

03 Исследование аэродинамических характеристик вращающихся пористых цилиндров

© К. Кусаиынов, Н.К. Танашева, М.М. Тургунов, А.Р. Алибекова

Институт прикладной математики Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан, 100028 Караганда, Казахстан
e-mail: Nazgulya_tans@mail.ru

(Поступило в Редакцию 3 октября 2014 г.)

В работе приведены результаты экспериментальных исследований по определению лобового сопротивления и подъемной силы вращающегося цилиндра с пористой поверхностью в диапазоне скоростей воздушного потока 5–13 м/с ($Re = 40\,000–105\,000$) при постоянном числе вращения цилиндра вокруг собственной оси. Так же приведены результаты исследований лобового сопротивления и подъемной силы одиночного вращающегося цилиндра в диапазоне числа оборотов цилиндра вокруг собственной оси 400–1400 г/м при постоянной скорости воздушного потока. Показано, что коэффициент лобового сопротивления и коэффициент подъемной силы зависят от числа Рейнольдса и от числа оборотов цилиндра. Установлена зависимость коэффициентов аэродинамических характеристик от степени пористости поверхности вращающегося цилиндра.

Введение

С целью экономии топливно-энергетических ресурсов, снижения негативного влияния на окружающую среду, а также обеспечения электроэнергией регионов, требуется развитие использования возобновляемых источников энергии. 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 чем актуальной задачей является разработка ветродвигателя. Особый интерес представляет ветродвигатель на основе вращающихся цилиндров постоянного и переменного сечений, который может эффективно работать даже при низких значениях скорости ветра. Для повышения эффективности работы такого ветродвигателя необходимо изучение аэродинамических характеристик элемента ветродвигателя — вращающегося цилиндра. Таким образом, данная задача является актуальной как в научном плане, так и с точки зрения практического использования.

Аэродинамические характеристики при поперечном обтекании неподвижных одиночных цилиндров в бесконечном потоке достаточно хорошо исследованы в работах С.И. Исатаева [1]. Влияния загромождения потока на закономерности обтекания бесконечного цилиндра на аэродинамическое и гидравлическое сопротивления исследованы и систематизированы в работах Ж.С. Акылбаева [2,3]. Аэродинамика коротких цилиндров, достаточно широко встречающихся в элементах энергетических агрегатов и установок, изучена экспериментальными и теоретическими методами в работе О.Н. Жангунова [4].

Однако работ, посвященных исследованию аэродинамики сложного характера обтекания одиночного и системы вращающихся цилиндров, являющихся элементами разрабатываемого нами ветродвигателя, сопровождающихся турбулентным потоком группы взаимодействующих

вихрей, в настоящее время крайне мало. Известные работы Н.М. Бычкова [5,6] относятся к определению аэродинамических параметров вращающихся одиночных цилиндров в потоке воздуха.

Современный уровень развития техники и высоких технологий позволяет использовать вращающийся цилиндр как особый элемент для получения дополнительной подъемной силы, направленной поперек потока. При вращательном движении цилиндра в потоке воздуха в верхней части скорость потока и скорость поверхности совпадают, они складываются, и появляется ускорение потока и повышение скорости [7].

В нижней части цилиндра скорости потока и вращающейся поверхности направлены противоположно, они вычитаются, происходит торможение и уменьшение скорости. Появление такой разницы скоростей приводит к появлению поперечной разницы давлений и возникновению поперечной подъемной силы, названной эффектом Магнуса (рис. 1). Данное явление нами использовано для создания ветродвигателя.

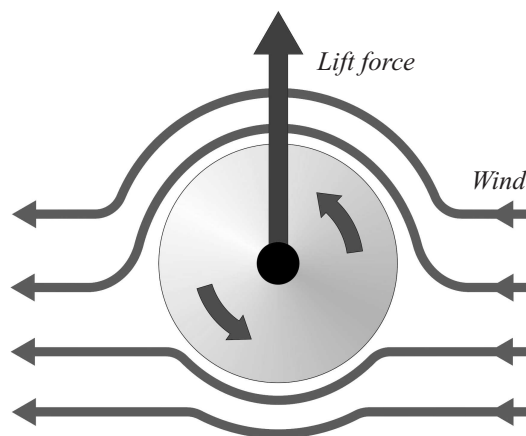


Рис. 1. Схема обтекания вращающегося цилиндра.

Новизна исследования заключается в том, что в отличие от существующих простых винтовых ветродвигателей, у которых лопасти, отражают поток воздуха на малые углы, в нашем ветродвигателе цилиндрические элементы намного эффективнее захватывают поток ветра за счет вращения самих цилиндров. Именно благодаря этому обеспечивается высокая эффективность работы ветродвигателя при малых скоростях ветра.

Для понимания физических явлений, сопровождающих сложное турбулентное обтекание вращающегося цилиндра, и получения качественных и количественных зависимостей аэродинамических характеристик от геометрических и режимных параметров потока, необходимо проведение фундаментальных исследований.

На основании проведенного анализа имеющихся исследований была поставлена задача об экспериментальном исследовании влияния пористости на аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра, являющегося элементом ветродвигателя с использованием эффекта Магнуса.

Использование эффекта Магнуса при вращении цилиндра в потоке известно давно, однако возможность его практического использования в качестве движущей силы ветродвигателей нового поколения для малых скоростей потока систематизировано изучается только в последние годы.

Цель работы — исследование влияния пористости поверхности на аэродинамические характеристики вращающегося одиночного цилиндра — основного элемента ветродвигателя, работающего на малых скоростях ветра с использованием эффекта Магнуса.

Методика исследования

Экспериментальная установка представляла собой аэродинамическую трубу замкнутого типа с открытой рабочей частью, где установлена металлическая рама, подвешенная к трехкомпонентным аэродинамическим весам. Диаметр рабочей части — 0,5 м, длина — 0,8 м.

Исследования проводились в диапазоне скоростей воздушного потока 5–13 м/с ($Re = 40\,000–105\,000$) при постоянном числе оборотов цилиндра вокруг собственной оси. Сила лобового сопротивления и подъемная сила вращающегося цилиндра измерялись с помощью трехкомпонентных аэродинамических весов. Трехкомпонентные аэродинамические весы с достаточно высокой степенью точности позволяют измерять силу лобового сопротивления и подъемную силу.

Схема расположения основных элементов установки в рабочей части аэродинамической трубы показана на рис. 2.

Экспериментальный макет обтекался поперечным воздушным потоком, создаваемым в рабочей части аэродинамической трубы. Цилиндр приводился во вращение с помощью электромотора. Поток воздуха, набегая на лобовую часть цилиндра, прикладывает силу, которая отражается на весах (рис. 3).

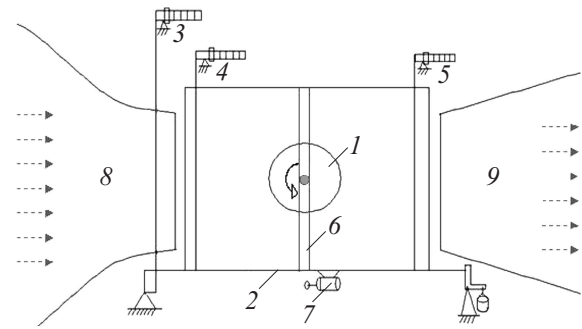


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования аэродинамических характеристик цилиндра: 1 — исследуемый цилиндр, 2 — рама для крепления макета с аэродинамическими весами, 3 — весы, измеряющие силу лобового сопротивления, 4, 5 — весы, измеряющие подъемную силу, 6 — стойка для крепления цилиндров, 7 — двигатель для вращения цилиндра, 8, 9 — диффузор и конфузор аэродинамической трубы.

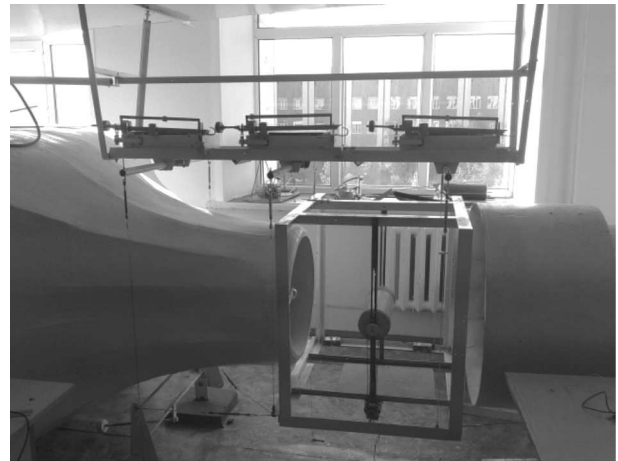


Рис. 3. Фото исследуемого цилиндра, установленного в рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М.

Число Рейнольдса и коэффициенты аэродинамических характеристик вычислялись следующим образом.

Формула для определения числа Рейнольдса

$$Re = (ud)/\nu, \quad (1)$$

где u — скорость потока воздуха, набегающего на цилиндр, d — внешний диаметр исследуемого цилиндра, ν — кинематическая вязкость воздуха.

Формула для определения коэффициента лобового сопротивления

$$C_x = F_{a.d.}/((\rho u^2/2)S), \quad (2)$$

где $F_{a.d.}$ — сила лобового сопротивления, u — скорость воздушного потока, ρ — плотность воздуха, S — площадь миделевого сечения исследуемого цилиндра.

Формула для определения коэффициента подъемной силы

$$C_y = F_{l.f.}/((\rho u^2/2)S), \quad (3)$$

где $F_{l.f.}$ — подъемная сила.

Результаты исследований аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра с пористой поверхностью

Испытания проводились с двумя видами вращающегося цилиндра диаметром 120 mm и длиной 330 mm: с гладкой поверхностью и пористыми поверхностями № 1 и № 2. Разница между двумя поверхностями пористых цилиндров заключалась в том, что размеры ячеек пористой поверхности № 1 в 2 раза меньше таковых у пористой поверхности № 2. Степень пористости поверхности цилиндров для № 1 составляет 25%, для № 2 — 50%.

Зависимости коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы от числа Re приведены в рис. 4 и 5.

Из рис. 4 и 5 видно, что коэффициент лобового сопротивления и коэффициент подъемной силы вращающегося цилиндра уменьшаются с увеличением скорости потока (чисел Re).

В ходе эксперимента исследованы зависимости коэффициента лобового сопротивления и коэффициента подъемной силы от частоты вращения цилиндра вокруг собственной оси при постоянной скорости набегающего потока.

На рис. 6 приведен график зависимости коэффициента лобового сопротивления от частоты вращения при постоянной скорости воздушного потока, набегающего на цилиндр.

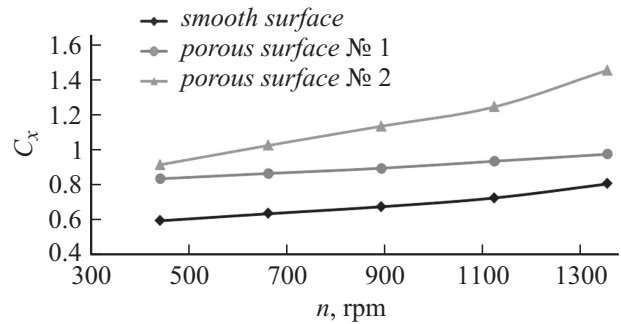


Рис. 6. Зависимость коэффициента лобового сопротивления вращающегося цилиндра от частоты вращения.

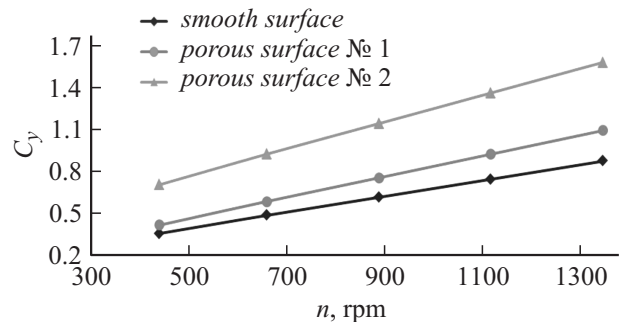


Рис. 7. Зависимость коэффициента подъемной силы вращающегося цилиндра от частоты вращения.

Из рис. 6 видно, что при увеличении частоты вращения цилиндра повышается коэффициент лобового сопротивления. Это связано с тем, что, когда поток с определенной скоростью обтекает вращающийся цилиндр, за ним образуются вихревые потоки. Эти вихревые потоки взаимодействуют с частицами воздуха на поверхности цилиндра с задней стороны и противодействуют набегающему потоку. С увеличением частоты вращения сила противодействия цилиндра потоку увеличивается. Следовательно, увеличивается лобовое сопротивление вращающегося цилиндра.

На рис. 7 приведена зависимость коэффициента подъемной силы от частоты вращения цилиндра при постоянной скорости поперечно обтекающего потока.

Из рис. 6 и 7 видно, что коэффициент подъемной силы вращающегося цилиндра повышается с увеличением частоты вращения цилиндра при постоянной скорости воздушного потока. Это обусловлено тем, что когда цилиндр начинает вращаться, он образует вихревое движение вокруг себя. При своем вращении цилиндр увлекает прилегающие слои воздуха; в результате окружающий воздух получает кроме поступательного движения еще и вращение вокруг цилиндра. В тех местах, где скорости поступательного и вращательного движений складываются, результирующая скорость превосходит скорость потока, набегающего на цилиндр. А с противоположной стороны цилиндра скорости вычитаются, и результирующая скорость меньше, чем скорость потока вдали от цилиндра. В результате появляется разность

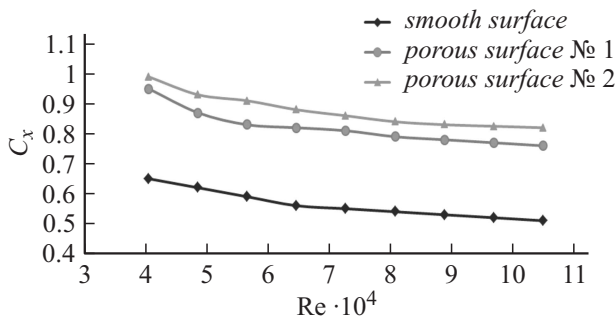


Рис. 4. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса.

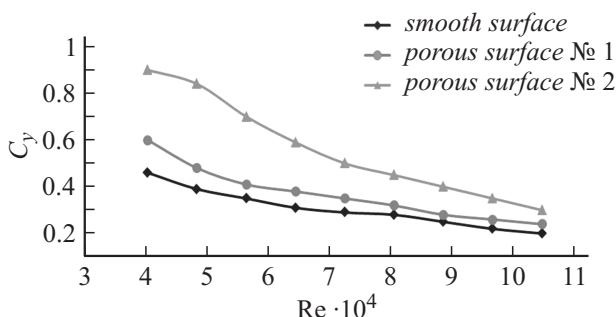


Рис. 5. Зависимость коэффициента подъемной силы от числа Рейнольдса.

давлений у поверхностей цилиндра. Эта разность влияние на коэффициенты аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра. С увеличением частоты вращений цилиндра разность давлений увеличивается, следовательно, увеличиваются коэффициенты аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра.

Из вышеприведенных графиков видно, что с увеличением пористости поверхности цилиндра численно увеличиваются коэффициенты аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра. Причина заключается в следующем: при обтекании вращающегося цилиндра с пористой поверхностью воздушным потоком на поверхности цилиндра образуется пограничный слой, который с увеличением степени пористости будет расширяться.

Заключение

Из полученных данных исследований влияния пористости на аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра можно сделать следующие выводы:

- коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы вращающегося цилиндра — элемента ветродвигателя на основе эффекта Магнуса — зависят от числа Рейнольдса. При увеличении скорости потока (чисел Re) коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления уменьшаются на 5–10%;

- при увеличении частоты вращения цилиндра вокруг собственной оси увеличиваются численные значения исследуемых аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра;

- аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра зависят от степени пористости поверхности цилиндра. С повышением пористости численно увеличиваются коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы.

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

Список литературы

- [1] Исатаев С.И., Акылбаев Ж.С., Турмухамбетов А.Ж. Аэрогидродинамика и теплообмен криволинейных тел. Алматы.: Гылым, 1996. 437 с.
- [2] Акылбаев Ж.С., Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Никитина Л.А. // Промышленная теплотехника. 2003. Т. 25. № 4. С. 279–281.
- [3] Акылбаев Ж.С., Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Никитина Л.А., Миньков Л.Л. // Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование. Алматы: Изд. КазНУ, 2003. С. 78–83.
- [4] Жангунов О.Н. Канд. дисс. Алматы, 1987. 148 с.
- [5] Бычков Н.М. // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12. № 1. С. 159–175.
- [6] Карман Т. // Аэродинамика: научное издание. Ижевск, 2001. 208 с.
- [8] Aoki K., Ito T. // J. Fluid. Mech. 2001. Vol. 26. N 12. P. 29–34.