

Математическое моделирование обтекания парусной треугольной лопасти ветрогенератора в пакете программ ANSYS FLUENT

© К. Кусаиынов,¹ Н.К. Танашева,¹ Л.Л. Миньков,² Б.П. Нусупбеков,¹ Ю.О. Степанова,¹ А.В. Рожкова¹

¹ Карагандинский государственный университет им. акад. Е.А. Букетова, 100028 Караганда, Казахстан

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

e-mail: Nazgulya_tans@mail.ru

(Поступило в Редакцию 25 мая 2015 г.)

Методами численного моделирования исследовано обтекание воздухом одной парусной треугольной лопасти ветротурбины при малых скоростях набегающего потока. Приведены результаты численного моделирования, свидетельствующие о монотонном возрастании силы лобового сопротивления и подъемной силы от скорости набегающего потока, и получены их эмпирические зависимости.

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития электроэнергетики и решения экологических проблем Казахстана является использование возобновляемых энергетических ресурсов и реализация программ энерго- и ресурсосбережения [1]. Поскольку на большей части территории Казахстана расположены зоны с низкими значениями среднегодовых скоростей ветра, для таких территорий еще не созданы промышленные ветродвигатели малой и средней мощности, а использование уже выпускаемых — экономически невыгодно. В связи с этим разработка и создание ветроэнергетических установок, предназначенных для работы в низкоскоростных ветропотоках, являются весьма актуальными для Казахстана и соответствуют приоритетам развития науки в республике [2–4].

Парусные ветродвигатели обладают уникальной особенностью — они одинаково эффективно работают как при малых значениях скорости ветра, так и при больших за счет динамической изменяемой формы рабочей поверхности под воздействием потока ветра [5,6].

Были проведены исследования по определению аэродинамических характеристик лопасти ветротурбины с динамически изменяемой формой поверхности в лабораторных условиях. Все экспериментальные испытания по определению аэродинамических характеристик выполнялись в аэродинамической трубе Т–1–М. Основные характеристики рабочей части аэродинамической трубы: диаметр — 50 см, длина — 80 см, интенсивность турбулентности — 3%, скорость потока 1–25 м/с. Параметры парусной треугольной лопасти: прямоугольный равнобедренный треугольник, катеты равны 37 см, гипотенуза — 52 см, изготовлен из парусной ткани с плотностью, равной $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$.

В настоящей работе рассматривается численное моделирование обтекания парусной треугольной лопасти (рис. 1), расположенной под углом атаки 0° в рабочей камере аэродинамической трубы, потоком воздуха в диапазоне от 2 до 14 м/с, при заданной глубине паруса, равной половине основания треугольника 18.5 см.

Система уравнений, описывающая течение газа представлена в виде [7]:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{V}, \quad (1)$$

$$\text{div } \mathbf{V} = 0. \quad (2)$$

Краевые условия. Граничные условия на стенке.

Условие прилипания и непротекания

$$\mathbf{V} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0, \quad \varepsilon_P = \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{k_{yP}}. \quad (4)$$

где $k = 0.4187$ — постоянная Кармана, индекс P — относится к центру пристенной ячейки разностной сетки.

Граничные условия на входе.

$$U = U_{in}, \quad V = 0. \quad (5)$$

(1.5) Турбулентные параметры потока определяются через задание интенсивности турбулентных пульсаций I и гидравлического диаметра D_{hyd} :

$$k = \frac{3}{2} (IV_{\text{inlet}})^2, \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}, \quad l = 0.07 D_{\text{hyd}} I = 3\%. \quad (6)$$

Граничные условия на выходной границе:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Для $k-\varepsilon$ -модели использовался стандартный рекомендуемый набор эмпирических констант (2.0), который обычно принимается по умолчанию в вычислительных пакетах:

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \\ \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3. \quad (8)$$

Таблица 1. Зависимость силы лобового сопротивления от скорости для 2D- и 3D-измерений

Скорость, m/s	Сила лобового сопротивления	
	2D-измерение	3D-измерение
2	0.11689019	0.11275012
4	0.46832793	0.43586214
5	0.7320603	0.70952331
6	1.0544758	1.0478234

Таблица 2. Сравнение силы лобового сопротивления для различных разностных сеток

Скорость, m/s	Сила лобового сопротивления		
	Сетка C ₁	Сетка C ₂	Сетка C ₃
2	0.12197591	0.11689019	0.11694198
4	0.48873618	0.46832793	0.4683286
5	0.76396827	0.7320603	0.73198883
6	1.1004501	1.0544758	1.0543102

Размеры расчетной области брались в соответствии с габаритами аэродинамической трубы. Она представляет собой прямоугольную область с расположенной внутри нее моделью (рис. 1). Конечно-разностная сетка строилась в программе Gambit 2.3.16.

Для выбора системы измерения были проведены расчеты для двумерно поставленной задачи и трехмерной. В табл. 1 приведены расчеты силы лобового сопротивления для 2D- и 3D-измерений.

Из табл. 1 видно что сила лобового сопротивления в двумерной и трехмерной постановках задачи имеет незначительное отличие. Вследствие чего мы можем использовать двумерную постановку задачи для упрощения вычислений.

Для определения влияния размера разностной сетки (количество ячеек) на определение силы лобового сопротивления треугольной лопасти с помощью используемой модели были проведены расчеты для трех разностных сеток: 1 — 20 000, 2 — 40 000, 3 — 160 000 узлов.

В табл. 2 показаны силы лобового сопротивления, полученные для малых скоростей ветра в диапазоне от 2 до 6 м/с. Значение C₁ — соответствует силе лобового сопротивления, полученной по используемой модели на сетке в 20 000, C₂ — 40 000, а C₃ — 160 000 узлов.

Из табл. 2 видно, что расхождения значений сил лобового сопротивления для сеток в 40 000 и 160 000 узлов практически минимально, а разностная сетка в 20 000 узлов имеет значительное отличие. Следовательно, для дальнейших расчетов будет актуальнее использовать сетку в 40 000 узлов.

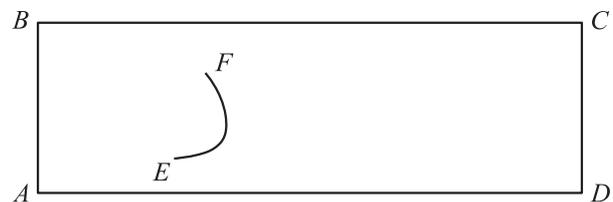
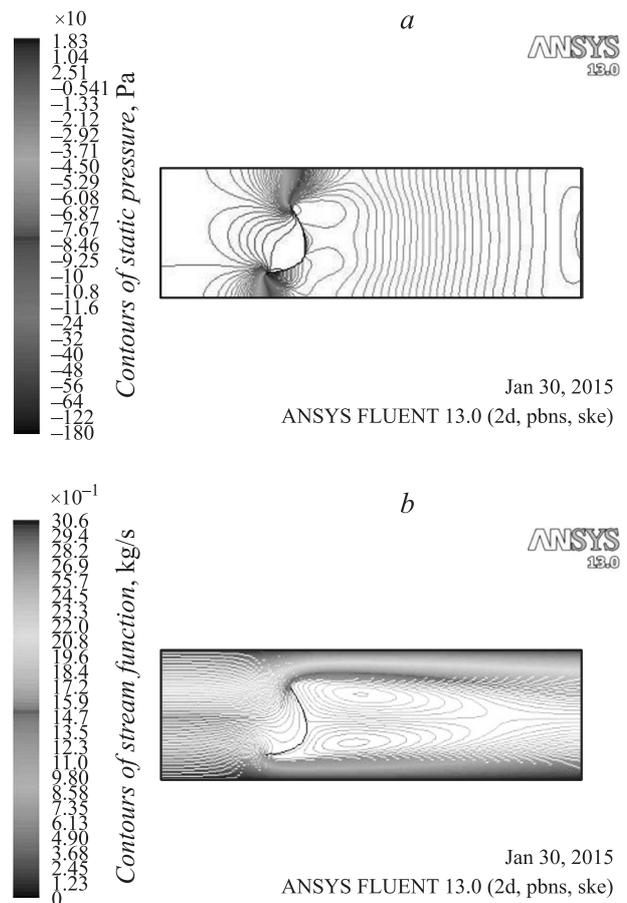
Численное моделирование проводилось с помощью пакета программ ANSYS Fluent на основе решения двумерных уравнений (1), (2), граничных условий (3)–(8)

с использованием метода Патанкара [8], неявной схемы 2-го порядка точности по пространству для конвективных членов уравнений, двухпараметрической модели турбулентности $k - \epsilon$.

На рис. 2 представлены поля распределение давления и линии тока в плоскости симметрии для угла атаки $\alpha = 0^\circ$ при скорости набегающего потока, равного 5 м/с.

Видно, что за телом образуется возвратно-циркуляционное течение и на поверхности лопасти формируются области высокого давления.

На рис. 3 представлены зависимости силы лобового сопротивления и подъемной силы от скорости набегающего потока. Кружочками представлены результаты численного эксперимента, звездочками — эксперименталь-

**Рис. 1.** Область численного интегрирования.**Рис. 2.** Поля распределения давления (a) и линий тока (b) в плоскости симметрии для угла атаки $\alpha = 0^\circ$ при скорости набегающего потока, равного 5 м/с.

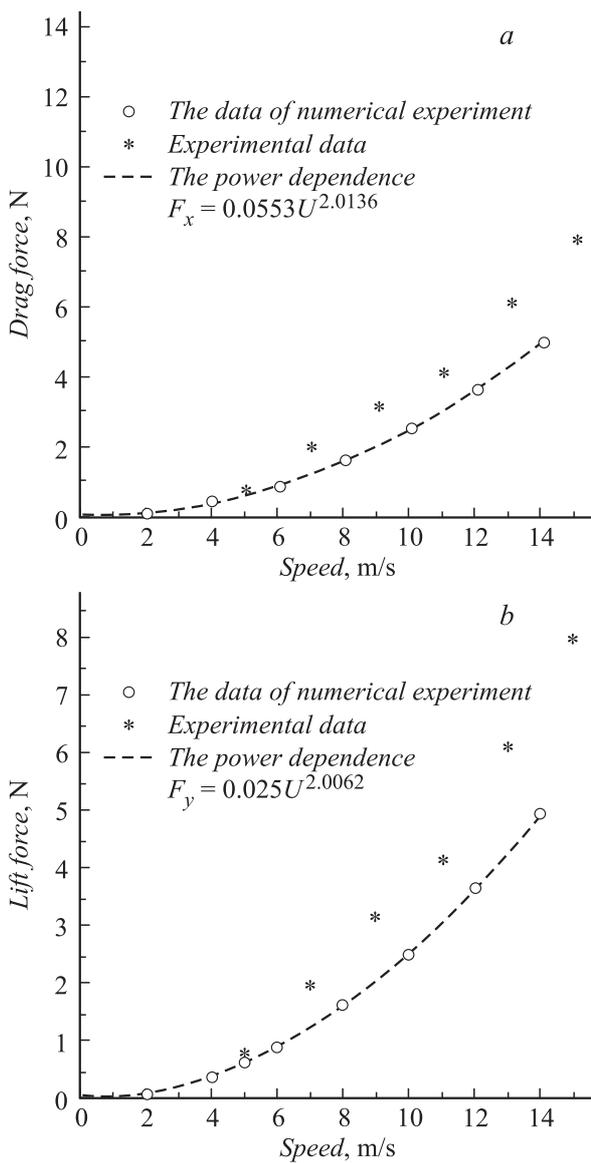


Рис. 3. Зависимости силы лобового сопротивления (а) и подъемной силы (b) от скорости набегающего потока.

ные данные, штриховой линией — аппроксимационная кривая.

На рис. 3,а представлены результаты численного эксперимента, которые аппроксимируются степенной зависимостью: $F_x = 0.0553U^{2.0136}$.

Видно хорошее согласование между расчетными и экспериментальными данными. С возрастанием скорости набегающего потока сила лобового сопротивления увеличивается.

На рис. 3, b представлены данные численного эксперимента по определению подъемной силы, которые аппроксимируются степенной зависимостью: $F_y = 0.025U^{2.0062}$.

Рассогласование результатов эксперимента и численного моделирования составляет порядка 3–4%. Это можно объяснить тем, что погрешность эксперимента составляла 3%.

На основе численного моделирования установлены универсальные зависимости аэродинамических параметров от геометрии профиля лопасти при различных скоростях потока ветра. Получены результаты моделирования обтекания парусной треугольной лопасти. Сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными показало удовлетворительное согласие.

Установленные авторами закономерности изменений аэродинамических параметров могут быть полезны при понимании сложной аэродинамической картины обтекания профилей турбулентным потоком воздуха. Полученные универсальные зависимости для силы тяги и лобового сопротивления могут быть использованы при инженерных расчетах ветротурбин парусного типа.

Список литературы

- [1] Болотов А.В., Соколов С.Е., Болотов С.А. // Вестник АИЭС. 2009. Вып. 3 (6). С. 11–18.
- [2] Kussaiynov K., Tanasheva N.K., Turgunov M.M., Shaimerdenova K.M. // Mod. Appl. Sci. 2015. Vol. 9. N 2. P. 218–227.
- [3] Kussaiynov K., Tanasheva N.K., Turgunov M.M., Alibekova A.R. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 5. P. 23–26.
- [4] Kussaiynov K., Sakipova S.E., Tansykbayeva N.K., Kussaiynova A. // Turbulence, Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 7. P. 577–580.
- [5] Кусаиынов К., Камбаров Ж.Т., Танашева Н.К., Шаймерденова К.М., Алибекова А.Р. // ИФЖ. 2015. Т. 88. Вып. 2. С. 23–28.
- [6] Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 1. С. 12–19.
- [7] Исаев С.А., Баранов П.А., Судаков А.Г., Ермаков А.М. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 2. С. 49–57.
- [8] Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. Энергоатомиздат, 1984. 149 с.