

УДК 620.9

**Ж.Т. Камбарова, А.Р. Алибекова, М.М. Тургунов,
Е.К. Кусаинов, Г.А. Ранова**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕУГОЛЬНОЙ ЛОПАСТИ ВЕТРОТУРБИНЫ ДЛЯ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ ВЕТРА

Разработан экспериментальный макет ветротурбины с динамически изменяемой формой поверхности лопастей, а также определены и рассчитаны значения силы лобового сопротивления.

Ключевые слова: ветротурбина, лопасть, аэродинамическая характеристика, число Рейнольдса, угол атаки, сила лобового сопротивления.

Преимущество парусных ветродвигателей в том, что они обладают способностью вырабатывать электрическую энергию при слабом ветре. Достаточно потока ветра со скоростью 3–5 м/с, чтобы ветротурбина парусного типа вырабатывала электроэнергию, в то время как ветродвигатели лопастного винтового типа в таких условиях стоят неподвижно. Сравнивая лопасти классических мельниц с парусными, можно сказать, что парусные лопасти проще в изготовлении. Парус имеет качество – мгновенно подстраивается под направление и силу потока ветра. Также ветродвигатели парусного типа имеют ряд достоинств: экологичность, низкая стоимость, способность использовать энергию слабых ветров, отсутствие вибраций и шума. Первыми ветродвигателями, эффективно преобразующими энергию приповерхностных ветров малой скорости в энергию механического движения судов по водной поверхности, были паруса различной формы, в том числе треугольной. Парусные ветродвигатели обладают уникальной особенностью – они одинаково эффективно работают как при малых значениях скорости ветра, так и при больших за счет динамически изменяемой формы рабочей поверхности под воздействием потока ветра.

Физические основы работы ветротурбины с динамически изменяемой формой поверхности лопастей

Авторами настоящей работы была разработана ветротурбина парусного типа треугольной формы лопастей. Новизной работы является использование в качестве силовых элементов лопастей ветротурбины с динамически изменяемой формой поверхностей, выполненных в виде треугольного гибкого паруса с подвижным концом. На рис. 1 представлена схема работы ветротурбины с динамически изменяемой формой поверхности лопастей.

Ветротурбина работает следующим образом: под воздействием потока ветра треугольная лопасть ветротурбины, расположенная под углом к направлению движения потока ветра, испытывает боковую силу давления и согласно законам аэродинамики толкает каркас, приводя его во вращательное движение. Появляющаяся сила является силой тяги лопасти, преобразующей энергию ветра во вращательное движение ветротурбины. При изменении направления ветра на противоположное направление вращения оси предлагаемой авторами ветротурбины не изменяется (рис. 2).

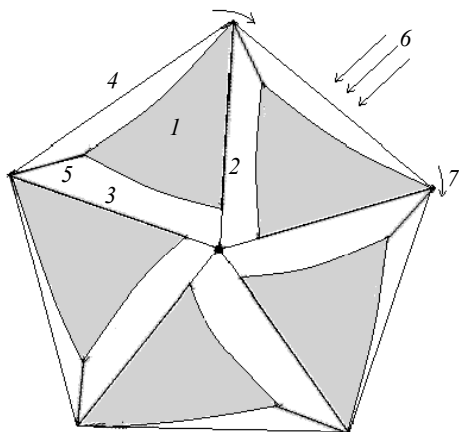


Рис. 1. Схема работы ветротурбины с динамически изменяемой формой поверхности лопастей: 1 – лопасть ветротурбины с динамически изменяемой формой; 2, 3, 4 – каркас; 5 – регулируемое гибкое крепление подвижного конца лопасти, изготовленное из крепкой нити; 6 – направление ветра; 7 – направление вращения ветротурбины

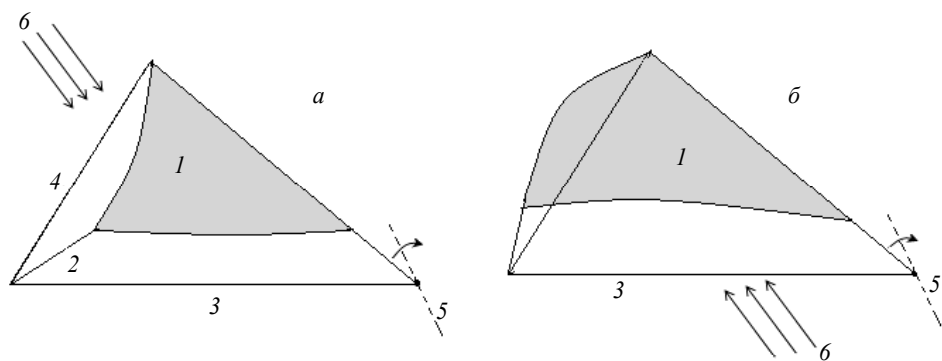


Рис. 2. Схема работы лопасти ветротурбины при прямом (а) и обратном (б) направлениях ветра

Как показано на рис. 2, лопасть 1 с динамически изменяемой формой поверхности за счет воздействия ветра, выполненная в виде треугольного «паруса» с подвижным концом, при изменении направления ветра перекидывается в другую сторону вращающегося каркаса ветротурбины, тем самым обеспечивается сохранение первоначального направления вращения оси ветротурбины. На рис. 2 приведены следующие обозначения: 1 – лопасть ветротурбины, 2 – гибкое крепление подвижного конца лопасти, изготовленное из капроновой (парашютной) нити, 3, 4 – стержни каркаса ветротурбины, 5 – ось вращения и изогнутая стрелка – направление вращения оси ветротурбины, 6 – стрелками показано направление ветра. Работа лопасти при прямом и обратном направлениях ветра обозначены буквами а и б соответственно.

Предлагаемая ветротурбина, за счет саморегулируемой формы поверхности лопастей, под действием прямого потока ветра и радиального потока при враща-

тельном движении обладает оптимальными аэродинамическими характеристиками. Ветротурбина в потоке ветра является самоорганизованным устройством, эффективно преобразующим энергию ветра в энергию вращательного движения. Гибкость конструкции обеспечивает минимальность аэродинамических сопротивлений, а также приводит к росту коэффициента использования ветра.

В широком диапазоне изменения направления ветра ветротурбина сохраняет работоспособность. При этом изменение направления ветра на противоположное не изменяет направления вращения оси ветротурбины. Это также является положительным эффектом, обладающим удобством при эксплуатации.

Имеется возможность поддержания постоянства оборотов ветротурбины при изменении скорости ветра путем изменения длины крепежных нитей подвижного конца лопастей в зависимости от скорости ветра.

Определение значения силы лобового сопротивления в зависимости от различных параметров

Для оценки эффективности преобразования энергии ветра в энергию вращательного движения проведены ряд исследований по определению аэродинамических характеристик одной лопасти уменьшенного экспериментального макета, выполненной в виде треугольного «паруса» с подвижным концом.

При экспериментах макет ветротурбины обтекался воздушным потоком при различных скоростях. Для этого уменьшенный макет ветродвигателя парусного типа был установлен в рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М. На рис. 3 показано расположение экспериментального макета ветротурбины в рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М.

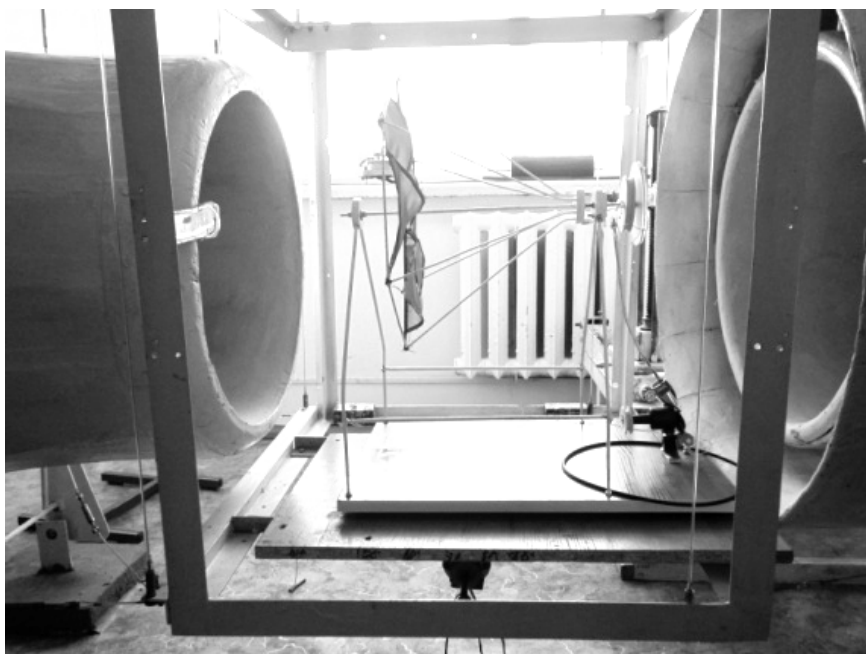


Рис. 3. Расположение экспериментального макета ветротурбины в рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М

Треугольная парусная лопасть уменьшенного экспериментального макета с подвижным концом была установлена в рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М и закреплена к раме аэродинамических весов с помощью тонких металлических растяжек для уменьшения сопротивления вспомогательных элементов. Аэродинамические весы позволяют измерять силу лобового сопротивления, подъёмную силу и крутящий момент оси ветротурбины. У треугольного паруса основная площадь и, следовательно, нагрузка сосредоточены в нижней трети.

На рис. 4, а представлена зависимость силы лобового сопротивления от скорости воздушного потока одной парусной лопасти с подвижным концом макета ветротурбины. Из графика видно, что при увеличении скорости потока ветра возрастает сила лобового сопротивления. Таким образом, сила лобового сопротивления прямо пропорциональна скорости потока ветра. Это объясняется тем, что при увеличении скорости воздушного потока увеличивается давление, действующее на поверхность парусной лопасти треугольной формы. На рис. 4, б представлены зависимости силы лобового сопротивления одной парусной лопасти макета ветротурбины от угла атаки воздушного потока при различных скоростях потока ветра: 3 и 5 м/с. Из данного графика видно, что при увеличении угла атаки воздушного потока сила лобового сопротивления лопасти уменьшается. Это связано

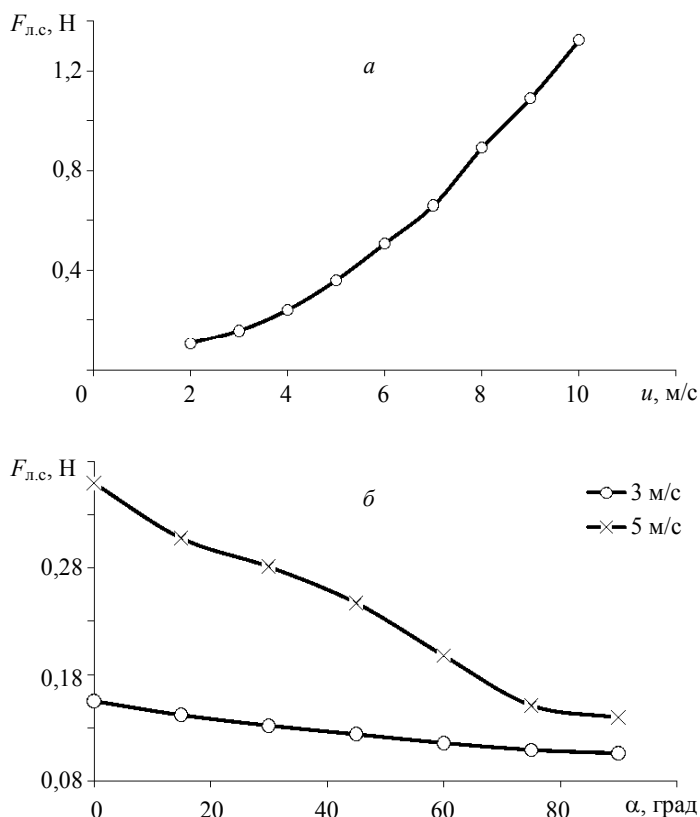


Рис. 4. Зависимость силы лобового сопротивления одной парусной лопасти макета ветротурбины от скорости воздушного потока (а) и угла атаки потока ветра (б)

с тем, что при увеличении угла атаки воздушного потока уменьшается площадь миделевого сечения парусной лопасти ветротурбины. Здесь угол атаки $\alpha = 0^\circ$ соответствует прямому направлению потока ветра.

Рис. 5 представляет зависимости коэффициента лобового сопротивления одной парусной лопасти макета ветротурбины от числа Рейнольдса (*а*) и от безразмерного угла атаки воздушного потока (*б*).

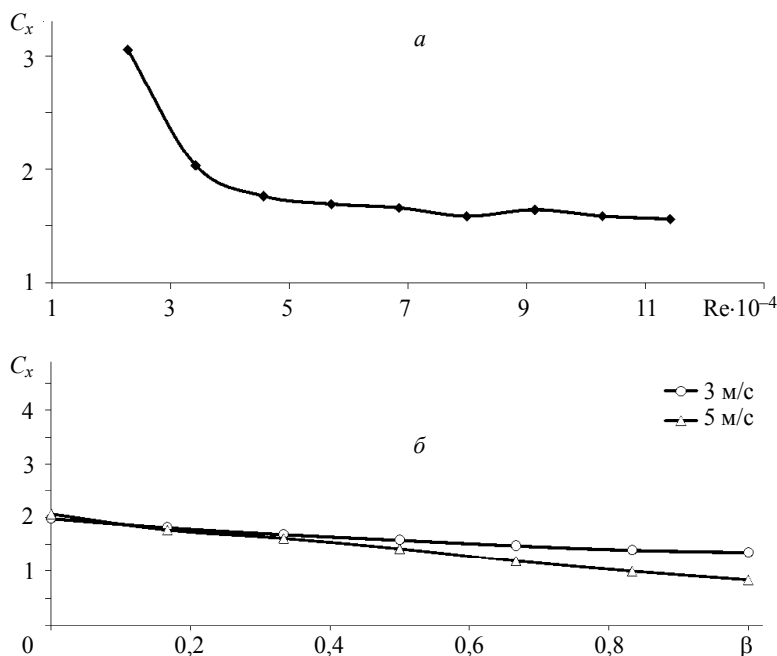


Рис. 5. Зависимости коэффициента лобового сопротивления одной парусной лопасти макета ветротурбины от числа Рейнольдса (*а*) и безразмерного угла атаки (*б*)

Из рис. 5, *а* видно, что при увеличении числа Рейнольдса коэффициент лобового сопротивления вначале убывает. При дальнейшем возрастании числа Рейнольдса уменьшение коэффициента лобового сопротивления замедляется. В области чисел Рейнольдса $4 \cdot 10^4 - 11 \cdot 10^4$ коэффициент лобового сопротивления остается примерно постоянным. Из графика зависимостей рис. 5, *б* видно, что в диапазоне безразмерных углов атаки от 0 до 0,3 коэффициент лобового сопротивления для обеих скоростей одинаков, а начиная со значения $\beta = 0,3$, наблюдается небольшое различие в значениях коэффициента лобового сопротивления.

Заключение

В данной работе рассмотрен процесс работы ветротурбины с динамически изменяемой формой поверхности лопастей. Изучена схема работы лопасти ветротурбины при прямом и обратном направлениях ветра. Определены значения силы лобового сопротивления элемента в виде зависимости от различных параметров. В статье приведены графики зависимости силы лобового сопротивления одной парусной лопасти макета ветротурбины от скорости воздушного потока и угла

атаки потока ветра, а также зависимость коэффициента лобового сопротивления одной парусной лопасти макета ветротурбины от числа Рейнольдса и безразмерного угла атаки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашин Ю.А., Кашина Р.Е. Автономная ветроэнергетическая установка (АВЭУ) с максимальным уровнем конверсии энергии ветра. Математическая модель ветротурбины // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2004. № 3. С. 59–64.
2. Хозяинов Б.П. Определение мощности модели ветродвигателя с вертикальной осью вращения ветротурбины, оборудованной тремя лопастями типа «Колокол» // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 6. С. 52–55.
3. Кусаинов К., Камбарова Ж.Т., Тургунов М.М. и др. Исследование аэродинамических характеристик модели ветротурбины с динамически изменяемой формой поверхности лопастей // Вестник Карагандинского университета. Сер. Физика. 2013. № 4 (72). С. 55–61.
4. Sakipova S.E., Kambarova Zh.T., Turgunov M.M., et al. Development of sail type wind turbine for small wind speeds // Eurasian Physical Technical Journal. Karaganda: KarSU, 2013. V. 10. No. 2 (20). P. 20–25.
5. Кусаинов К., Жакатаев Т.А., Ботпаев Н.К. О возможности повышения КПД ветрогенератора на основе распределения наведенного магнитного поля по кольцевому контуру статора // Вестник Карагандинского университета. Сер. Физика. 2013. № 4 (72). С. 80–87.
6. Кусаинов К., Тургунов М.М., Ахмадиев Б.А., Тансикбаева Н.К., Дюсембаева А.Н. Влияние пористости на аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. № 1 (12). С. 425–429.

Статья поступила 15.04.2014 г.

Kambarova Zh.T., Alibekova A.R., Turgunov M.M., Kusaaynov E.K., Ranova G.A. STUDYING THE DRAG OF A TRIANGULAR WIND TURBINE BLADE FOR LOW WIND VELOCITIES. This paper is devoted to the development of an experimental model of a wind turbine with a dynamically changing shape of the blade surface, as well as to the determination and calculation of the drag force value. The article considers characteristics of the wind turbine experimental model. The scheme of the wind turbine blade operation was considered. The drag force was determined. The article presents plots of the drag force for a sail blade of the wind turbine model as a function of the air flow velocity and wind flow angle of attack, as well as the drag coefficient of a sail blade of the wind turbine model as a function of the Reynolds number and dimensionless angle of attack. The advantage of sailing wind engines is that they can generate electrical energy in a light wind. A wind flow with a speed of 3–5 m/s is sufficient for the sail type wind turbine produces electricity while blade screw type wind engines stand immovably in such conditions. The authors of this work have been developed a sailing type wind turbine with triangular blades. The novelty of the work is the use of wind turbine blades with dynamically changeable shapes of surfaces as power elements of wind turbine blades. They are made in the form of a triangular flexible sail with a free end.

Keywords: wind turbine, blade, aerodynamic characteristic, Reynolds number, angle of attack, drag force.

KAMBAROVA Zhanar Tursunovna (PhD, Karaganda state University named by E.A.Buketov, Karaganda., Resp. Kazakhstan)
E-mail: kambarova@bk.ru

ALIBEKOVA Asem Ravshanbekovna (M. Sc., Karaganda state University named by E.A.Buketov, Karaganda., Resp. Kazakhstan)
E-mail: asem.alibekova@bk.ru

TURGUNOV Muratzhan Mirzoevich (M. Sc., Karaganda state University
named by E.A.Buketov, Karaganda., Resp. Kazakhstan)
E-mail:turgun@mail.ru

KUSAIYNOV Erlan Kusainovich (M. Sc., Karaganda state University
named by E.A.Buketov, Karaganda., Resp. Kazakhstan)

RANOVA Gulden Amanbaeva (Karaganda state University
named by E.A.Buketov, Karaganda., Resp. Kazakhstan)
E-mail:gguullddeenn@mail.ru

REFERENCES

1. Kashin Yu.A., Kashina R.E. Avtonomnaya vetroenergeticheskaya ustanovka (AVEU) s maksimal'nym urovnem konversii energii vetra. Matematicheskaya model' vetroturbiny (2004) Vestnik gomeľ'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo. No. 3, pp. 59–64. (in Russian)
2. Khozyainov B.P. Opredelenie moshchnosti modeli vetrodvigatelya s vertikal'noy os'yu vrashcheniya vetroturbiny, oborudovannoy tremya lopastyami tipa «Kolokol» (2010) Alternativnaya energetika i ekologiya. No. 6, pp. 52–55. (in Russian)
3. Kusaiynov K., Kambarova Zh.T., Turgunov M.M., Omarov N.N., Ranova G.A. Issledovanie aerodinamicheskikh kharakteristik modeli vetroturbiny s dinamicheski izmenyaemoy formoy poverkhnosti lopastey (2013) Vestnik Karagandinskogo universiteta. Ser. Fizika. No. 4(72), pp. 55–61. (in Russian)
4. Sakipova S.E., Kambarova Zh.T., Turgunov M.M., Kussaiynov E.K., Kussaiynova A.K. Development of sail type wind turbine for small wind speeds (2013) Eurasian Physical Technical Journal. V.10. No. 2 (20), pp. 20–25.
5. Kusaiynov K., Zhakataev T.A., Botpaev N.K. O vozmozhnosti povysheniya KPD vetrogeneratora na osnove raspredeleniya navedennogo magnitnogo polya po kol'tsevomu konturu statora (2013) Vestnik Karagandinskogo universiteta. Ser. Fizika. No. 4(72), pp. 80–87. (in Russian)
6. Kusaiynov K., Turgunov M.M., Akhmadiev B.A., Tansikbaeva N.K., Dyusembaeva A.N. Vliyaniye poristosti na aerodinamicheskie kharakteristiki vrashchayushchegosya tsilindra (2013) Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii. No. 1(12), pp. 425–429. (in Russian)