

К.Кусаинов<sup>1</sup>, Э.Р.Шрагер<sup>2</sup>, М.М.Тургунов<sup>1</sup>, Н.К.Танашева<sup>1</sup>, А.Н.Дюсембаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова;

<sup>2</sup>Томский государственный университет, Россия

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

## Экспериментальное исследование силы лобового сопротивления макета ветродвигателя в рабочем режиме

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению силы лобового сопротивления и коэффициента лобового сопротивления двухлопастного ветродвигателя на основе эффекта Магнуса с гладкими вращающимися цилиндрами в диапазоне скоростей воздушного потока 4...13 м/с ( $Re = 26800...105000$ ) при постоянном числе вращения цилиндра вокруг собственной оси. Описаны графические зависимости силы лобового сопротивления и коэффициента лобового сопротивления от скорости набегающего потока. Результаты показали, что увеличение числа Рейнольдса приводит к уменьшению коэффициента лобового сопротивления, так как коэффициент лобового сопротивления прямо пропорционален силе лобового сопротивления, однако обратно пропорционален квадратному значению скорости.

*Ключевые слова:* эффект Магнуса, сила лобового сопротивления, число Рейнольдса, ветродвигатель, подъёмная сила.

### Введение

Интерес к альтернативным источникам энергии в мире стал особенно актуален в последнее время. Для экономии топливно-энергетических ресурсов, снижения негативного влияния на окружающую среду, а также обеспечения электроэнергией регионов требуется развитие возобновляемых источников энергии. Одним из наиболее развивающихся типов возобновляемых источников энергии в мире выступает ветроэнергетика [1].

Республика Казахстан обладает огромным потенциалом возобновляемых источников энергии. Так, например, на большей части территории Республики Казахстан среднегодовая скорость ветра составляет 3–5 м/с. В связи с этим актуальной задачей является разработка ветродвигателя, который может эффективно работать даже при низких значениях скорости ветра. Интерес представляет ветродвигатель на основе вращающихся цилиндров, который эффективно работает при низких значениях скорости ветра. Для повышения эффективности работы такого ветродвигателя необходимо изучение аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра [2].

Цель работы — исследование силы лобового сопротивления и коэффициента лобового сопротивления двухлопастного ветродвигателя на основе эффекта Магнуса в зависимости от скорости потока вращения цилиндров.

Для достижения поставленной цели авторами статьи в лаборатории аэродинамических измерений кафедры инженерной теплофизики им. проф. Ж.С.Акылбаева собран лабораторный макет из двух вращающихся цилиндров.

### Экспериментальная установка и методика измерения

Для того чтобы привести в действие цилиндры, к двигателю, вращающему цилиндры, подается электроток (напряжение) от источника питания через щеточно-коллекторный механизм. Коллектор установлен на валу и изолирован от него изоляционным материалом. После коллектора ток направляется к генератору, который приводит в действие цилиндрические лопасти [3].

На рисунке 1 приведена схема вращения цилиндров ветродвигателя в противоположные направления.

Экспериментальная установка относится к ветроэнергетическим установкам с использованием эффекта Магнуса. Основной частью экспериментальной модели (см. рис. 2) являются гладкие цилиндры противоположного вращения с одинаковыми диаметрами и поверхностями. Длина каждого цилиндра составляет 20 см. Цилиндры крепятся на горизонтальном валу, который поддерживается двумя металлическими стойками с каждого конца вала. Стойки установлены на платформе. На главной оси (вал) крепятся гладкие цилиндры, двигатель, коллекторно-щеточная система, а в конце вала — шкив.

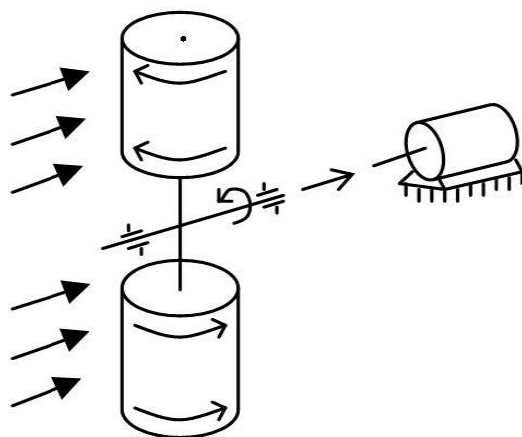
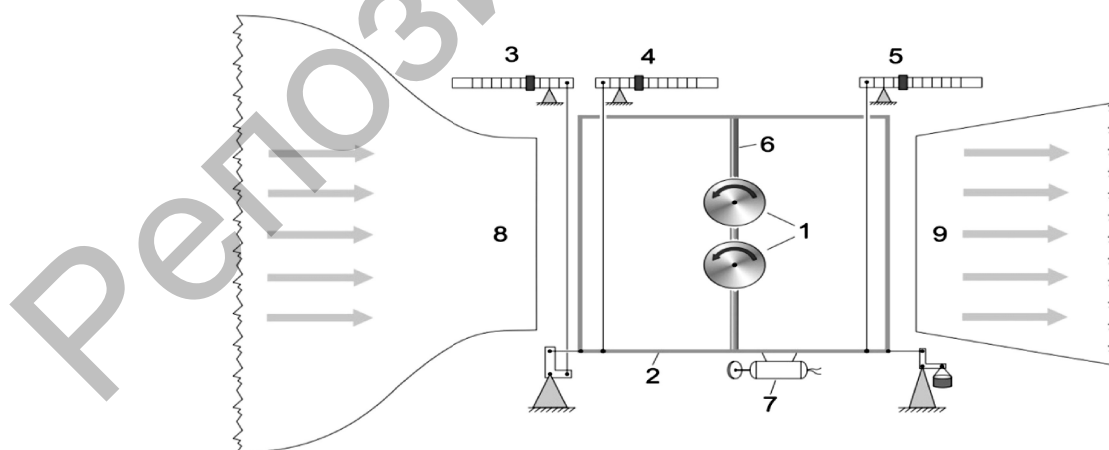


Рисунок 1. Схема вращения цилиндров ветродвигателя



Рисунок 2. Экспериментальная установка с двумя гладкими цилиндрами, диаметрами 10 см



1 — исследуемые цилиндры; 2 — рама для крепления макета с аэродинамическими весами;  
 3 — весы, измеряющие силу лобового сопротивления; 4, 5 — весы, измеряющие подъемную силу;  
 6 — стойка для крепления цилиндров; 7 — двигатель для вращения цилиндров;  
 8, 9 — диффузор и конфузор аэродинамической трубы

Рисунок 3. Схема рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М

Силу лобового сопротивления измеряют динамическими весами, установленными в рабочей части аэродинамической трубы (рис. 3). Для этого, установив на подвеску рабочей части аэродинамической трубы ветродвигатель с гладкими цилиндрическими лопастями, т.е. вращающий цилиндр, приступают к измерению лобового сопротивления при разных скоростях. Поток воздуха, набегающего на лобовую часть цилиндра, прикладывая силу, отражается на весах. Погрешность измерения силы лобового сопротивления составляет 5–6 %.

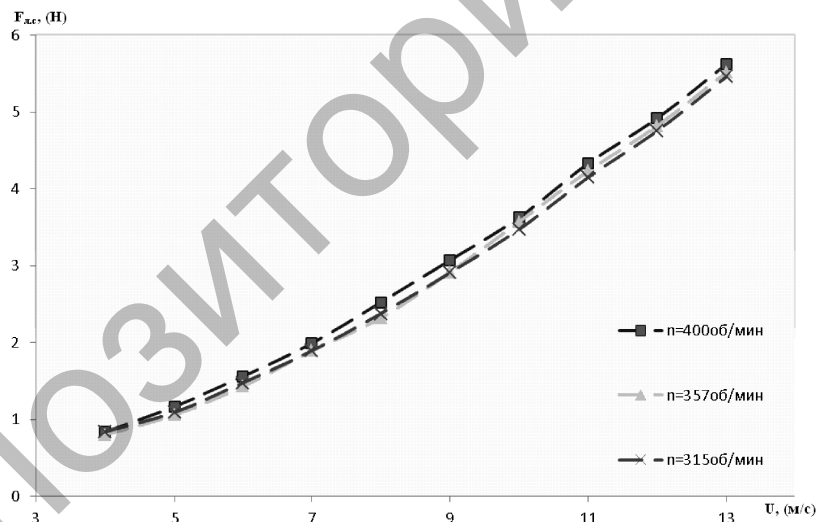
Эксперименты проводились на аэродинамической трубе Т-1-М с диаметром открытой рабочей части  $D = 500$  мм. Скорость набегающего потока меняется в пределах 4–13 м/с, диаметры цилиндров  $d = 10$  см, длина цилиндра  $l = 20$  см, диапазон изменения частоты вращения цилиндров составляет 315–400 об/мин. Цилиндры приводились во вращение с помощью ременной передачи, получаемой от электродвигателя с переменными оборотами. Скорость вращения цилиндра фиксировалась с помощью тахометра, точность трёхкомпонентных аэродинамических весов при измерении подъёмной силы составляет 8–10 %.

Экспериментальное исследование проводилось как с одиночными, так и с системой, состоящей из двух цилиндров. В опытах исследовались влияние частоты и направления вращения цилиндров на величину подъёмной силы и силы лобового сопротивления. Измерения проводились при различных скоростях набегающего воздушного потока при наличии различной степени поверхности цилиндров.

#### Обсуждение результатов измерений

В результате исследования получены зависимости силы лобового сопротивления от скорости потока вращения цилиндров с гладкой поверхностью диаметрами 10 см при обтекании их потоком со скоростью  $U = 4$  м/с и 13 м/с.

На рисунке 4 приведена зависимость силы лобового сопротивления двухлопастного ветродвигателя от скорости ветра при 10 см. Цилиндры вращались при числе вращения 400 об/мин, 357 об/мин и 315 об/мин.



Диаметр цилиндров — 10 см, длина каждого цилиндра — 20 см

Рисунок 4. График зависимости силы лобового сопротивления от скорости потока двухлопастного ветродвигателя с вращающимися гладкими цилиндрами

Из графика видно, что лобовое сопротивление увеличивается с увеличением скорости ветра. Это связано с тем, что при увеличении скорости ветра увеличивается напорное давление потока, действующего на переднюю часть вращающегося цилиндра. Таким образом, при увеличении скорости потока будет увеличиваться лобовое сопротивление двухлопастного ветродвигателя.

На рисунке 5 представлен график зависимости коэффициента лобового сопротивления двухлопастного ветродвигателя от числа Рейнольдса.

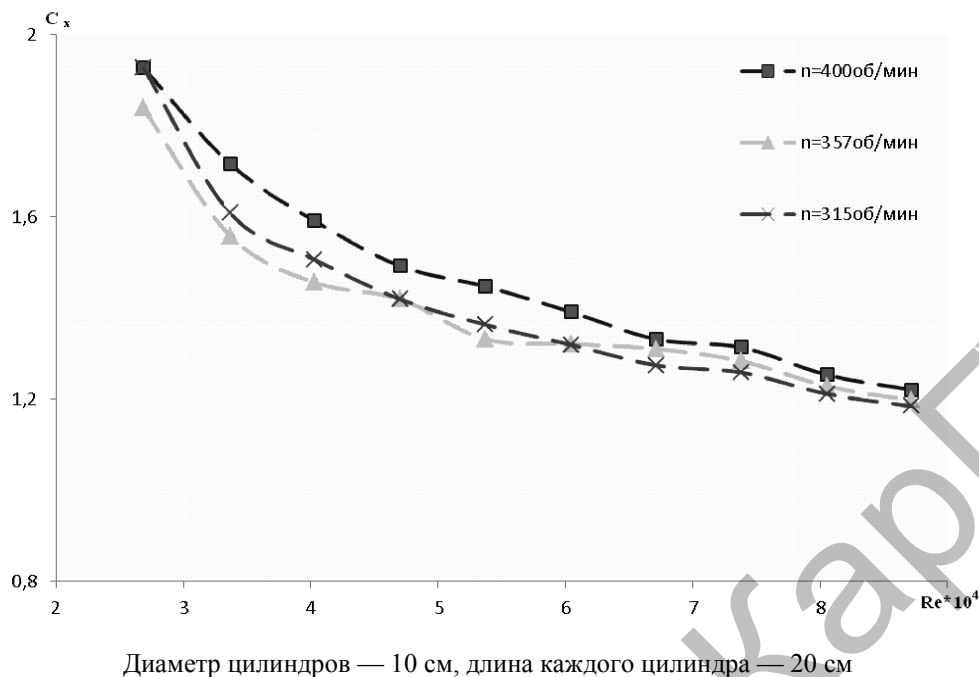


Рисунок 5. График зависимости коэффициентов лобового сопротивления от числа Рейнольдса

Из графика видно, что при увеличении числа Рейнольдса уменьшается коэффициент лобового сопротивления.

Такой характер поведения кривой можно объяснить физической картиной обтекания вращающихся цилиндров потоком воздуха. Как известно, за цилиндрами при обтекании потоком воздуха появляется вихревая зона обратных течений, которая является основной причиной образования лобового сопротивления цилиндров. Вращающиеся движения цилиндров приводят к образованию за цилиндрами достаточно объемной вихревой зоны обратных течений, размеры которой зависят от скорости набегающего потока.

#### Выводы

При малых скоростях потока соответствующим числом Рейнольдса ( $2 \cdot 10^4$ – $6 \cdot 10^4$ ) увеличение скорости потока приводит к интенсивному перемешиванию и уменьшению объема вихревой зоны обратных течений. Мы наблюдаем относительно резкое уменьшение коэффициента лобового сопротивления вращающихся цилиндров.

При достаточно больших скоростях потока соответствующим числом Рейнольдса  $8 \cdot 10^4$  и выше за цилиндрами имеются достаточно сильно интенсивно турбулезованные вихревые зоны обратных течений, на размеры которых увеличение скорости потока практически не влияет, и, как следствие этого, коэффициент лобового сопротивления цилиндров остается практически постоянным.

#### Список литературы

- 1 Бычков Н.М. Ветродвижитель с эффектом Магнуса. 2. Характеристики вращающегося цилиндра // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 1. — С. 159–175.
- 2 Dusembaeva A.N., Kussaiynov K., Sakipova S.E., Tansykbaeva N.K. Experimental research of aerodynamics of the system of the revolved cylinders in a turbulent stream // Turbulence, Heat and Mass Transfer: 7<sup>th</sup> International Symposium (September, 24–27). — Italy, 2012. — P. 125–128.
- 3 Акылбаев Ж.С., Кусаиынов К., Сакитова С.Е., Никитина Л.А., Миньков Л.Л. Исследование подъемной силы вращающегося цилиндра при поперечном обтекании турбулентным потоком газа // Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование. — Алматы: Изд-во КазНУ, 2003. — С. 78–83.

Қ.Құсайынов, Ә.Р.Шрагер, М.М.Тұрғынов, Н.Қ.Танашева, А.Н.Дүйсембаева

### **Желқозғалтқыш макетінің жұмыс режиміндегі маңдайлық кедергі күшін тәжірибеде зерттеу**

Мақалада цилиндрлердің айналу саны тұрақты, Магнус эффектісіне негізделген тегіс бетті айналмалы цилиндрлі екі қалақшалы желқозғалтқышының маңдайлық кедергі күші мен маңдайлық кедергі коэффициентінің ауа ағыны жылдамдығының 4...13 м/с ( $Re = 26800...105000$ ) аралығындағы тәжірибелік зерттеу нәтижелері келтірілген. Сонымен қатар маңдайлық кедергі күшімен маңдайлық кедергі коэффициентінің ағын жылдамдығына тәуелділіктеріне талдау жасалған. Алынған нәтижелер Рейнольдс санының артуы маңдайлық кедергі коэффициентінің азаюына алып келетінін көрсетті, себебі маңдайлық кедергі коэффициенті маңдайлық кедергі күшіне тура пропорционал болғанымен, ағын жылдамдығының квадраттық мәніне кері пропорционал.

K.Kussaiynov, E.R.Schrager, M.M.Turgunov, N.K.Tanasheva, A.N.Dyusembaeva

### **The research of drag of two-bladed wind turbine in the operating mode**

The paper gives the results of experimental studies to determine the force of drag and drag coefficient of a two-bladed wind turbine based on Magnus effect with smooth rotating cylinders in the range of speeds of the air flow 4...13 m/s ( $Re = 26800...105000$ ) at constant rotation number of the cylinder around its own axis. And also in the paper described graphic dependences drag forces and the drag coefficient from the flow velocity. The results showed that an increase in the Reynolds number leads to decrease of the coefficient of drag, as the drag coefficient is directly proportional to the force of drag, but inversely proportional to the square of the speed value.

#### References

- 1 Bychkov N.M. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2005, 12, 1, p. 159–175.
- 2 Dyusembaeva A.N., Kussaiynov K., Sakipova S.E., Tansykbaeva N.K. *Turbulence, Heat and Mass Transfer: 7th International Symposium, Italy, September 24–27, 2012*, p. 125–128.
- 3 Akylbayev Zh.S., Kussaiynov K., Sakipova S.E., Nikitina L.A., Minkov L.L. *Modern advances of physics and fundamental physical education*, Almaty: KazNU publ., 2003, p. 78–83.