

С.Е.Сакипова, Ж.Т.Камбарова, М.М.Тургунов, А.М.Алькенова

*Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова  
(E-mail: aiko\_alkenova@mail.ru)*

## **Анализ аэродинамических характеристик и эффективности двух макетов ветротурбины парусного типа**

Статья посвящена исследованию аэродинамических характеристик ветротурбины парусного типа с разным числом парусных лопастей при изменении условий обтекания. Дано описание макетов и условий проведения экспериментальных испытаний. Экспериментально изучены аэродинамические характеристики двух макетов ветротурбины парусного типа. Получены графики зависимости силы тяги и силы лобового сопротивления двух макетов ветротурбины парусного типа при различных скоростях и углах атаки воздушного потока. Приведены результаты сравнительного анализа аэродинамических характеристик макетов ветротурбины парусного типа с 6-ю и 8-ю лопастями, проведена оценка их энергоэффективности.

*Ключевые слова:* ветротурбина парусного типа, эффективность, аэродинамические силы, сила лобового сопротивления, сила тяги, угол атаки.

### *Введение*

В последние годы в Казахстане, как и во всем мире, особую актуальность приобретают проблемы экономного и чистого энергопотребления, поиска и использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Несомненно, энергия — главная движущая сила во всем мире и объемы ее потребления неудержимо растут. Быстрый экономический рост в последнее десятилетие обуславливает увеличение потребления энергии и особенно растущий спрос на электроэнергию. Но до сих пор выработка необходимой энергии в Казахстане обеспечивается в основном за счет добычи и переработки угля и других традиционных источников энергии, запасы которых не бесконечны и по прогнозам могут закончиться к концу века [1–5]. Централизация электроснабжения на базе крупных угольных электростанций с передачей электроэнергии в энергодефицитные регионы продолжает играть доминирующую роль в электроэнергетической отрасли, что предопределяет увеличение потерь электроэнергии при транспортировке и загрязнение окружающей среды. Выбросы вредных веществ в атмосферу только от угольных электростанций составляют около 900 тыс. тонн в год, из которых 45% — это выбросы парниковых газов [2].

Актуальной проблемой является также энергоснабжение удаленных потребителей. В Казахстане при централизации электроснабжения протяженность распределительных линий электропередач составляет около 360 тыс. км. Содержание электрических сетей большой протяженности, так же как и потери электроэнергии, до (25–50) % при транспортировке ухудшают экономику энергоснабжения. Кроме того, часть сельских электросетей пришла в негодность, их восстановление экономически нерентабельно. Согласно [3] до сих пор насчитывается несколько тысяч фермерских хозяйств (около 9 тысяч) и более 200 удаленных сельских населенных пунктов, лишенных централизованного электроснабжения.

Учитывая планы наращивания мощности и производства электроэнергии практически во всех регионах Казахстана, актуальность использования ВИЭ сохраняется во всех местах, где они имеются, тем более, что появляются новые технологии и комбинированные системы, эффективно преобразующие энергию не только для получения электрической энергии, но и для отопления помещений и подогрева воды.

Одним из наиболее динамично развивающихся видов ВИЭ является ветроэнергетика, которая демонстрирует постоянный прирост мощности — до 20% в год [3]. В настоящее время установленная мощность ветроэлектростанций (ВЭС) в мире составляет более 240 000 МВт, но это всего лишь 1,5% от объема всей генерируемой мощности. Развитие казахстанской ветроэнергетики постепенно становится частью всемирного процесса, который направлен на увеличение доли ВИЭ в энергопроизводстве. В Казахстане уже начата работа по строительству ветропарков. Несмотря на то, что сейчас доля ВИЭ в общем объеме производства электроэнергии равна 0,5%, к 2020 г. этот показатель должен составить 3% [1] Актуальность использования ВИЭ обусловлена также подготов-

кой Казахстана к проведению Всемирной выставки достижений науки и техники EXPO-2017, основными тематическими направлениями которой являются «энергетика будущего» и «экологически чистая энергетика» [6, 7].

Перспективы использования ветроэнергетики определяются наличием соответствующих ветроэнергетических ресурсов. Казахстан богат ветровыми ресурсами: почти половина его территории имеет среднегодовую скорость ветра 4–5 м/с, а ряд районов — 6 м/с и более, что предопределяет очень хорошие перспективы для использования ветроэнергетики. В то же время среднегодовая скорость ветра в Центральном Казахстане (и не только) не превышает (2–3) м/с [4]. В связи с этим важно разработать и создать ветроэнергетические установки (ВЭУ), эффективно работающие в условиях низких среднегодовых скоростей ветра. Практика показывает, что парусные ветродвигатели могут эффективно преобразовывать энергию ветра в достаточно широком диапазоне изменения скоростей [8–11]. В данной работе рассматриваются результаты экспериментального изучения аэродинамических характеристик двух макетов ветротурбины парусного типа при изменении условий обтекания.

#### *Экспериментальная установка*

Проведены эксперименты для исследования влияния угла атаки воздушного потока на аэродинамику обтекания ветротурбины парусного типа с 8 парусами для сопоставления их с данными 6-лопастного макета, характеристики которого описаны ранее в [12, 13]. Площадь каждого паруса 8-лопастного макета меньше в 1,2 раза, чем в случае 6 парусов. Создание и изготовление данного макета связано с тем, что при проведении натурных испытаний с 6-лопастной ветротурбиной парусного типа с диаметром ветроколеса 1.6 м наблюдалось накопление дождевой воды в тканевых парусах с последующим обледенением, что создавало дополнительное сопротивление, затрудняя вращение ветроколеса.

Эксперименты проводились в рабочей части открытого типа большой аэродинамической трубы Т-1-М. Диаметр рабочей части  $D = 0.5$  м, длина  $L = 0.8$  м.

В рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М макет закрепляется на кубической раме, которая соединена с трехкомпонентными аэродинамическими весами для измерения аэродинамических сил. Поворачивая основу, на которой установлен макет ветротурбины, можно изменять угол атаки  $\alpha$  набегающего воздушного потока (рис. 1).

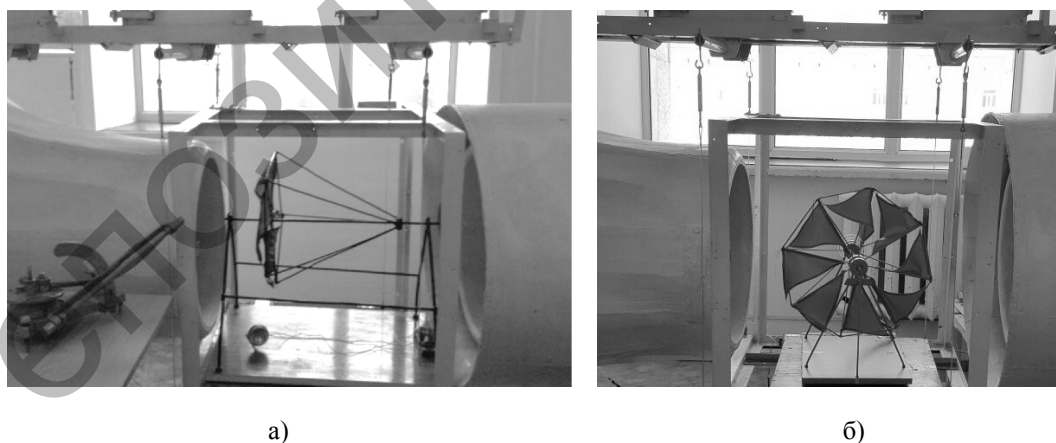


Рисунок 1. Макет ветротурбины парусного типа в рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М. Угол атаки воздушного потока  $\alpha =$  а)  $0^\circ$ ; б)  $90^\circ$

Скорость воздушного потока определялась с помощью наклонного микроманометра и регулировалась электрическим пультом управления. В ходе экспериментов скорость воздушного потока в рабочей части аэродинамической трубы менялась в диапазоне  $u = (4–17)$  м/с. Воздушный поток в рабочей части равномерный, уровень турбулентности не превышает (4–5)%.

Паруса треугольной формы изготовлены из легкой прочной ткани. Два конца паруса жестко закреплены на металлическую раму, один конец привязан тонкой прочной нитью длиной 0.03 м. Такая конструкция обеспечивает хорошую «наполняемость» паруса при изменении направления воздушного потока и помогает сохранять скорость вращения ветроколеса. Диаметр ветроколеса обоих макетов одинаковый и равен  $d = 0.4$  м, диаметр шкива  $d_{ш} = 0.12$  м.

Для измерения силы тяги используются пружинные динамометры, которые соединены со шкивом, расположенным на оси вращения ветроколеса. Каждое измерение проводилось несколько раз (не менее 3 раз), погрешность измерений составляет 3%.

### Результаты и обсуждение

В результате проведенных испытаний получены графики зависимости силы тяги и силы лобового сопротивления различных макетов ветротурбин при различных скоростях и углах атаки воздушного потока. На рисунке 2 показаны графики зависимости силы лобового сопротивления и силы тяги двух макетов ветротурбин парусного типа от скорости воздушного потока.

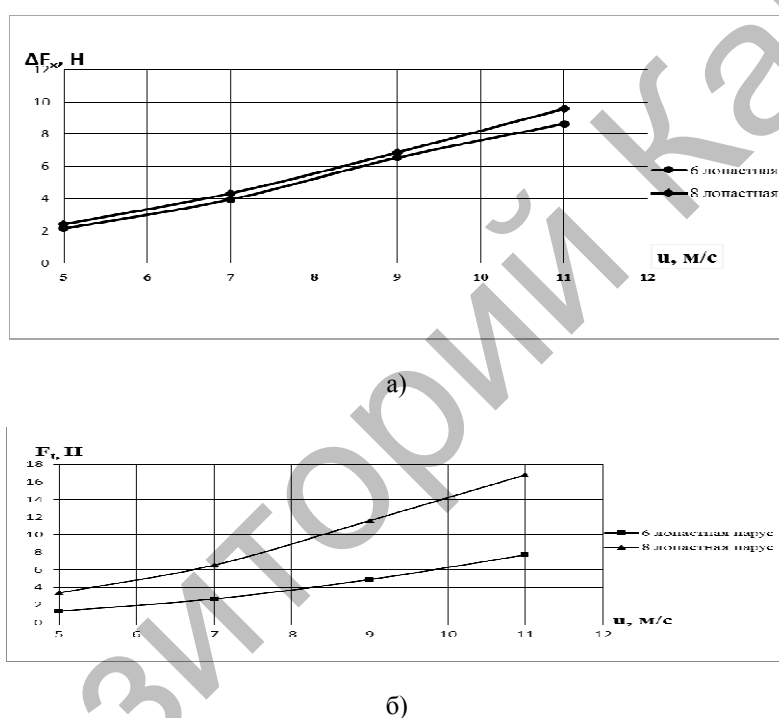
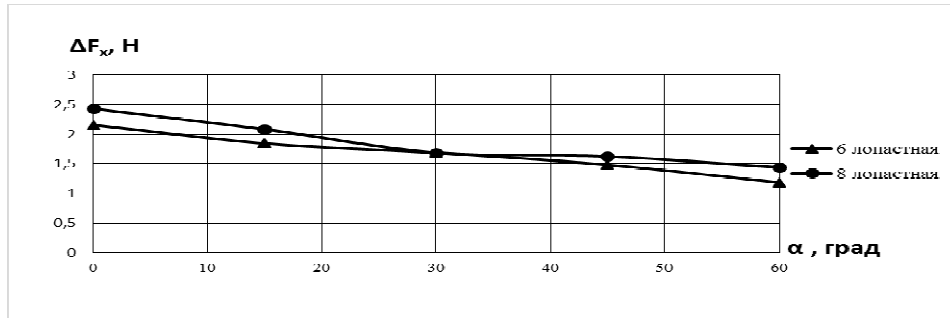


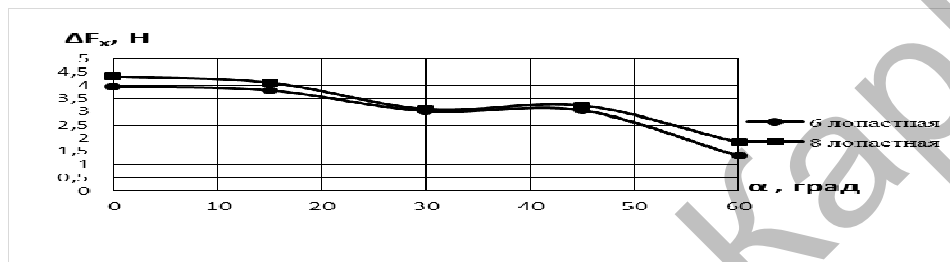
Рисунок 2. Зависимость аэродинамических характеристик макетов ветротурбины от скорости воздушного потока при углах атаки  $0^\circ$ : а) силы лобового сопротивления; б) силы тяги

На графиках рисунка 2 для всех моделей наблюдается возрастание силы лобового сопротивления и силы тяги с увеличением скорости набегающего воздушного потока при угле атаки  $\alpha=0^\circ$ , т.е. при перпендикулярном направлении воздушного потока к поверхности ветроколеса. Данная закономерность соответствует физической картине обтекания. Но если сила лобового сопротивления для обоих макетов возрастает практически одинаково во всем диапазоне скоростей, то сила тяги быстрее увеличивается для 8-лопастной ветротурбины, что подтверждает ее эффективность при увеличении скорости воздушного потока.

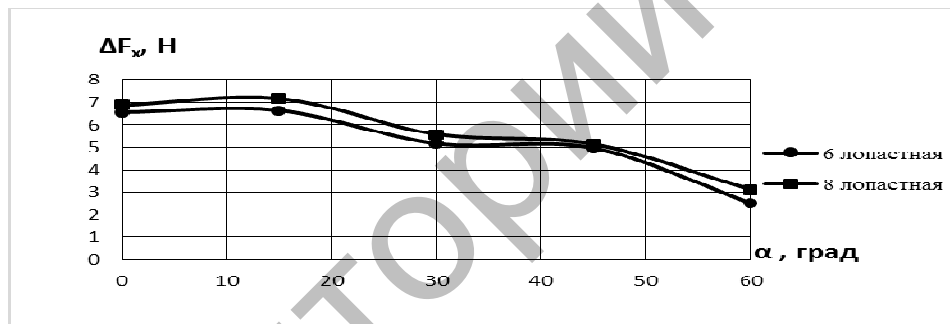
На рисунках 3 и 4 приведены зависимости силы лобового сопротивления и силы тяги двух макетов ветротурбин парусного типа от угла атаки при различных скоростях потока.



а)



б)



в)

Рисунок 3. Зависимость силы лобового сопротивления от угла атаки при скорости набегающего воздушного потока: а) 5 м/с; б) 7 м/с; в) 9 м/с

Из данных графиков видно, что с увеличением угла скоса потока сила лобового сопротивления для обоих макетов уменьшается. Это объясняется тем, что при увеличении угла атаки уменьшается обтекаемая площадь миделевого сечения, на которую воздушный поток оказывает усилие. Видно, что при угле атаки  $\alpha=30^\circ$  наблюдается перегиб кривых зависимостей и затем значения силы лобового сопротивления немного возрастают — при скорости 7 м/с (рис. 3б) или практически не меняются — при скорости 9 м/с (рис. 3в). Это возможно связано с интенсивной турбулизацией потока при данных углах атаки, что усиливает давление на парусные лопасти. Затем на ветроколесо макетов воздействует турбулизированный поток, но значение силы лобового сопротивления уменьшается вследствие существенного уменьшения площади ветроколеса, на которое воздействует набегающий воздушный поток.

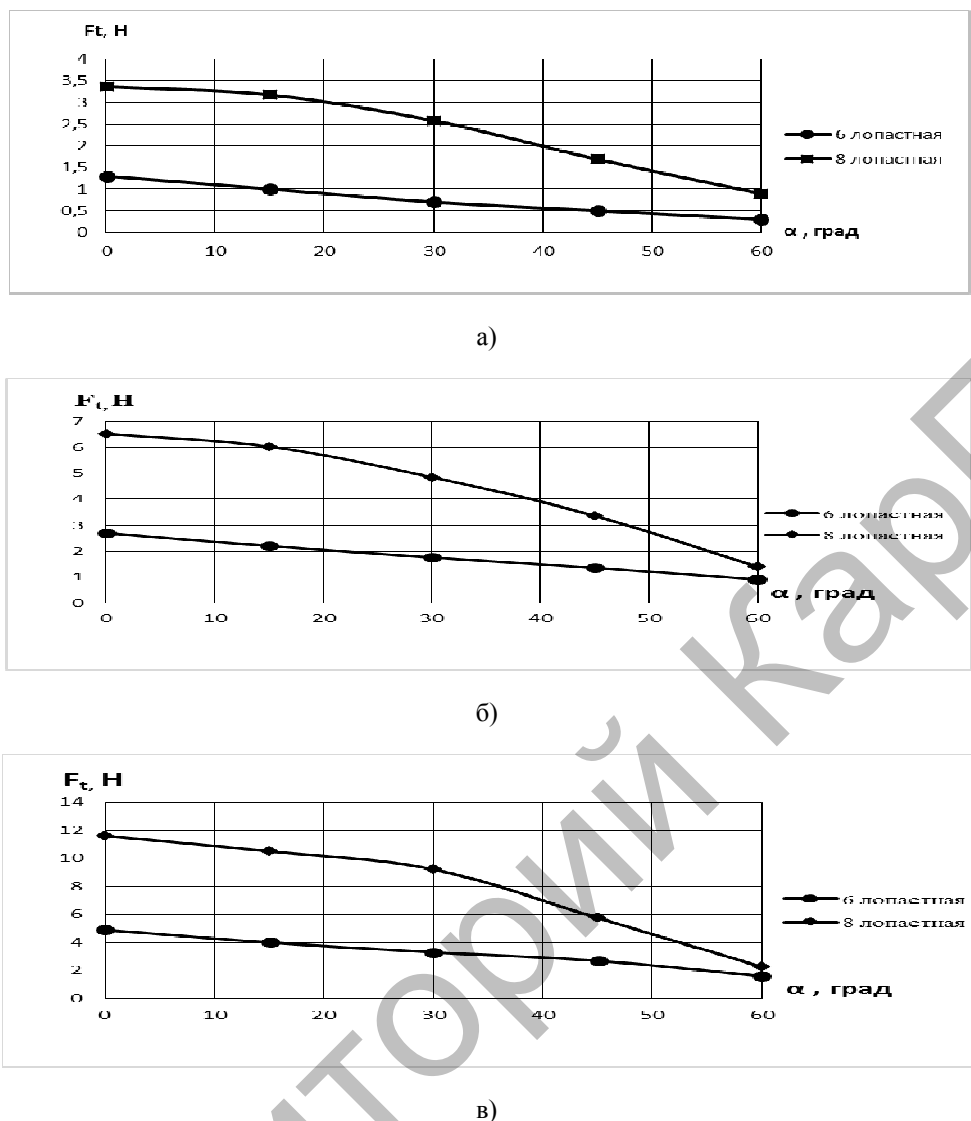


Рисунок 4. Зависимость силы тяги двух макетов ветротурбин парусного типа от угла атаки при скорости набегающего воздушного потока: а) 5 м/с; б) 7 м/с; в) 9 м/с

Из рисунка 4 следует, что с увеличением угла атаки значение силы тяги обеих моделей ветротурбин парусного типа уменьшается при всех значениях скорости воздушного потока. Наибольший темп уменьшения значения силы тяги наблюдается для 8-лопастной модели — ее значение уменьшается в данном диапазоне углов схода потока более чем в 3 раза при скорости воздушного потока 9 м/с.

В проведенных экспериментах изучены закономерности изменения значений силы лобового сопротивления и силы тяги от угла схода потока при скорости потока 11 м/с, при которой наблюдаются аналогичные зависимости для обоих макетов.

#### Заключение

В проведенных аэродинамических испытаниях модели ветротурбины парусного типа с 8 парусами измерены значения силы лобового сопротивления и силы тяги при различных скоростях воздушного потока и разных углах атаки.

Установлено, что сила лобового сопротивления для обоих макетов возрастает практически одинаково во всем диапазоне скоростей, а сила тяги быстрее увеличивается для 8-лопастной ветротурбины, что подтверждает ее эффективность при увеличении скорости воздушного потока. С увеличением угла атаки воздушного потока сила лобового сопротивления для обоих макетов уменьшается, что объясняется уменьшением обтекаемой площади миделевого сечения. Экспериментально установлено, что в результате увеличения числа парусных лопастей с 6 до 8 значения силы лобового сопротив-

ления макета практически не изменились во всем диапазоне изменения углов атаки  $\alpha$  — от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ . Значение силы тяги, которая определяет эффективность работы ВЭУ и характеризует положительный эффект, существенно увеличилось, почти в 2 раза при  $\alpha=0^\circ$ , т.е. в прямом направлении воздушного потока. Однако при увеличении угла атаки в случае 8-лопастного макета сила тяги быстрее уменьшается при всех скоростях воздушного потока.

Кроме того, в проведенных экспериментах показано, что аналогично 6-лопастному макету ветротурбины парусного типа ветроколесо 8-лопастного макета при изменении направления воздушного потока ветра на противоположное продолжает вращаться в том же направлении. Благодаря этому эффекту такая ветротурбина парусного типа может быть эффективно использована в арках, туннелях или узких проходах между зданиями.

Учитывая, что 47% населения Казахстана проживает в сельской местности, разработка и развитие малых возобновляемых децентрализованных энергетических систем предлагают хорошие возможности снять зависимость от ископаемых видов топлива и способствовать дальнейшему экономическому росту [5]. И в городских условиях, с загромождением зданий, можно использовать небольшие ветрогенераторы парусного типа со скоростью срагивания 1 м/с, которые могут эффективно преобразовывать энергию низкоскоростного ветра. Тем более, что на рынке появляются новые технологии и комбинированные системы, эффективно преобразующие энергию ВИЭ не только для получения электрической энергии, но и для отопления помещений и подогрева воды.

### Список литературы

- 1 Госсен Э., Трофимов А. Развитие ветроэнергетики в Казахстане // Мысль. — 2014. — [ЭР]. Режим доступа: <http://mysl.kazgazeta.kz/?p=2253>
- 2 Дорощин Г.А. Проект Программы развития ООН и Правительства Казахстана «Казахстан — инициатива развития рынка ветроэнергетики». — Алматы, 2006.
- 3 Маринишкин Б., Трофимов А. К генеральной схеме развития ветроэнергетики в Казахстане. — [ЭР]. Режим доступа: <http://www.windenergy.kz/rus/articles/1/page/1/28>
- 4 Сим О. Потенциал развития возобновляемых источников энергии в Республике Казахстан. — [ЭР]. Режим доступа: <http://group-global.org/ru/publication/15298-potencial-razvitiya-vozobnovlyаемых-istochnikov-energii-v-respublike-kazahstan>
- 5 Karatayev M., Clarke M. A review of current energy systems and green energy potential in Kazakhstan / Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2016. — Vol. 55. — March. — P. 491–504.
- 6 World Wind Energy Association Report, 2014. — [ЭР]. Режим доступа: [www.windea.org](http://www.windea.org)
- 7 EXPO-2017 в Астане. — [ЭР]. Режим доступа: <http://www.karlib.kz/index.php/ru/energiya-budustego-2>
- 8 Мукашева А.А., Шаранатова Г.С. Проблемы использования возобновляемых источников энергии в Республике Казахстан (в рамках EXPO 2017) // Евразийский юридический журнал. — 2013. — № 4 (59). — С. 96–99.
- 9 Martin O.L., Hansen L. Aerodynamics of Wind Turbines. — London: Sterling, VA: Earthscan, 2008. — 208 p.
- 10 Никитенко Г.В., Коноплев Е.В. Ветроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения. — Ставрополь: Аргус, 2008. — 152 с.
- 11 Абдрахманов Р.С., Якимов А.В. Об эффективности использования ветроэнергоисточников с уменьшенными скоростями ветра // Известие РАН Энергетика. — 2001. — № 5. — С. 54–57.
- 12 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 // Eurasian Physical Technical Journal, 2013. — Vol. 10. — № 2 (20). — P. 20–25.
- 13 Кусаиынов К., Танашиева Н.К., Алибекова А.Р., Кусаиынов Е.К. Аэродинамические параметры лопасти ветротурбины с динамически изменяемой формой рабочей поверхности / Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2014. — № 3(75). — С. 52–56.

С.Е.Сакипова, Ж.Т.Камбарова, М.М.Тургунов, А.М.Алькенова

### Желкенді желқозғалтқышының екі макетінің тиімділіктерін және аэродинамикалық сипаттамаларын талдау

Мақала әр түрлі санды қалақшалары бар желкенді желқозғалтқышының аэродинамикалық сипаттамаларын зерттеуге арналған. Макеттердің сипаттамалары және тәжірибелік сынақтарды өткізудің шарттары келтірілген. Желкен типті желқозғалтқыштың екі макетінің аэродинамикалық сипаттамалары тәжірибе жүзінде зерттелген. Ауа ағынының әр түрлі жылдамдықтары мен әр түрлі шабуыл бұрыштары кезінде желкен типті желқозғалтқышының екі макетінің маңдайлық кедергі күші мен тарту күшінің тәуелділік графиктері алынған. 6 және 8 қалақшалы желкен типті желқозғалтқыш макеттерінің аэродинамикалық сипаттамаларының салыстырмалы талдауының нәтижелері келтіріліп, олардың энергия тиімділігі бағаланған.

S.E.Sakipova, Zh.T.Kambarova, M.M.Turgunov, A.M.Alkenova  
**Analysis of aerodynamic characteristics and effectiveness  
of two models of sail type wind turbine**

The article is devoted to the study of aerodynamic characteristics of sail type wind turbine with different number of the sails when changing of flow conditions. The description of models and conditions of conduction of experimental tests are given. The aerodynamic characteristics of two models of sail type wind turbine are experimentally studied. Graphics of dependence of thrust force and drag force of two models of sail type wind turbine at various speeds and attack angles of air flow are obtained. The results of the comparative analysis of aerodynamic characteristics of models of sail type wind turbine with 6 and 8 sails are given; the assessment of their energy efficiency is conducted.

References

- 1 Gossen E., Trofimov A. *The idea*, 20.02.2014, [ER]. Access mode: <http://mysl.kazgazeta.kz/?p=2253>
- 2 Doroshin G.A. *Project of Development Program of United Nations and Government of Kazakhstan «Kazakhstan — initiative of development of wind power market»*, Almaty, 2006.
- 3 Marinushkin B., Trofimov A. *To the general scheme of development of wind energy in Kazakhstan*, [ER]. Access mode: <http://www.windenergy.kz/rus/articles/1/page/1/28>
- 4 Sim O. *The development potential of renewable energy sources in the Republic of Kazakhstan*, [ER]. Access mode: <http://group-global.org/ru/publication/15298-potencial-razvitiya-vozobnovlyаемых-istochnikov-energii-v-respublike-kazahstan>
- 5 Karatayev M., Clarke M. *A review of current energy systems and green energy potential in Kazakhstan*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, March 2016, p. 491–504.
- 6 World Wind Energy Association Report, 2014, [ER]. Access mode: [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org)
- 7 EXPO-2017 in Astana, [ER]. Access mode: <http://www.karlib.kz/index.php/ru/energiya-budustego-2>
- 8 Mukasheva A.A., Sharapatova G.S. *Eurasian Law Journal*, 2013, 4 (59), p. 96–99.
- 9 Martin O.L., Hansen L. *Aerodynamics of Wind Turbines*, London: Sterling, VA: Earthscan, 2008, 208 p.
- 10 Nikitenko G.V., Konoplyev E.V. *Wind energy installations in autonomous power electrical systems*, Stavropol, Edition Argus, 2008, 152 p.
- 11 Abdrakhmanov R.S., Yakimov A.V. *Proceedings of RAS. Energy*, 2001, 5, p. 54–57.
- 12 Sakipova S.E., Kambarova Zh.T., Turgunov M.M., Kussaiynov E.K., Kussaiynova A.K. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2013, 10, 2 (20), p. 20–25.
- 13 Kussaiynov K., Tanasheva N.K., Alibekova A.R., Kussaiynov E.K. *Bulletin of Karaganda University. Series Physics*, 2014, 3 (75), p. 52–56.