

УДК 533.6

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА С ДЕФЛЕКТОРОМ

А. Р. Бахтыбекова, Н. К. Танашева, Л. Л. Миньков\*,  
Н. Н. Шуюшбаева\*\*, А. Н. Дюсембаева

Карагандинский университет им. Е. А. Букетова, 100026 Караганда, Казахстан

\* Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия

\*\* Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова, 020000 Кокшетау, Казахстан  
E-mails: asem.alibekova@inbox.ru, nazgulya\_tans@mail.ru, lminkov@ftf.tsu.ru,  
nn\_shuish@mail.ru, aikabesoba88@mail.ru

С помощью численных и экспериментальных методов исследованы аэродинамические характеристики лабораторного образца, представляющего собой цилиндр с активным ротационным элементом — дефлектором, который можно использовать в качестве рабочего силового элемента-лопасти ветроэнергетической установки. Численное моделирование выполнено в программном комплексе Ansys Fluent на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса, дополненных реализуемой  $(k-\epsilon)$ -моделью турбулентности. Для проведения экспериментальных исследований на основе результатов численного моделирования создан лабораторный образец с цилиндром длиной 205 мм и диаметром 50 мм и дефлектором диаметром 100 мм. Проведен сравнительный анализ аэродинамических характеристик образца, полученных численно и экспериментально, а также выявлены особенности аэродинамического обтекания исследуемого образца потоком воздуха.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, дефлектор, цилиндр, эффект Магнуса, моделирование.

DOI: 10.15372/PMTF20220512

**Введение.** В настоящее время появляются новые технологические решения в области использования возобновляемых источников энергии с целью уменьшения зависимости от ископаемого топлива в мировых масштабах. Среди возобновляемых источников энергии ветроэнергетика является одним из наиболее перспективных вследствие низкой стоимости обслуживания установленных систем [1, 2]. Следует отметить, что на высоте  $10 \div 100$  м скорость ветров равна  $6 \div 8$  м/с приблизительно лишь над 50 % территорий. Поэтому актуальной задачей является создание оптимальных ветроэнергетических установок, эффективно работающих при малых (от 2 м/с) скоростях ветра, так как большая часть территорий на Земле являются густонаселенными и не обладают достаточными ветровыми энергетическими ресурсами. Одними из таких установок являются ветроэнергетические установки, работа которых основана на эффекте Магнуса.

Эффект Магнуса — физическое явление, возникающее при обтекании вращающегося тела потоком жидкости или газа. Суть данного эффекта заключается в том, что при обтекании вращающегося тела возникает сила, действующая на него и направленная перпендикулярно направлению потока. Возникновение этой силы обусловлено совместным воздействием таких физических явлений, как эффект Бернулли и образование пограничного слоя в среде вокруг обтекаемого объекта. Вращающийся объект создает в среде вокруг себя вихревое движение. С одной стороны объекта направление вихревого потока совпадает с направлением обтекающего потока, соответственно скорость движения среды с этой стороны увеличивается. С другой стороны объекта направление вихря противоположно направлению движения потока, и скорость движения среды уменьшается. Ввиду этой разности скоростей возникает разность давлений, порождающая поперечную силу с той стороны вращающегося тела, на которой направление вращения и направление потока противоположны, по направлению к той стороне, на которой эти направления совпадают [3]. В ряде работ (см., например, [4–9]) было доказано, что ветротурбины, работающие на основе эффекта Магнуса, можно использовать для широкого диапазона значений скорости воздушного потока ( $2 \div 40$  м/с). Множество ветроэнергетических установок, работающих на основе эффекта Магнуса, имеют электрический привод для раскрутки цилиндрических лопастей. Вследствие этого увеличиваются затраты мощности на первоначальное вращение лопастей, а саму ветроустановку без подключения к источнику электрического питания запустить невозможно.

В работах [8, 9] установлено, что путем добавления геометрических форм на торцевую часть цилиндра можно улучшить аэродинамические характеристики и устранить срыв воздушного потока на его концах. Авторы работ [4, 5] исследовали в аэродинамической трубе модели ветротурбины с вращающимися цилиндрами и с концевыми пластинами и установили, что ветротурбины, работающие на основе эффекта Магнуса, начинают вырабатывать электроэнергию при  $V < 8$  м/с, когда мощность ветрового колеса близка к максимальным значениям, тогда как лопастные турбины в этих условиях имеют существенно меньшую эффективность. В работах [10, 11] проведены численные исследования влияния концевых пластин на аэродинамическое поведение вращающегося круглого цилиндра в поперечном потоке при значениях числа Рейнольдса  $Re = 1,6 \cdot 10^4 \div 9,5 \cdot 10^4$  и отношения окружной скорости к скорости набегающего потока  $\Omega \leq 8$ . Результаты показали, что использование концевых пластин значительно увеличивает подъемную силу цилиндра.

Авторами настоящей работы для устранения таких проблем, как срыв воздушного набегающего потока на краях цилиндра, увеличение подъемной силы, а также для раскрутки цилиндрических элементов без использования электрического привода, добавлен активный ротационный элемент — дефлектор. Исследуемая лопасть может быть использована в ветроколесе горизонтальных ветроустановок с различным количеством лопастей.

Известно, что дефлекторы используются для естественной вентиляции жилых домов и зданий [12]. Однако созданный и исследуемый авторами данной работы уникальный образец не имеет аналогов в конструкции цилиндрических лопастных элементов ветроэнергетических установок.

Принцип работы ротационного элемента (дефлектора) заключается в следующем [12]: набегающие потоки воздуха попадают в лопасти активной головки устройства и обеспечивают ее непрерывное круговое движение. В результате возникает центробежная сила, которая в свою очередь приводит в движение цилиндрическую трубу. Комбинируя данное явление с вращением цилиндрической лопасти, работающей на основе эффекта Магнуса, можно увеличить КПД ветроэнергетической установки до 80 % [6–8] за счет дополнительного источника увеличения подъемной силы.

В настоящее время теоретический расчет обтекания цилиндров с ротационными торцами не представляется возможным даже для простейшего случая потенциального потока идеальной жидкости. Однако, используя численное моделирование, можно визуализировать сложное турбулентное течение, рассматривая движение несжимаемой жидкости вокруг вращающегося элемента [13–15].

Применение принципов математического моделирования и теории турбулентных течений, возникающих при движении цилиндра с активным ротационным элементом (дефлектором), в сочетании с достижениями современной вычислительной техники дает возможность перейти от экспериментальных исследований и результатов к его формализованной математической модели [13–16]. Характер течения вокруг вращающегося цилиндра был предметом многочисленных исследований [13–17]. Несмотря на простоту геометрических форм цилиндрических тел, численное исследование характера их обтекания воздушным потоком при больших значениях числа Рейнольдса представляет собой сложную задачу [17–20]. Основные методы моделирования турбулентных течений делятся на три вида: прямое численное моделирование (DNS), метод моделирования крупных вихрей (LES) и решение уравнений Рейнольдса (RANS) [13, 14, 20].

В рассматриваемом случае используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса (RANS). Метод решения уравнений Рейнольдса (RANS) не требует больших вычислительных ресурсов, апробирован для решения широкого круга практических задач, связанных с турбулентным характером течения [13, 14, 20–22].

В работе [23] проведено двумерное моделирование турбулентного течения вокруг цилиндра при  $Re = 1000; 3900$ . Для этого использовались три модели турбулентности: стандартная  $(k-\varepsilon)$ -модель турбулентности, реализуемая  $(k-\varepsilon)$ -модель турбулентности и SST- $(k-\omega)$ -модель турбулентности сдвигового напряжения. Установлено, что стандартная  $(k-\varepsilon)$ -модель позволяет точно вычислить коэффициенты лобового сопротивления цилиндра при больших значениях числа Рейнольдса и эффективна при визуализации вихревого рассеяния, а SST- $(k-\omega)$ -модель рекомендуется использовать при очень больших числах Рейнольдса. Также установлено [23], что значения коэффициента сопротивления  $C_d$ , полученные с помощью стандартной  $(k-\varepsilon)$ -модели, близки к экспериментальным значениям. Однако для визуализации процесса отделения вихрей более эффективна реализуемая  $(k-\varepsilon)$ -модель, так как она позволяет лучше улавливать разделяющий поток, чем стандартная  $(k-\varepsilon)$ -модель.

С учетом указанных выше данных в настоящей работе используется реализуемая  $(k-\varepsilon)$ -модель турбулентности в программе Ansys Fluent для моделирования ветроэнергетической установки. Расчет может быть проведен как для статического, так и для динамического состояния конструкции. Преимуществами этой модели являются усовершенствованная форма записи выражения для турбулентной вязкости, новое уравнение переноса скорости диссипации, полученное из точного уравнения переноса среднеквадратичного пульсационного вихря.

Целью настоящей работы является определение аэродинамических коэффициентов на основе численного и экспериментального исследования вращающегося цилиндра с активным ротационным элементом (дефлектором). Проведено сравнение результатов численных расчетов с результатами лабораторных измерений для подтверждения адекватности численной модели, что позволяет провести оценку аэродинамических характеристик установки.

**1. Математическая модель.** Ниже описана математическая модель цилиндрического образца с активным ротационным элементом (дефлектором).

1.1. *Геометрия лопасти.* На рис. 1, а представлена трехмерная твердотельная модель лопасти в виде цилиндра с ротационным элементом в виде дефлектора.

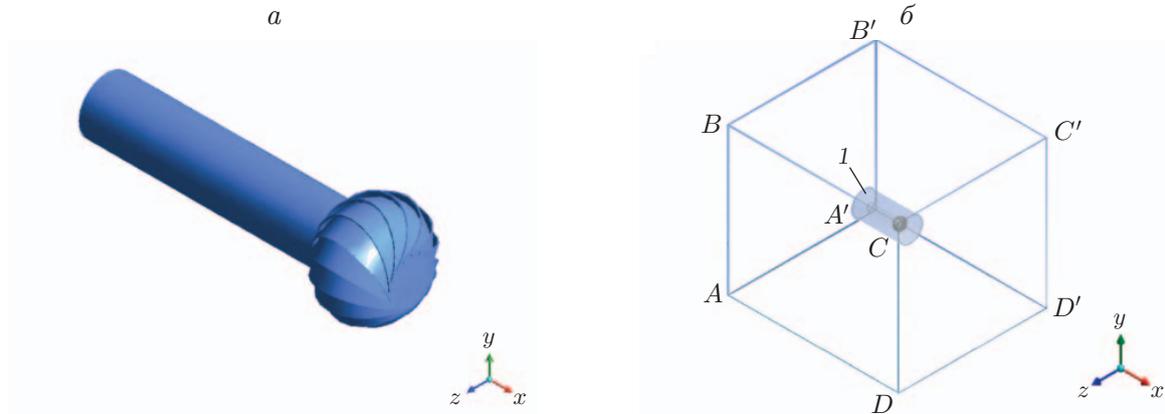


Рис. 1. Трехмерная модель лопасти (а) и расчетная область с вращающейся подобластью (б):

1 — вращающаяся подобласть

Расчетная область представляет собой параллелепипед (рис. 1, б). Через грань  $ABCD$  воздух втекает в расчетную область, через грань  $A'B'C'D'$  вытекает из нее. На остальных гранях выполняются условия непротекания. Внутри параллелепипеда находится цилиндрическая область с вырезанной подобластью, соответствующей лопасти. Цилиндрическая область совершает вращательное движение вокруг своей продольной оси.

Моделирование проводилось при следующих значениях параметров: размеры кубической расчетной области — 0,5 м, размеры вращающейся подобласти — 0,05 м, длина цилиндра  $L = 205$  мм, диаметр цилиндра  $D_1 = 50$  мм, диаметр дефлектора  $D_2 = 100$  мм, плотность воздуха  $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>, давление  $p = 0$ , газовая постоянная  $\gamma = 287,2$ , динамическая вязкость  $\mu = 1,795 \cdot 10^{-5}$  Па·с, скорость воздушного потока  $V_\infty = 3; 5; 7; 10; 12; 15$  м/с.

1.2. *Определяющие уравнения.* Система уравнений, описывающая течение воздуха вокруг образца в предположении его несжимаемости, имеет вид

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

где  $\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left[ \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]$  — тензор напряжений.

Реализуемая  $(k-\varepsilon)$ -модель турбулентности записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho \varepsilon \left( C_1 S - C_2 \frac{\varepsilon}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \right), \quad (4)$$

где  $G_k = \mu_t S^2$ ;  $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ ,

$$C_1 = \max \left( 0,43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right), \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad C_2 = 1,9; \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s k U^* / \varepsilon}, \quad U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}}, \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k,$$

$$A_0 = 4,04, \quad A_s = 6 \cos \varphi, \quad \varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}},$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$\bar{\Omega}_{ij}$  — тензор завихренности в системе координат, движущейся с угловой скоростью  $\omega_k$ ;  $\varepsilon_{ijk}$  — компоненты тензора Леви-Чивиты; турбулентные числа Прандтля равны  $\sigma_k = 1, 0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1, 2$ .

1.3. *Граничные условия.* Граничные условия для турбулентной кинетической энергии на стенке задаются следующим образом:

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0. \quad (6)$$

Скорость диссипации турбулентной кинетической энергии  $\varepsilon$  в пристенной области рассчитывается с учетом условия равенства производства кинетической энергии турбулентных пульсаций и ее диссипации и предположения о логарифмическом распределении средней скорости газа:

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{0,75} k_p^{1,5}}{\varkappa y_p}, \quad (7)$$

где  $\varkappa = 0,42$ ;  $y_p$  — расстояние от центра пристенной ячейки до стенки. В случае  $y_p < [\mu / (\rho C_\mu^{0,25} k_p^{0,5})] y^*$  будем полагать, что  $y_p = [\mu / (\rho C_\mu^{0,25} k_p^{0,5})] y^*$  ( $y^* = 11,225$ ).

Граничные условия задаются в следующем виде:

— на входе в расчетную область

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad u_z = V; \quad (8)$$

$$k = \frac{3}{2} (VI)^2, \quad \varepsilon = C_\mu^{0,75} \frac{k^{1,5}}{0,07 D_h}; \quad (9)$$

— на выходе из области

$$p = p_n;$$

— на стенках ветродвигателя

$$u_i = U(t, x, y, z),$$

где  $U(t, x, y, z)$  — скорость движения стенок, зависящая от скорости вращения рабочих цилиндров вокруг собственной продольной оси;  $D_h$  — гидравлический размер входного участка области;  $I$  — интенсивность турбулентных пульсаций.

**2. Экспериментальная установка.** Для проведения экспериментальных исследований был создан лабораторный образец лопасти, представляющий собой цилиндр с активным ротационным элементом (дефлектором). Длина цилиндра равна  $L = 205$  мм, диаметр цилиндра  $D_1 = 50$  мм, диаметр дефлектора  $D_2 = 100$  мм (рис. 2, а).

Лопасть в виде вращающегося цилиндра с активным дефлектором состоит из вращающейся трубы и активного дефлектора, закрепленных на железном пруте, который крепится на радиальный диск (не показан на рис. 2) горизонтального вала ветроустановки (рис. 2, б). На обоих концах вращающейся трубы с помощью дисков крепления установлены подшипники.

Лопасть работает следующим образом. За счет ротационного действия активного дефлектора при его обтекании воздушным набегающим потоком через подшипник 3 без использования электрического привода раскручивается вращающаяся труба 4, которая

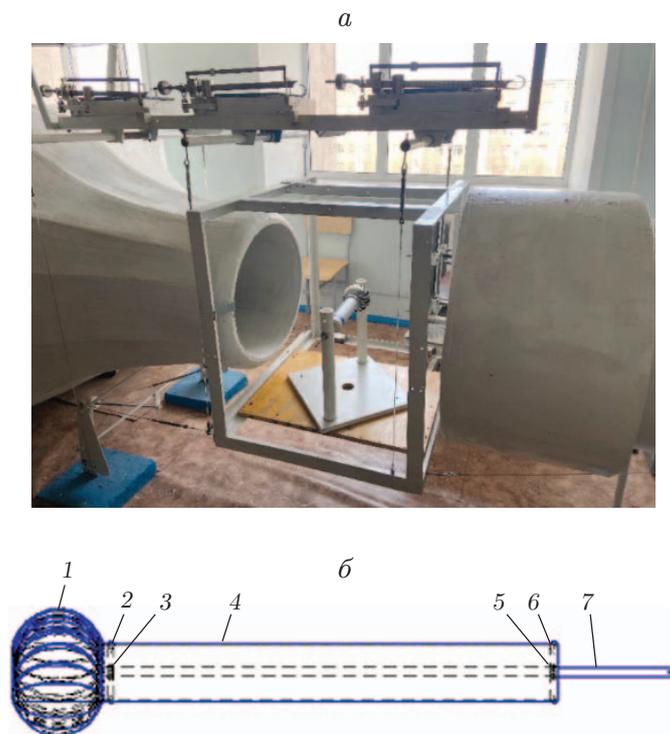


Рис. 2. Лабораторный образец цилиндра с активным ротационным элементом (дефлектором):

*a* — общий вид образца, *б* — схема лопасти; 1 — активный дефлектор, 2, 6 — диски крепления подшипников, 3, 5 — подшипники, 4 — вращающаяся труба, 7 — железная труба для крепления лопасти

жестко закреплена на железном пруте 7. При обтекании ветровым потоком вращающегося цилиндра (трубы) 4 возникает подъемная сила (так называемый эффект Магнуса), вследствие чего происходит вращение лопасти, которая в свою очередь приводит во вращательное движение все ветроколесо ветроэнергетической установки.

Исследование аэродинамических характеристик лабораторного образца проводилось в аэродинамической трубе Т-И-М с установленными трехкомпонентными аэродинамическими весами для измерения подъемной силы и силы лобового сопротивления при различных скоростях вращения цилиндра.

Специальные сетки и устройства, установленные в каналах аэродинамической трубы, позволили обеспечить в рабочей части достаточно равномерный по всему сечению воздушный поток. Скорость потока варьировалась в диапазоне  $3 \div 15$  м/с. Скорость набегающего воздушного потока измерялась с помощью чашечного анемометра Skywatch Atmos. Для измерения числа оборотов использовался цифровой лазерный фототахометр АТ-8. Сила лобового сопротивления и подъемная сила цилиндра измерялись с помощью трехкомпонентных аэродинамических весов.

Для нахождения коэффициента лобового сопротивления  $C_x$  и коэффициента подъемной силы  $C_y$  использовались формулы

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho V^2 S}; \quad (10)$$

$$C_y = \frac{2F_y}{\rho V^2 S}, \quad (11)$$

где  $F_x$  — сила лобового сопротивления, Н;  $F_y$  — подъемная сила, Н;  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — скорость потока воздуха, м/с;  $S$  — площадь миделевого сечения, м<sup>2</sup>.

Для определения числа Рейнольдса, характеризующего отношение сил инерции к силам вязкости, использовалась формула

$$\text{Re} = VD/\nu,$$

где  $D$  — характерный линейный размер обтекаемого тела;  $\nu$  — кинематическая вязкость.

Поскольку исследуемый лабораторный образец лопасти состоит из цилиндра и дельфлятора, имеющего форму шара, для экспериментальных вычислений использовался эквивалентный диаметр лопасти, который рассчитывается по формуле

$$D = \left( L' / \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{D_i^{5-m}} \right)^{1/(5-m)},$$

где  $D$  — эквивалентный диаметр, м;  $D_i$  — диаметр каждого из последовательно соединенных элементов, м;  $l_i$  — длина каждого элемента, м;  $L'$  — суммарная длина последовательно соединенных элементов, м;  $m$  — безразмерный коэффициент (для турбулентного режима обтекания гладких поверхностей  $m = 0,25$ ).

**3. Результаты исследования и их обсуждение.** Численное моделирование проводилось с использованием пакета программ Ansys Fluent на основе решения систем уравнений и краевых условий (1)–(9), а также метода конечных объемов и подхода множественных (вложенных) систем координат [15, 16].

Для дискретизации расчетной области с помощью подпрограммы Ansys Meshing строилась расчетная сетка, представляющая собой набор конечных объемов тетраэдрической формы, число которых равно 132 590.

Для численного решения системы уравнений (1)–(4) использовался метод Патанкара. Для аппроксимации конвективных слагаемых в уравнениях (1)–(4) применялась противопоточная схема второго порядка точности, для согласования полей давления и скоростей — схема Coupled.

На рис. 3 представлены поля векторов скоростей воздушного потока вокруг образца при скоростях набегающего потока  $V_\infty = 10, 15$  м/с.

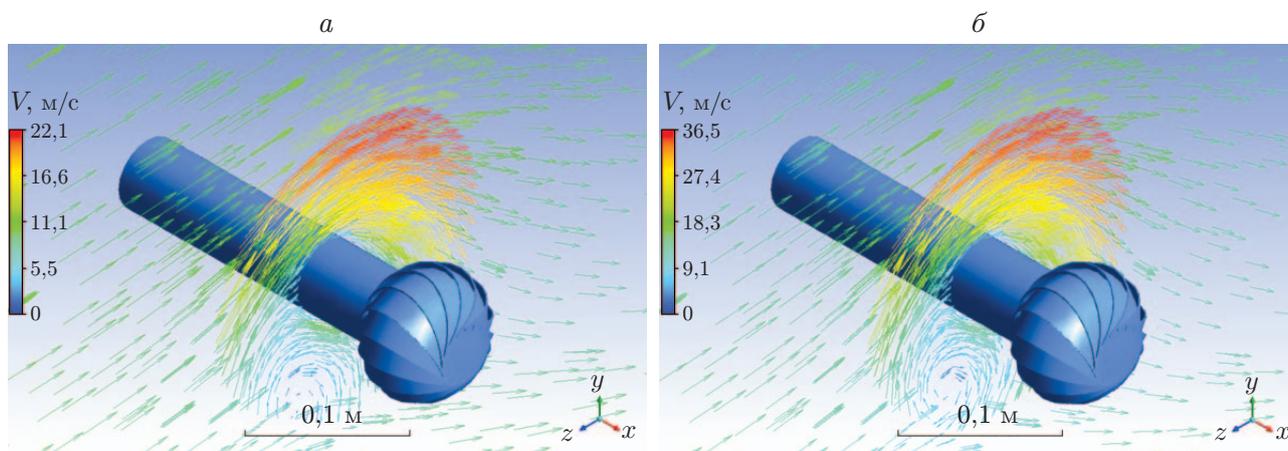


Рис. 3. Поля векторов скоростей воздушного потока вокруг образца в трехмерной плоскости при различных скоростях набегающего потока  $V_\infty$ :  
 а —  $V_\infty = 10$  м/с, б —  $V_\infty = 15$  м/с

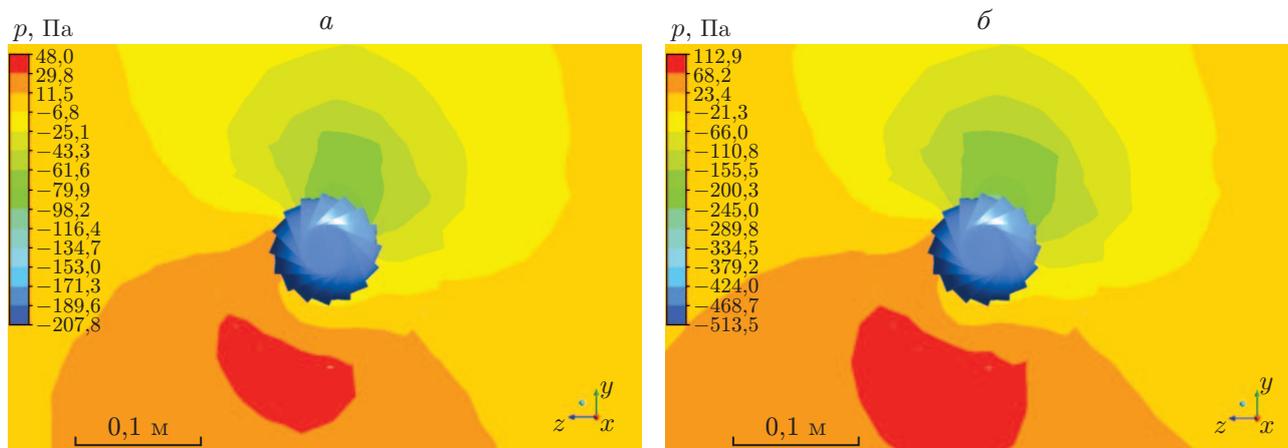


Рис. 4. Поля давления вокруг лопасти в трехмерной плоскости:  
 а —  $V_\infty = 10$  м/с, б —  $V_\infty = 15$  м/с

На рис. 3 видно, что обтекание лопасти имеет сложный трехмерный характер. Направление вращения цилиндра задается по оси  $x$ . С увеличением скорости потока турбулентные вихри перемещаются от пристенных поверхностей образца к внешним областям. Когда скорость воздушного потока становится достаточно большой, пограничный слой вокруг поверхности цилиндра отделяется вследствие неблагоприятного градиента давления, обусловленного расходящейся геометрией среды потока на подветренной стороне цилиндра (см. рис. 3). За счет разделения пограничных слоев образуется сдвиговый слой, что не противоречит результатам работы [18].

Пристенные векторы имеют наименьшие значения скорости по сравнению с удаленно расположенными векторами, что объясняется характером образования турбулентного вихревого потока вокруг вращающегося цилиндра с дефлектором. Вращение образца приводит к вовлечению части прилегающего воздушного потока в сопутствующее вращательное движение, которое, в свою очередь, существенно меняет профили скорости течения воздуха в пограничном слое.

Поля давления вокруг лопасти в трехмерной плоскости показаны на рис. 4. Видно, что с увеличением скорости потока воздуха увеличиваются давление и сопротивление. Наличие области повышенного давления перед образцом и области разрежения за ним приводит к возникновению сопротивления воздуха, которое называется сопротивлением давления. Следовательно, чем больше возмущение потока, тем более сильное сопротивление давления испытывает лопасть. Полученные распределения давления не противоречат результатам работы [19].

На основе полученных результатов численного моделирования, которые хорошо согласуются с данными работ [4–7], был создан экспериментальный образец исследуемого объекта — лопасти.

На рис. 5, 6 приведены зависимости коэффициентов силы лобового сопротивления и подъемной силы вращающегося цилиндра с дефлектором от числа Рейнольдса, полученные с помощью моделирования в программе Ansys Fluent и экспериментальным путем.

На рис. 7 представлены зависимости числа оборотов лопастей от скорости воздушного потока.

На рис. 5 видно, что с ростом числа Рейнольдса значения коэффициента лобового сопротивления уменьшаются. В соответствии с формулой (10) для нахождения коэффициента лобового сопротивления сила лобового сопротивления обратно пропорциональна

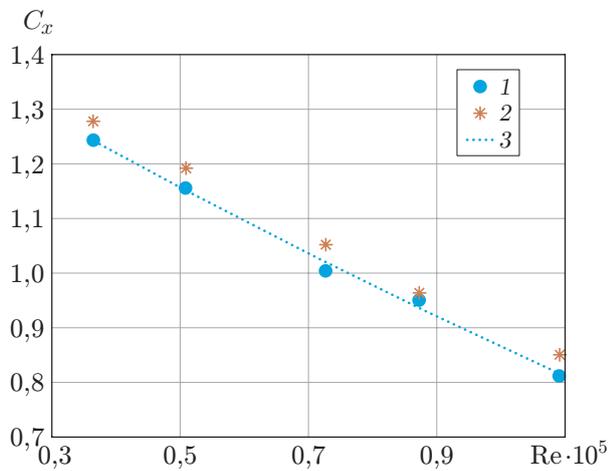


Рис. 5

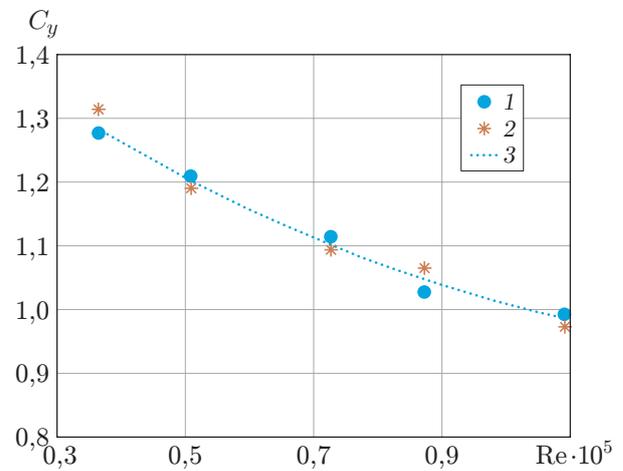


Рис. 6

Рис. 5. Зависимость коэффициента силы лобового сопротивления цилиндра с дефлектором от числа Рейнольдса:

1 — расчет, 2 — эксперимент, 3 — полиномиальная кривая, полученная по формуле  $y = 0,0668x^2 - 0,6841x + 1,482$

Рис. 6. Зависимость коэффициента подъемной силы цилиндра с дефлектором от числа Рейнольдса:

1 — расчет, 2 — эксперимент, 3 — полиномиальная кривая, полученная по формуле  $y = 0,2597x^2 - 0,7864x + 1,5363$

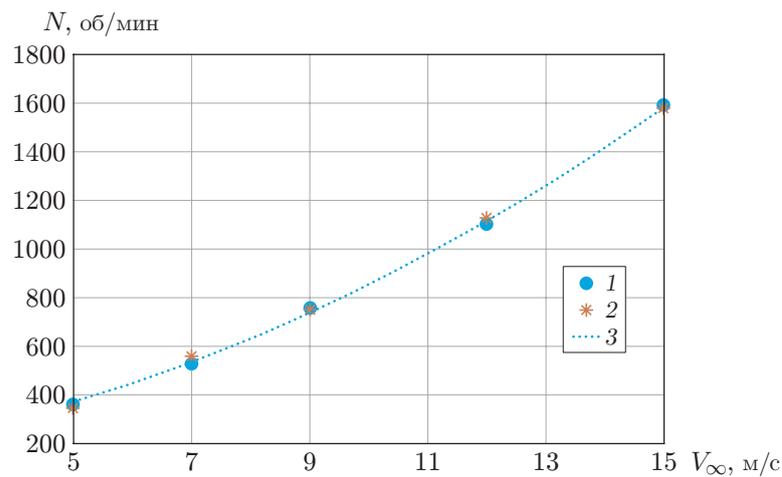


Рис. 7. Зависимость числа оборотов от скорости набегающего воздушного потока:

1 — расчет, 2 — эксперимент, 3 — полиномиальная кривая, полученная по формуле  $y = 4,9729x^2 + 22,205x + 136,67$

квадрату скорости воздуха, а число Рейнольдса прямо пропорционально скорости воздушного потока. Поэтому при увеличении скорости воздуха, протекающего при вращательном движении цилиндра с дефлектором в орбитальном направлении, коэффициент силы лобового сопротивления уменьшается. Сравнение полученных результатов с результатами работы [6] показывает, что значение коэффициента лобового сопротивления цилиндра с дефлектором больше аналогичного значения для одиночного цилиндра почти на 20 %. Это обусловлено тем, что обтекает не одиночный цилиндр, а конструкция, состоящая из цилиндра и дефлектора, который создает дополнительное сопротивление.

На рис. 6 показан монотонный характер убывания значений коэффициента подъемной силы с ростом числа Рейнольдса, что согласуется с результатами работ [18–20] и соответствует формуле (11). Полученные значения почти на 30 % больше значений коэффициента подъемной силы для одиночного цилиндра [7–9]. Данный результат можно использовать при разработке ветрогенераторов, что позволит увеличить энергоэффективность установки с лопастями в виде вращающихся цилиндров с дефлектором.

На рис. 7 видно, что максимальное число оборотов лопасть совершает при скорости  $V_\infty = 15$  м/с: 1595 при численном расчете, 1576 в эксперименте.

Сравнение коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления показывает незначительное различие расчетных и экспериментальных данных. Возможно, это обусловлено тем, что используемая модель турбулентности недостаточно адекватно описывает процесс образования больших отрывных зон, в которых замыкание области отрыва происходит вне твердой поверхности. Еще одной причиной различия расчетных и экспериментальных данных может быть фактическое различие между экспериментальной моделью, установленной в рабочей части аэродинамической трубы, и численной моделью, в которой цилиндр с дефлектором обтекает безграничным потоком.

**Заключение.** В работе предложены лабораторные и математические модели цилиндрического образца с активным ротационным элементом — дефлектором. Проведены экспериментальные исследования с использованием аэродинамической трубы Т-И-М и трехкомпонентных весов для определения силы лобового сопротивления и подъемной силы образца. Выполнено численное моделирование обтекания цилиндрического образца с дефлектором с использованием программного пакета Ansys Fluent. Получены трехмерные картины полей векторов скорости и давления вокруг лопасти при скоростях воздушного потока 10 и 15 м/с. Установлено, что пристенные векторы скорости воздуха имеют наименьшие значения по сравнению с удаленно расположенными векторами. Это обусловлено характером турбулентного вихревого потока, образующегося вокруг вращающейся цилиндрической лопасти. Вращение лопасти приводит к вовлечению части прилегающего воздушного потока в сопутствующее вращательное движение, которое, в свою очередь, существенно меняет профили скорости течения воздушного потока в пограничном слое. Установлено, что в передней области лопасти формируется область высокого давления.

Впервые проведена сравнительная оценка коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы, полученных с помощью экспериментальных и численных методов при различных значениях числа оборотов цилиндрического образца с активным ротационным элементом (дефлектором) и числа Рейнольдса. Максимальное значение  $C_x = 1,27$  при численном расчете и  $C_x = 1,24$  в эксперименте, а также значения  $C_y = 1,3$  при численном расчете и  $C_y = 1,27$  в эксперименте получены при  $Re = 0,3 \cdot 10^5$ . Также получены зависимости числа оборотов цилиндрического образца с активным ротационным элементом (дефлектором) от скорости воздушного потока.

Экспериментальные данные в пределах погрешности измерений совпадают с результатами расчетов. Полученные зависимости хорошо согласуются с известными данными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Безруких П. П.** Ветроэнергетика. Справ. и метод. пособие. М.: Энергия, 2010.
2. **Sathyajith M.** Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics. Berlin; Heidelberg: Springer Sci. and Business Media, 2006.
3. **Richmond-Navarro G., Calderon-Munoz W. R., Leboeuf R., et al.** A Magnus wind turbine power model based on direct solutions using the blade element momentum theory and symbolic regression // IEEE Trans. Sustainable Energy. 2016. V. 8, N 1. P. 425–430.
4. **Vychkov N. M., Dovgal A. V., Kozlov V. V.** Magnus wind turbines as an alternative to the blade ones // J. Phys. Conf. Ser. 2007. V. 75, N 1. 012004.
5. **Бычков Н. М.** Ветродвижитель с эффектом Магнуса. 3. Расчетные характеристики ветроколеса // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 2. С. 583–596.
6. **Kussainov K., Tanasheva N., Turgunov V., et al.** The effect of porosity on the aerodynamic characteristics of a rotating cylinder // Modern Appl. Sci. 2015. V. 9, N 2. P. 215–222.
7. **Кусаинов К., Танашева Н. К., Тургунов М. М., Алибекова А. Р.** Исследование аэродинамических характеристик вращающихся пористых цилиндров // Журн. техн. физики. 2015. Т. 85, № 5. С. 23–26.
8. **Танашева Н. К., Шуюшбаева Н. Н., Мусенова Э. К.** Исследование зависимости аэродинамических характеристик вращающихся цилиндров от угла скоса воздушного потока // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, № 17. С. 65–70.
9. **Танашева Н. К., Чиркова Л. В., Дюсембаева А. Н., Саденова К. К.** Исследование аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра в форме усеченного конуса // Инж.-физ. журн. 2020. Т. 93, № 3. С. 573–576.
10. **Badalamenti C., Prince S.** Effects of endplates on a rotating cylinder in crossflow // Proc. of the 26th AIAA Appl. aerodynam. conf., Honolulu (Hawaii), 18–21 Aug. 2008. S. l.: Aerospace Res. Central, 2008. 7063. DOI: 10.2514/6.2008-7063.
11. **Gowree E. R., Prince S. A.** A computational study of the aerodynamics of a spinning cylinder in a crossflow of high Reynolds number // Proc. of the 28th Intern. congr. of the Aeronautical sciences (ICAS'12), Brisbane (Australia), 23–28 Sept. 2012. S. l., 2012. P. 1138–1147.
12. **Lin H. T., Guu Y. H., Hsu W. H.** Design and fabrication of a novel window-type convection device // Appl. Sci. 2021. V. 11, N 1. P. 267–281.
13. **Nichols R., Nelson C.** Applications of RANS/LES turbulence models // Proc. of the 41st Aerospace sciences meeting and exhibit., Reno (USA), 6–9 Jan. 2003. Reston: AIAA, 2003. 83. DOI: 10.2514/6.2003-83.
14. **Ferziger J. H., Perić M., Street R. L.** Computational methods for fluid dynamics. Berlin: Springer, 2002. V. 3. P. 196–200.
15. **Elmiligui A., Abdol-Hamid K. S., Massey S. J., Pao S. P.** Numerical study of flow past a circular cylinder using RANS, Hybrid RANS/LES and PANS formulations // Proc. of the 22nd Appl. aerodynamics conf. and exhibit., Providence (USA), 16–19 Aug. 2004. S. l.: AIAA, 2004. 4959.
16. **Tanasheva N. K., Bakhtybekova A. R., Minkov L. L., et al.** Influence of a rough surface on the aerodynamic characteristics of a rotating cylinder // Bull. Karaganda Univ. Phys. Ser. 2021. N 3. P. 52–59.
17. **Karabelas S. J., Koumroglou B. C., Argyropoulos C. D., Markatos N. C.** High Reynolds number turbulent flow past a rotating cylinder // Appl. Math. Model. 2012. V. 36, N 1. P. 379–398.
18. **Cai J. C., Pan J., Shi-ju E., et al.** A preliminary study of the pressure and shear stress on a plane surface beneath a circular cylinder in turbulent flow fields // J. Naval Architecture Marine Engng. 2017. V. 14, N 1. P. 9–24.

19. **Yao J., Lou W., Shen G., et al.** Influence of inflow turbulence on the flow characteristics around a circular cylinder // Appl. Sci. 2019. V. 9, N 17. DOI: 103390/app9173595.
20. **Benim A. C., Cagan M., Nahavandi A., Pasqualotto E.** RANS predictions of turbulent flow past a circular cylinder over the critical regime // Proc. of the 5th IASME/WSEAS Intern. conf. on fluid mechanics and aerodynamics, Athens (Greece), 25–27 Aug. 2007. Athens: WSEAS Press, 2007. P. 232–237.
21. **Пятигорская О. С., Сенницкий В. Л.** Пример движения цилиндрического твердого тела в вязкой жидкости // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 2. С. 81–87.
22. **Zhang W., Bensow R.** Numerical simulation of high-Reynolds number flow around Flettner rotors // Proc. of the 14th Numer. towing tank symp., Dorset (UK), 22–24 Aug. 2011. N. Y.: Curran Assoc., 2012. P. 169–174.
23. **Rahman M. M., Karim M. M., Alim M. A.** Numerical investigation of unsteady flow past a circular cylinder using 2-d finite volume method // J. Naval Architecture Marine Engng. 2007. N 4. P. 27–42.

*Поступила в редакцию 14/III 2022 г.,  
после доработки — 14/III 2022 г.  
Принята к публикации 26/V 2022 г.*

---