитически. Обработка 63 точек показала, что для установки

ЗБСПЛ+6Э показатель расчетного критерия Фишера в сравнении с его табличными значениями соответствует: $F_p = 1,454 < F_T = 1,54$, проверка проводилась при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Обработка 50 точек показала, что для установки ЗБСПЛ сравнение показателя расчетного критерия Фишера с его табличным значением соответствует: $F_p = 1,582 < F_T = 1,6$, проверка проводилась при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

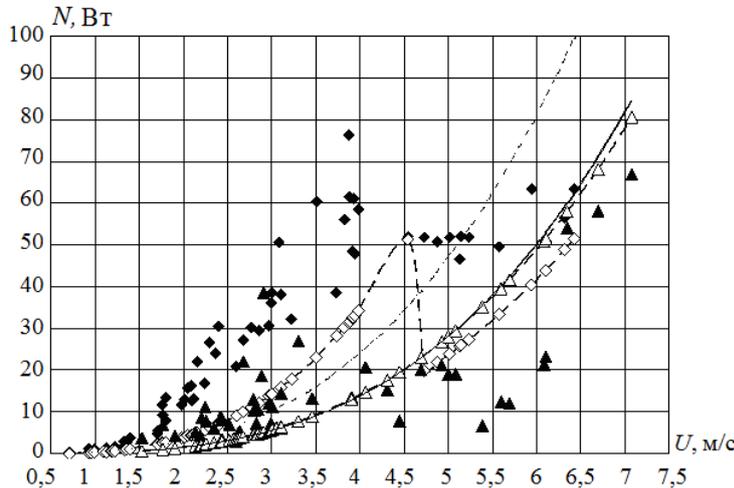


Рис. 6 – График теоретических и экспериментальных значений мощности ветротурбин:
 ◆ – ЗБСПЛ+6Э Э; ◊ – ЗБСПЛ+6Э А;
 ▲ – ЗБСПЛ Э; ▴ – ЗБСПЛ А;
 --- линия тренда (ЗБСПЛ + 6Э А)
 — линия тренда (ЗБСПЛ)
Fig. 6 – Layout of the experimental and analytical values of wind turbines power:
 ◆ – ЗБСПЛ+6Э Э; ◊ – ЗБСПЛ+6Э А;
 ▲ – ЗБСПЛ Э; ▴ – ЗБСПЛ А;
 --- trend line (ЗБСПЛ + 6Э А)
 — trend line (ЗБСПЛ)

С помощью уравнения (6) относительно U_T можно вычислить скорость воздушного потока в объеме ветротурбины без ветронаправляющих экранов при запуске ее в работу ($U_{ТА}$).

$$U_{TA} = \sqrt{\frac{2}{(\rho \cdot C_{xa} \cdot S_{L,CP} \cdot n \cdot R_L) - M_{ТРЕН}}}, \quad (8)$$

Скорость ветра для ветротурбины с ветронаправляющими экранами определяется по формуле:
 – для трехлопастной ветротурбины без ветронаправляющих экранов

$$U_{T,А} = \sqrt{\frac{2}{(1,225 \cdot 0,882 \cdot 0,7314 \cdot 3 \cdot 0,375) - 0,179}} = \sqrt{\frac{2}{0,88902}} = \sqrt{2,249668} = 1,499889 \approx 1,5 \text{ м/с},$$

где $U_{T,А} = 1,5$ м/с – скорость воздушного потока, рассчитанная аналитически; $U_{T,Э} = 1,8$ м/с – экспериментально зафиксированная скорость ветра; $K_{ЭКР} = 1,46$;
 – для трехлопастной ветротурбины с ветронаправляющими экранами с помощью формулы (1) получим

$$U_{ПР,А} = \frac{1,5}{1,46} = 1,027 \text{ м/с} \approx U_{ПР,Э} = 0,709 \text{ м/с}.$$

Незначительное расхождение теоретических расчетов скорости воздушного потока и эксперимен-

тальных данных объясняется наличием небольшой турбулентности воздушного потока и неточностью измерения его скорости.

5. Заключение

Предлагаемая конструкция ветротурбины способна уверенно работать при скоростях от 1,0 м/с до 15,0 м/с.

Ветроэнергетическая установка с ветронаправляющими экранами работает более эффективно в условиях ветрового режима нашей страны. Аналитические показатели коэффициента использования энергии ветра ветротурбины ЗБСПЛ+6Э при скорости ветра от 0,709 м/с до 6,427 м/с составляют 0,317, а в диапазоне скоростей от 0,709 м/с до 4,5 м/с – 0,351, но экспериментальный коэффициент значительно выше.

При малых скоростях ветра (от 0,7 м/с до 4,5 м/с) ветронаправляющие экраны усиливают скорость воздушного потока в объеме ветротурбины, поэтому установка работает наиболее эффективно. При скоростях ветра (от 4,5 м/с до 15,0 м/с) ветронаправляющие экраны могут работать во флюгерном режиме. При больших скоростях (более 15,0 м/с) ветронаправляющие экраны могут полностью закрыть ветротурбину, предотвращая ее разрушение.

Предлагаемая методика вычисления угловой скорости вращения ветротурбины, вращающего момента и мощности хорошо совпадает с экспериментальными данными, полученными при испытании установок в натуральных условиях. На это указывает сравнение показателей расчетного критерия Фишера с его табличными значениями.



Список литературы

References

[2] Шефтер, Я.И. Использование энергии ветра / Я. И. Шефтер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 201 с.

[3] Перминов, Э.М. О состоянии и перспективах нетрадиционной электроэнергии // *Энергетик*. – 1998. – № 10. – С. 13–14.

[3] Jakubowski, M. Unit energy evolves strategies for a industry of renewable energy / M. Jakubowski. – *Energy*, 2000. – P. 50–59.

[4] Семкин, Б.В. Использование возобновляемых энергоресурсов в малой энергетике / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // *Теплоэнергетика*. – 1996. – № 2. – С. 6–7.

[5] Фатеев, Е.М. Ветродвижатели и ветроустановки / Е.М. Фатеев. – Москва: ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. – 544 с.

[6] Simoes, M.G. Fuzzy Logic Based Intelligent Control of a Variable Speed Cage Machine Wind Generation System / M.G. Simoes, B.K. Bose, R.J. Spiegel // *IEEE transactions on power electronics*. – 1997. – Vol. 12. – No. 1. – P. 87–95.

[7] Хозяинов, Б.П. Вычисление угловой скорости вращения ветротурбины с вертикальной осью / Б.П. Хозяинов // *Энергетик*. – 2011. – № 5. – С. 28–30.

[8] Хозяинов, Б.П. Методика определения мощности ветротурбины с вертикальной осью вращения / Б.П. Хозяинов // *Энергетик*. – 2013. – № 1. – С. 47–49.

[9] Сабинин, Г.Х. Основные величины, характеризующие свойства ветряных двигателей / Г.Х. Сабинин // *Труды Центр. аэрогидродинамический ин-т*. – М., 1923. – Вып. 2. – С. 66–72.

[10] Хозяинов Б.П. Разработка вертикально-осевых ветрогенераторов, способных эффективно работать в условиях ветрового режима России / Б.П. Хозяинов, Ю.А. Фадеев // *Вестн. ИрГТУ-Иркутск*. – 2017. – № 11. – С. 123–131.

[11] Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик: под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.: ил.

[12] Каликов, В.Н. Моделирование взаимодействия ветра с различными инженерными и природными объектами в аэродинамических трубах / В.Н. Каликов [и др.] // *Механика жидкости и газа*. VINITI. М., 1986. – Т. 20. – С. 139–209.

[13] Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Д. Твайделл, А. Уэйр; пер. с англ. под ред. В.А. Коробкова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.

[1] Shefter Ya. I. Wind Energy Use (Ispolzovanie energii vetra): 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1983; 201 p. (in Russ.).

[2] Perminov E.M. On the state and prospects of unconventional electricity (O sostoyanii i perspektivakh netraditsionnoi elektroenergii). *Energetik*, 1998;10:1314 (in Russ.).

[3] Jakubowski M. Unit energy evolves strategies for a industry of renewable energy. *Energy*, 2000; p. 50–59.

[4] Semkin B.V., Stal'naya M.I., Svit P.P. The use of renewable energy resources in the small energy sector (Ispolzovanie vozobnovlyaemykh energoresursov v maloi energetike). *Heat Power Engineering*, 1996;(2):6–7.

[5] Fateev E.M. Wind turbines and wind installations (Vetrodvigateli i vetroustanovki). Moscow: OGI-ZSELKHOZGIZ, 1948; 544 p. (in Russ.).

[6] Simoes M.G., Bose B.K., Spiegel R.J. Fuzzy Logic Based Intelligent Control of a Variable Speed Cage Machine Wind Generation System. *IEEE transactions on power electronics*, 1997;12(1):87–95

[7] Khozyainov B.P. Calculation of the rotating wind turbine moment with a vertical axis (Vychislenie uglovoi skorosti vrashcheniya vetroturbiny s vertikalnoi osyu). *Energetik*, 2013;(1):47–49 (in Russ.).

[8] Khozyainov B.P. Method for determining of the wind turbine power with a vertical axis of rotation (Metodika opredeleniya moshchnosti vetroturbiny s vertikalnoi osyu vrashcheniya). *Energetik*, 2011(5):28–30 (in Russ.).

[9] Sabinin G.H. Basic quantities characterizing the properties of wind turbines (Osnovnye velichiny kharakterizuyushchie svoistva vetryanykh dvigatelei). *Proceedings of Centre. Aerohydrodynamic Institute*, 1923;2:66–72 (in Russ.).

[10] Khozyainov B.P., Fadeev Y. Development of vertical-axis wind turbine that can effectively operate in terms of the wind regime of Russia (Razrabotka vertikalnoosevykh vetrogeneratorov sposobnykh effektivno rabotat v usloviyakh vetrovogo rezhima Rossii). *Vestn. ISTU-Irkutsk*, 2017;(11):123–131 (in Russ.).

[11] Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistances (Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam). Ed. M.O. Steinberg. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1992; 672 p. (in Russ.).

[12] Kalikov V.N. *et al.* Simulation of wind interaction with various engineering and natural objects in wind tunnels (Modelirovanie vzaimodeistviya vetra s razlichnymi inzhenernymi i prirodnyimi obektami v aerodinamicheskikh trubakh) // *Mehanika zhidkosti i gaza*. VINITI, 1986;20:139–209 (in Russ.).

[13] Twidell J., Ware A. Renewable energy sources (Vozobnovlyaemye istochniki energii). Ed. V.A. Korobkov. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990; 392 p (in Russ.).

Транслитерация по BSI

