

Н.К. Танашева<sup>1,2</sup>, Э.Р. Шрагер<sup>3</sup>, С.Е. Сакипова<sup>1</sup>,  
А.Н. Дюсембаева<sup>1</sup>, Ж.Г. Нурғалиева<sup>1</sup>, Р. Қарсыбеков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Қарағандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Казахстан;

<sup>2</sup>Кокшетауский государственный университет им. Ш. Уалиханова, Казахстан;

<sup>3</sup>НИИ Томский государственный университет, Россия

(E-mail: nazgulya\_tans@mail.ru)

## Исследование аэродинамических характеристик ветрогенератора на основе эффекта Магнуса

В работе приведены результаты экспериментальных испытаний ветрогенератора с элементами в виде вращающихся цилиндров. Показаны результаты исследований силы тяги от скорости воздушного потока при прямом и противоположном направлении потока ветра. Также даны результаты исследования коэффициента силы тяги ветрогенератора с лопастями с пористой поверхностью от числа Рейнольдса при прямом и противоположном направлениях потока ветра. Показано, что коэффициент силы тяги сохраняет работоспособное значение до  $45^\circ$ , далее, при возрастании угла скоса потока ветра, медленно убывает. Установлено, что опытный образец ветроэнергетической установки эффективно работает при изменении угла скоса прямого потока ветра в диапазоне  $-45^\circ \div +45^\circ$ . Данная работа имеет большую актуальность в разработке ветродвигателей для малых скоростей ветра на основе эффекта Магнуса. Авторами приведены результаты зависимости силы тяги ветрогенератора с лопастями в виде вращающихся пористых цилиндров от скорости потока при прямом направлении ветра, т.е. навстречу передней части ветроколеса. Установлено, что при постоянной скорости потока ветра значение коэффициента силы тяги уменьшается с увеличением угла скоса потока, что объясняется уменьшением площади миделева сечения ветроколеса.

*Ключевые слова:* ветрогенератор, эффект Магнуса, число Рейнольдса, сила тяги, лобовое сопротивление, скорость ветра.

### Введение

В настоящее время энергия и ее источники являются наиболее актуальной проблемой не только в Республике Казахстан, но и во всем мире. Все чаще на самых высоких государственных и международных уровнях обсуждаются вопросы обеспечения все возрастающих потребностей во всех видах энергии, увеличения ее стоимости, истощения природных ресурсов, вредного воздействия на окружающую среду, опасности глобального потепления и т.д. [1, 2].

Без сомнения, одной из главных задач для современного этапа динамичного развития экономики Казахстана является рациональное использование энергетических ресурсов, при этом большая роль отводится внедрению возобновляемых источников энергии.

В Центральной зоне, куда входит Карагандинская область, складывается дефицит мощности в размере 619 МВт, который в перспективе возрастет до 1050 МВт. Планируется ввод новых мощностей на угле в г. Караганде в размере 980 МВт, поэтому, за исключением энергоизбыточной северной зоны, будет сохраняться региональный дефицит мощности и электроэнергии.

В связи с этим создание ветроэнергетических установок с цилиндрическими лопастями, эффективно работающих в условиях низких среднегодовых скоростей ветра, является весьма актуальным и соответствует приоритетам развития науки в Республике Казахстан. Данная проблема на современном этапе развития науки в нашей республике приобрела еще большую актуальность в связи с подготовкой Казахстана к всемирной выставке достижений науки и техники «EXPO – 2017». Основные тематические направления «EXPO – 2017» — «Энергетика будущего» и «Экологически чистая энергетика».

Целью данной работы является исследование аэродинамических характеристик ветрогенератора с лопастями в виде вращающихся пористых цилиндров.

### Методика исследования

Для исследования процесса преобразования ветровой энергии воздушного потока в электрическую энергию в лабораторных условиях нами создан специальный опытный образец ветрогенератора из систем вращающихся цилиндров с пористой поверхностью, на которых можно определить и оце-

нить использование энергии ветрового потока. Ветрогенератор с лопастями в виде вращающихся пористых цилиндров относится к ветроэнергетическим установкам с использованием эффекта Магнуса. Испытания проводились на специальном полигоне.

Ветрогенератор состоит из системы цилиндров и кронштейнов крепления, на которых установлены подшипники для фиксации осей вращения цилиндров. Цилиндры крепятся на горизонтальном валу, который поддерживается двумя металлическими стойками с каждого конца вала. Стойки установлены на платформе. На главной оси (вал) крепятся цилиндры, двигатель, коллекторно-щеточная система, в конце вала — шкив.

Аэродинамические параметры потока изменились в следующих пределах:

- первый диапазон — малые скорости ветра — 2–5 м/с;
- второй диапазон — средние скорости ветра — 5–10 м/с;
- третий диапазон — высокие скорости ветра — свыше 10 м/с.

При этом скорость вращения изменилась от 500 до 1900 оборотов в минуту. Направления вращения могли быть сонаправленными и противоположно направленными.

Для того чтобы привести в действие вращение цилиндров, к двигателю через щеточно-коллекторный механизм подается электроток (напряжение). Коллектор установлен на валу и изолирован от него с помощью изоляционного материала. После коллектора ток направляется к генератору, который приводит во вращение цилиндрические лопасти.

Цилиндры приводились во вращение с помощью электрогенератора на основе полупроводниковой электроники.

Число Рейнольдса и коэффициенты аэродинамических характеристик вычислялись следующим образом.

Формула для определения числа Рейнольдса (1):

$$Re = \frac{ud}{\nu}, \quad (1)$$

где  $u$  — скорость потока воздуха, набегающего на цилиндр;  $d$  — внешний диаметр исследуемого цилиндра;  $\nu$  — кинематическая вязкость воздуха.

Формула для определения коэффициента лобового сопротивления (2):

$$C_x = \frac{F_{л.с}}{\frac{\rho u^2}{2} S}, \quad (2)$$

где  $F_{л.с}$  — сила лобового сопротивления;  $u$  — скорость воздушного потока;  $\rho$  — плотность воздуха;  $S$  — площадь миделевого сечения исследуемого цилиндра.

Формула для определения коэффициента подъемной силы (3):

$$C_y = \frac{F_{н.с}}{\frac{\rho u^2}{2} S}, \quad (3)$$

где  $C_y$  — подъемная сила.

### *Результаты исследования*

Для оценки эффективности преобразования энергии ветра в энергию вращательного движения проведен ряд исследований по определению аэродинамических характеристик ветрогенератора с лопастями в виде вращающихся пористых цилиндров.

Исследованы зависимости силы тяги опытного образца с диаметром ветроколеса  $D = 3$  м от скорости потока ветра.

На рисунке 1 представлена зависимость силы тяги ветрогенератора с лопастями в виде вращающихся пористых цилиндров от скорости потока при прямом направлении ветра, т.е. навстречу передней части ветроколеса.

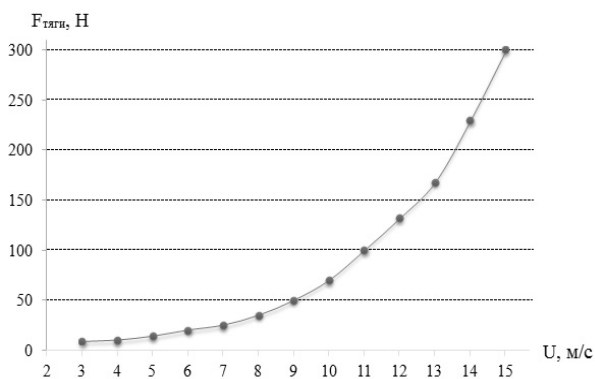


Рисунок 1. Зависимость силы тяги ветрогенератора от скорости потока ветра при прямом направлении потока ветра

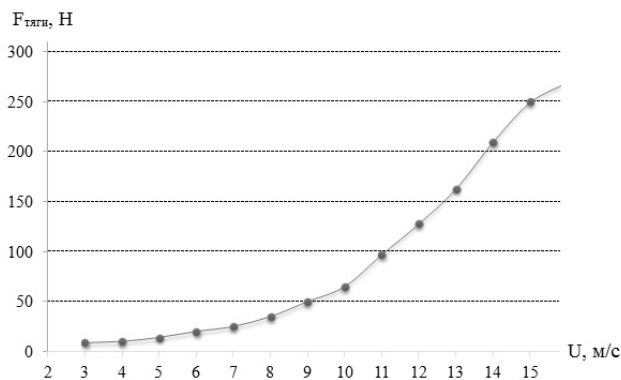


Рисунок 2. Зависимость силы тяги ветрогенератора от скорости потока при противоположном направлении потока

На рисунке 2 представлена зависимость силы тяги ветрогенератора от скорости потока ветра при противоположном направлении потока ветра относительно расположения ветрогенератора, т.е. с задней части ветроколеса.

Из сравнения рисунков 1 и 2 видно, что при прямом направлении потока ветра значение силы тяги выше, чем при противоположном направлении потока. Это объясняется тем, что в задней части ветрогенератора расположены рабочие элементы ветротурбины, которые препятствуют потоку ветра и тем самым торможению вращательного движения. В связи с этим необходимо в дальнейшем разработать платформу для вращения ветрогенератора по направлению ветра.

На рисунке 3 представлена зависимость коэффициента силы тяги ветрогенератора с лопастями в виде вращающихся пористых цилиндров от числа Рейнольдса при прямом и противоположном направлениях потока ветра.

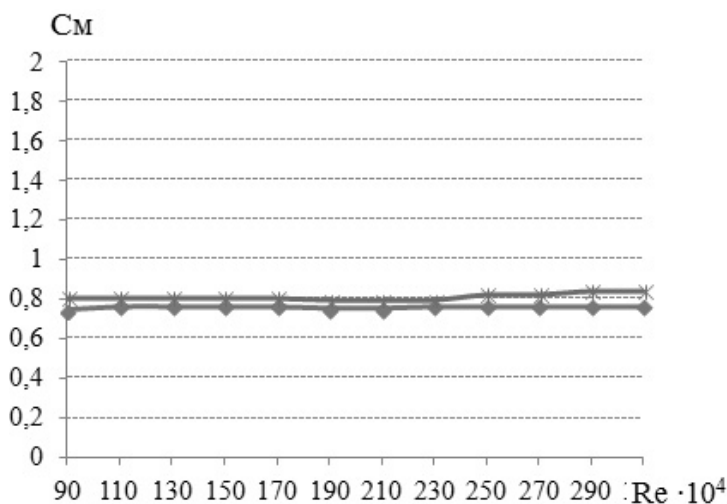


Рисунок 3. Зависимость коэффициента силы тяги ветрогенератора с лопастями в виде вращающихся пористых цилиндров от числа Рейнольдса при прямом и противоположном направлениях потока ветра

Из данного графика видно, что при прямом и противоположном направлениях потока ветра значения коэффициентов силы тяги совпадают и примерно остаются постоянными.

Для исследования угла скоса потока ветра нами была определена зависимость коэффициента силы тяги ветрогенератора от числа Рейнольдса.

На рисунке 4 представлен график зависимостей коэффициента силы тяги ветрогенератора с лопастями в виде вращающихся пористых цилиндров от угла скоса ветра при числах Рейнольдса  $Re_1 = 53,69 \cdot 10^4$ ,  $Re_2 = 128,86 \cdot 10^4$ . При постоянной скорости потока ветра значение коэффициента силы тяги уменьшается с увеличением угла скоса потока. Это объясняется уменьшением площади миделева сечения ветроколеса.

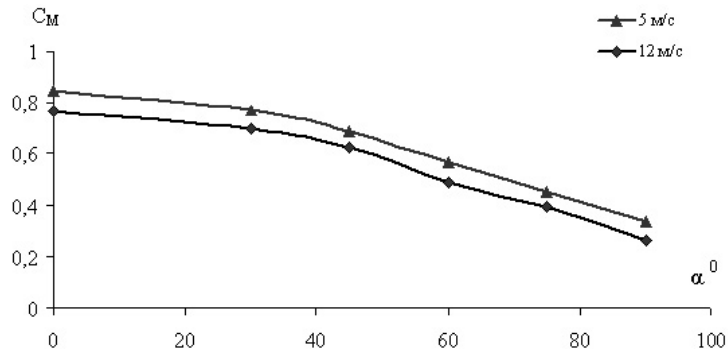


Рисунок 4. Зависимости коэффициента силы тяги ветрогенератора от угла скоса потока ветра при числах Рейнольдса  $Re_1 = 53,69128 \cdot 10^4$ ,  $Re_2 = 128,8591 \cdot 10^4$

#### Заключение

Из полученных данных исследований аэродинамических характеристик вращающихся цилиндров можно сделать следующие выводы:

- получены зависимости аэродинамической силы тяги, коэффициента силы тяги от скорости и угла скоса потока ветра. Коэффициент силы тяги сохраняет работоспособное значение до  $45^0$ , далее, при возрастании угла скоса потока ветра, медленно убывает.

- установлено, что опытный образец ветроэнергетической установки эффективно работает при изменении угла скоса прямого потока ветра в диапазоне -  $45^0 \div + 45^0$ .

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы при разработке и создании ветродвигателей для малых скоростей на основе эффекта Магнуса.

#### Список литературы

- 1 Закон РК от 4 июля 2009 г. № 165 – IVЗРК «О поддержке использования возобновляемых источников энергии». — [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=30445263](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30445263)
- 2 Болотов А.В. Развитие ветроэнергетики Республики Казахстан, энергетические системы электроснабжения автономных объектов / А.В. Болотов, С.Е. Соколов, С.А. Болотов // Вестн. АИЭС. — 2009. — № 3. — С. 11–18.
- 3 Бычков Н.М. Ветродвижитель с эффектом Магнуса. 3. Расчетные характеристики ветроколеса / Н.М. Бычков // Теплофизика и аэромеханика. — 2008. — Т. 15. — № 2. — С. 583–596.
- 4 Kusaiynov K. The effect of porosity on the aerodynamic characteristics of a rotating cylinder / K. Kusaiynov, N.K. Tanasheva, M.M. Turgunov, A. Kalikova, A. Diusembaeva // Eurasian Physical Technical Journal. — 2013. — Vol. 10. — № 2 (20). — P. 26–32.
- 5 Кусаиынов К. Исследование лобового сопротивления двухлопастного ветродвигателя в рабочем режиме / К. Кусаиынов, Н.К. Танашева, М. Тургунов, А. Дюсембаева // Вестн. Томск. гос. ун-та. Серия «Математика и механика». — 2014. — № 4 (30). — С. 82–88.

Н.К. Танашева, Э.Р. Шрагер, С.Е. Сакипова,  
А.Н. Дюсембаева, Ж.Г. Нургалиева, Р. Қарсыбеков

### Магнус эффектісіне негізделген жел генераторының аэродинамикалық сипаттамаларын зерттеу

Мақалада айналмалы цилиндрлер түріндегі элементтер жел генераторының тәжірибелік сынақ нәтижелері келтірілген. Жел ағынының тура және қарама-қарсы бағыты кезінде ауалы ағынның жылдамдығының тартылыс күшінен тәуелділігін зерттеу нәтижелері келтірілген. Сонымен қатар жел ағынының тура және қарама-қарсы бағыты кезінде Рейнольдс санынан жоғары беті кеуекті қалақшалармен жел генераторының тартылыс күшінің коэффициентін зерттеу нәтижелері келтірілді. Тартылыс күшінің коэффициенті  $45^0$  дейін жұмысқа қабілеттілік мәнін сақтайтынын көрсетті, одан әрі құлау бұрышының ұлғаюы кезінде жел ағыны ақырын тоқтайды.  $-45^0 \div +45^0$  аралығында желдің тура ағынының құлау бұрышының өзгеруі кезінде жел энергетикалық қондырғының тәжірибелік үлгісі тиімді жұмыс істейтіні белгілі болды. Бұл жұмыстың үлкен өзекті мәселесі Магнус эффектісіне негізделген аз жел жылдамдығындағы желқозғалтқышын жасау болып табылады. Жел дөңгелегінің алдыңғы бөлігі қарсы, жел бағыты қарама-қарсы ағынның жылдамдығы айналмалы кеуекті цилиндрлер түріндегі қалақшалармен жел генераторының тартылыс күшінің нәтижелері келтірілген. Жел дөңгелегінің ойыс қимасының ауданы азайғандығы айтылды, құлау бұрышының ағыны, яғни тұрақты жел ағынының жылдамдығының мәні, тартылыс күшінің коэффициенті артқан сайын азайғандығы белгілі болды.

*Кілт сөздер:* жел генераторы, Магнус эффектісі, Рейнольдс саны, тарту күші, мандайлы кедергі, жел жылдамдығы.

N.K. Tanasheva, E.R. Schrager, S.E. Sakipova,  
A.N. Dyusembaeva, Zh.G. Nurgalieva, R. Karsybekov

### Research of aerodynamic characteristics of the wind generator on the basis of Magnus's effect

The paper presents the results of experimental tests of a wind generator with elements in the form of rotating cylinders. The results of studies of the traction force on the speed of air flow in the direct and opposite direction of the wind flow are presented. Also results of research of factor of force of draft of a wind generator with blades by a porous surface from Reynolds number at direct and opposite directions of a stream of a wind are resulted. It is shown that the tractive force coefficient retains an operative value of up to 450, then, with increasing angle, the skew of the wind flow slowly decreases. It is established that the prototype of the wind power plant works effectively when the angle of the bevel of the direct wind flow varies within the range of  $-45^0 \div +45^0$ . This work has great relevance in the development of wind turbines for low wind speeds based on the Magnus effect. The authors show the results of the dependence of the traction force of the wind turbine with the blades in the form of rotating porous cylinders on the flow velocity in the forward direction of the wind, i.e. Towards the front of the wind wheel. It is established that at a constant wind speed, the value of the tractive force coefficient decreases with an increase in the bevel angle, which is explained by a decrease in the area of the meander section of the wind wheel.

*Keywords:* wind generator, Magnus's effect, Reynolds' number, traction force, drag, wind speed.

#### References

- 1 Zakon RK ot 4 iulia 2009 h. № 165 – IV3RK «O podderzhke ispolzovaniia vozobnovliaemykh istochnikov enerhii» [Law of the Republic of Kazakhstan on 4 July 2009. No. 165 - IV3RK «On Support for the Use of Renewable Energy Sources»]. *online.zakon.kz*. Retrieved from [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=30445263](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30445263) [in Russian].
- 2 Bolotov, A.V., Sokolov, S.E., & Bolotov, S.A. (2009). Rasvitie vetroenerhetiki Respubliki Kazakhstan, enerheticheskie sistemy elektrosnbsjeniya avtonomnykh ob'ektov [Wind power development of Kazakhstan, energy power supply system of autonomous objects]. *Vestnik AIES. — Bulletin AIPET*, 3 (6), 11–18 [in Russian].
- 3 Bychkov, N.M. (2008). Vetrodvihatel na osnove Mahnussa 3. Razchetnye charakteristiki vetrokolesa [Wind turbine with Magnus 3. Characteristics of the rotating cylinder]. *Teplofizika i aeromehanika. — Thermophysics and Aeromechanics*, 1, 583–596 [in Russian].
- 4 Kusaiynov, K., Tanasheva, N.K., Turgunov, M.M., Kalikova, A., & Diusembaeva, A. (2013). The effect of porosity on the aerodynamic characteristics of a rotating cylinder. *Eurasian Physical Technical Journal*, 10, 2 (20), 26–32.
- 5 Kusaiynov, K., Tanasheva, N.K., Turgunov, M., & Diusembayeva A.A. (2014). Issledovanie lobovoho soprotivleniia dvuchlopstnogo vetrodvihatelia v rabochem rejime [Research of a head resistance of a two-bladed wind turbine in operating duty]. *Vestnik Tomskoho gosudarstvennogo universiteta. Seriya Matematika i mehanika. — Bulletin of the Tomsk State University. Mathematician and Mechanics series*, 4 (30), 82–88 [in Russian].