

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-97-114>

УДК 621.548.4

CFD-моделирование аэродинамического профиля лопастей ветроэнергетической установки с вертикальной осью в системе Ansys Fluent

Г. Н. Узаков¹⁾, В. А. Седнин²⁾, А. Б. Сафаров^{1, 3)}, Р. А. Мамедов³⁾,
И. А. Хатамов¹⁾

¹⁾Каршинский инженерно-экономический институт (г. Карши, Республика Узбекистан),

²⁾Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь),

³⁾Бухарский инженерно-технологический институт (г. Бухара, Республика Узбекистан)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В статье представлены результаты исследований по моделированию аэродинамического профиля DU-06-W-200, применяемого в ветроэнергетических установках с вертикальной осью, в системе Ansys Fluent, оценке совместимости с экспериментальными данными и определению оптимального значения угла атаки. Аэродинамический профиль DU-06-W-200 смоделирован с углами атаки в промежутке от -15° до $+15^\circ$, граничными условиями и скоростью потока входных данных 15 м/с, рабочей температурой 23°C , рабочим давлением $1 \cdot 10^5$ Па, плотностью воздушного потока $1,23 \text{ кг/м}^3$ (длина хорды аэродинамического профиля 1 м, динамическая вязкость воздушного потока $1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$, тип турбулентных моделей SST $k - \omega$ ($k - \omega$), $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$), число Рейнольдса $1,05 \cdot 10^6$). Создана область двумерной геометрии и профиль сетки для аэродинамического профиля DU-06-W-200, при этом количество узлов в сетке 37495, а количество элементов 36790. Также было установлено, что коэффициенты сопротивления (C_d) SST $k - \omega$ ($k - \omega$) для модели турбулентности равны: 0,1734, 0,0721, 0,0311, 0,0204, 0,0351, 0,0782, 0,1712, $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) для модели турбулентности: 0,2065, 0,0789, 0,0318, 0,0212, 0,0359, 0,0787, 0,2019, коэффициенты подъема силы (C_l) SST $k - \omega$ ($k - \omega$) для модели турбулентности равны $-0,9169$, $-0,9169$, $-0,9239$, $-0,5394$, $0,0842$, $0,7416$, $1,3134$, $1,1229$, $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) для турбулентной модели составили: $-0,9278$, $-0,8674$, $-0,5336$, $0,0848$, $0,0359$, $0,0787$, $0,2019$ при углах атаки аэродинамического профиля DU-06-W-200, равных: -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15° соответственно. При оценке совместимости модели и результатов экспериментов аэродинамического профиля DU-06-W-200 использованы критерий соответствия χ^2 , среднеквадратичная погрешность (RMSE), коэффициент детерминации (R^2), средняя погрешность смещения (MBE). По результатам исследования оценки зависимости соотношения коэффициентов сопротивления и подъемной силы от изменения угла атаки, осуществленной с помощью моделей турбулентности SST $k - \omega$ ($k - \omega$), $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$), установлено, что максимальное значение отношения коэффициентов сопротивления и подъема силы составляет 21 при оптимальном угле наклона атаки, равном 5° .

Ключевые слова: аэродинамический профиль DU-06-W-200, Ansys Fluent, CFD-моделирование, турбулентны модель SST $k - \omega$ ($k - \omega$), $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$), критерий соответствия χ^2 , среднеквадратичная погрешность (RMSE), коэффициент детерминации (R^2), средняя погрешность смещения (MBE)

Для цитирования: CFD-моделирование аэродинамического профиля лопастей ветроэнергетической установки с вертикальной осью в системе Ansys Fluent / Г. Н. Узаков [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 67, № 2. С. 97–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-2-97-114>

Адрес для переписки

Сафаров Алишер Бекмуродович
Каршинский инженерно-экономический институт
просп. Мустакиллик, 225,
180100, г. Карши, Республика Узбекистан
Тел.: +998 90 299-41-24
a-safarov91@mail.ru

Address for correspondence

Safarov Alisher Bekmurodovich
Karshi Engineering Economics Institute
225, Mustakillik Ave.,
180100, Karshi, Republic of Uzbekistan
Tel.: +998 90 299-41-24
a-safarov91@mail.ru

CFD-Modeling of the Airfoil of the Blades of a Wind Power Plant with a Vertical Axis in the Ansys Fluent System

G. N. Uzakov¹⁾, V. A. Sednin²⁾, A. B. Safarov^{1, 3)}, R. A. Mamedov³⁾, I. A. Khatamov¹⁾

¹⁾Karshi Engineering Economics Institute (Karshi, Republic of Uzbekistan),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Bukhara Engineering Technological Institute (Bukhara, Republic of Uzbekistan)

Abstract: The article presents the results of research on modeling the DU-06-W-200 airfoil used in wind power plants with a vertical axis in the Ansys Fluent system, evaluating compatibility with experimental data and determining the optimal angle of attack. The DU-06-W-200 airfoil was simulated with angles of attack ranging from -15° to $+15^\circ$, boundary conditions and input flow rate being of 15 m/s, operating temperature – of 23°C , operating pressure – of $1 \cdot 10^5$ Pa, air flow rate – of 1.23 kg/m^3 (airfoil chord length is of 1 m, dynamic viscosity of the air flow is $1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ and the type of turbulent models is SST $k - \omega$ ($k - \omega$), $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$), whereas Reynolds number is $1.05 \cdot 10^6$). A two-dimensional geometry domain and a grid profile for the DU-06-W-200 airfoil have been created, with the number of nodes in the grid 37495 and the number of elements 36790. It was also found that the drag coefficients (C_d) SST $k - \omega$ ($k - \omega$) for the turbulence model were equal to 0.1734, 0.0721, 0.0311, 0.0204, 0.0351, 0.0782, 0.1712, $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) for the turbulence model were equal to 0.2065, 0.0789, 0.0318, 0.0212, 0.0359, 0.0787, 0.2019, lift coefficients (C_l) SST $k - \omega$ ($k - \omega$) for the turbulence model were -0.9169 , -0.9169 , -0.9239 , -0.5394 , 0.0842 , 0.7416 , 1.3134 , 1.1229 , $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) for the turbulent model was -0.9278 , -0.8674 , -0.5336 , 0.0848 , 0.0359 , 0.0787 , 0.2019 at angles of attack of the DU-06-W-200 airfoil equal to -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15° , respectively. In assessing the compatibility of the model and the experimental results of the DU-06-W-200 airfoil, the conformity criterion χ^2 , root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R^2), and average bias error (ABE) were used. Based on the results of a study of the dependence of the ratio of the drag and lift coefficients on changes in the angle of attack, carried out using the SST $k - \omega$ ($k - \omega$) and $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) turbulence models, it has been found that the maximum value of the ratio of the drag and lift coefficients is 21 at the optimal angle attack inclination equal to 5° .

Keywords: DU-06-W-200 airfoil, Ansys Fluent, CFD modeling, SST $k - \omega$ ($k - \omega$) and $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) turbulent model, χ^2 conformity criterion, root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R^2), average bias error (MBE)

For citation: Uzakov G. N., Sednin V. A., Safarov A. B., Mamedov R. A., Khatamov I. A. (2024) CFD-Modeling of the Airfoil of the Blades of a Wind Power Plant with a Vertical Axis in the Ansys Fluent System. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 97–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-97-114> (in Russian)

Введение

В мире использование возобновляемых источников энергии, в том числе энергии ветра, занимает одно из ведущих мест в стабилизации экологических проблем и экономии природного топлива. Многие страны приняли стратегии по повышению эффективности ветроэнергетических установок и развитию их использования в изменчивых климатических условиях. В настоящее время лидирующими по разработке и внедрению ветроэнергетических установок являются Китай, Индия и ряд европейских государств. Китай – лидер по производству электротроэнергии за счет ветроэнергети-

ческих устройств, установленная мощность которых составляет 82 ГВт в год, затем по выработке электроэнергии за счет ветроэлектростанций следуют европейские страны с установленной мощностью 21,6 ГВт, за ними – США (13,6 ГВт), Индия (11,5 ГВт) и Латинская Америка (6,2 ГВт) [1]. В первой половине 2023 г. было установлено на 38 % больше новых ветроэнергетических установок, чем в 2022 г., что прибавило 100 ГВт с июня 2022 г. по июнь 2023 г., а темп годового роста установленной мощности увеличился на 11,4 % [2].

Республика Узбекистан также разработала меры по повышению эффективности реформ, направленных на переход к «зеленой» экономике к 2030 г. Ведется практическая работа по увеличению производственной мощности возобновляемых источников энергии до 15 ГВт и их доли более чем 30 % от общего объема производства электроэнергии [3]. Проводятся научные исследования по разработке и повышению эффективности возобновляемых источников энергии, адаптированных к климатическим условиям Узбекистана [4–8].

Важно усовершенствование конструкций ветроэнергетических установок с целью повышения их эффективности при изменчивых скоростях ветра главным образом за счет изучения аэродинамики их лопастей. Поэтому в данной статье проанализированы научные работы по созданию и исследованию аэродинамических профилей различной формы, используемых в ветроэнергетических установках.

Группа ученых под руководством Фархана Л. Рашида провела аэродинамическое исследование влияния воздушного потока вокруг профиля NASA 2412 различной геометрии с использованием методов CFD. Основным направлением научных исследований является разработка эффективных инженерных процедур анализа воздушного потока вокруг модифицированного профиля NASA 2412, связанного с CFD-моделью. Моделирование выполнялось путем решения основных уравнений (непрерывности, усредненного, по Рейнольдсу, Навье-Стоксу, и уравнения энергии) в двумерном формате с использованием анализа Fluent при числе Рейнольдса $1 \cdot 10^6$. По представленным результатам установлено, что коэффициенты сопротивления и подъемной силы возрастают соответственно с повышением угла атаки до момента достижения остановки. При этом оптимальный угол атаки составил 4° [9].

Шер Афган Хан провел исследование, сравнивающее влияние различных моделей турбулентности на прогнозы CFD аэродинамического профиля NASA 0018. В данном исследовании представлен численный анализ аэродинамических характеристик профиля NASA0018 с использованием различных моделей турбулентности. Для этого численного исследования использовалась модель Ansys Fluent Computational Fluid Dynamics (CFD). Имеющиеся экспериментальные данные аэродинамического профиля NASA0018 использованы для сравнения численных результатов, и оценены различия в коэффициентах подъемной силы, сопротивления и давления соответственно. Замеры аэродинамических коэффициентов

и давления вдоль профиля проводились при $Re = 0,8 \cdot 10^5$ до $Re = 0,3 \cdot 10^6$ и углах атаки (от 0 до 18°). Модель SST $k - \omega$ обеспечила наилучшие прогнозы коэффициента подъемной силы для малых углов атаки [10].

Брайан Стинвейк и Пабло Друзтта смоделировали воздушный поток вокруг профиля 2D NACA 0012 с использованием модели турбулентного потока RANS SST при различных углах атаки и сравнили его с экспериментальными данными. Модифицированный профиль показал более высокие значения C_l и C_d по сравнению со стандартным NACA 0012. Учитывая высокую эффективность предлагаемого аэродинамического профиля, установлено, что он может быть использован в ветроэнергетических установках с вертикальной осью [11].

Насер Шелил разработал 2D-модель аэродинамического профиля DTU-LN221 и проанализировал его в системе Ansys Fluent. ANSYS Fluent смоделировал и сравнил предложенный аэродинамический профиль с семью различными моделями турбулентности. Результаты моделирования аэродинамического профиля с использованием различных моделей турбулентности сравниваются с экспериментальными данными аэродинамической трубы в тех же условиях эксплуатации. На основе экспериментальных данных из аэродинамической трубы обнаружено, что эффективность между предсказанными расчетной гидродинамикой (CFD) коэффициентами аэродинамической силы высока, особенно при угле атаки от -5° до $+10^\circ$. Результаты показывают, что для повышения производительности ветроэнергетической установки рекомендуется использовать аэродинамические профили лопастей ветротурбины при высокой скорости и низкой температуре воздуха [12].

В настоящее время актуально проведение исследований по использованию аэродинамических профилей DU-06-W-200 в ветроэнергетических установках с вертикальной осью и определение их оптимальных параметров в условиях изменчивого потока ветра.

Цель исследования заключается в моделировании аэродинамического профиля DU-06-W-200 для ветроэнергетических установок с вертикальной осью в системе Ansys Fluent, оценке его совместимости с экспериментальными данными и определении оптимального значения угла атаки.

Метод исследования

Поскольку целью исследования является CFD-моделирование аэродинамического профиля DU-06-W-200 в системе Ansys Fluent и сравнение результатов с экспериментальными данными, следующие аэродинамические параметры являются важными:

число Рейнолдса [13]

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}; \quad (1)$$

коэффициент подъемной силы [14]

$$C_l = \frac{F_l}{P_l A} = \frac{2F_l}{\rho A V^2}; \quad (2)$$

коэффициент сопротивления [15]

$$C_d = \frac{F_d}{P_d A} = \frac{2F_d}{\rho A V^2}, \quad (3)$$

где ρ – плотность воздушного потока, кг/м^3 ; V – скорость потока, м/с ; L – длина хорды аэродинамического профиля, м ; μ – динамическая вязкость воздушного потока, $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$; F_l – подъемная сила, Н ; P_d – динамическое давление, Па ; A – поверхность профиля, м^2 ; F_d – сила сопротивления воздуха, Н .

Турбулентные модели k – epsilon (k – ϵ) и SST k – omega (k – ω) [16–19] являются наиболее распространенными, используемыми в вычислении динамики газа и жидкостей (CFD) для моделирования средних свойств потока в условиях турбулентного потока. На основе данной модели в системе Ansys Fluent можно получить модели зависимости аэродинамических профилей от изменения потока ветра.

Турбулентная модель k – epsilon (k – ϵ):

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + V \epsilon} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon. \end{cases} \quad (4)$$

Турбулентная модель SST k – omega (k – ω):

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{cases} \quad (5)$$

где u_i , u_j – составляющие скорости в соответствующем направлении; μ_t – вихревая вязкость; G_b – кинетическая энергия выталкивающей силы;

G_k – турбулентная кинетическая энергия; Y_M – вклад переменного расширения при турбулентности сжатия в общую скорость диссипации; S – инвариант тензора деформаций; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ – константы; k – турбулентная кинетическая энергия; P – производный член k ; ν_t – кинематическая вязкость; ω – удельная скорость диссипации; F_1 – функция смешивания.

Тест на пригодность (Goodness of Fit Test)

Степень соответствия – это статистический тест, который оценивает, насколько хорошо набор наблюдаемых значений соответствует значениям, ожидаемым в действительной модели. Существует множество методов определения соответствия, включая χ^2 , среднеквадратическую погрешность (RMSE), коэффициент детерминации (R^2), среднюю ошибку смещения (MBE) [20, 21].

Степень соответствия (χ^2)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{a_i - b_i}{b_i} \right)^2. \quad (6)$$

Среднеквадратическая погрешность (RMSE)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (R_{ai} - R_{bi})^2}, \quad (7)$$

где N – количество данных; R_{ai} – экспериментальные данные; R_{bi} – данные модели.

Коэффициент детерминации (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (R_{ai} - R_{bi})^2}{\sum_{i=1}^N (R_{ai} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ai})^2}. \quad (8)$$

Средняя ошибка смещения (MBE)

$$\text{MBE} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (R_{ai} - R_{bi})^2. \quad (9)$$

В табл. 1 представлены данные о геометрических размерах аэродинамического профиля DU-06-W-200. Всего по этим данным получена 201 точка по осям X и Y . В правой части таблицы расположен модифицированный файл данных аэродинамического профиля DU-06-W-200, закодированный для системы Ansys Fluent.

Таблица 1
Данные геометрических размеров аэродинамического профиля DU-06-W-200
Data on the geometric dimensions of the DU-06-W-200 airfoil

Файл существующих данных аэродинамического профиля DU-06-W-200			Модифицированный файл данных профиля DU-06-W-200				
X	Y	→	Номер группы	Количество точек	X	Y	Z
1,00300	0,00000		1	1	1,00300	0,00000	0
1,00003	0,00033		1	2	1,00003	0,00033	0
0,99507	0,00099		1	3	0,99507	0,00099	0
0,98874	0,00179		1	4	0,98874	0,00179	0
0,98084	0,00282		1	5	0,98084	0,00282	0
0,97135	0,00413		1	6	0,97135	0,00413	0

При получении результатов и моделировании аэродинамического профиля DU-06-W-200 при различных углах атаки (α) в системе Ansys Fluent необходимо создать сетку и геометрические размеры профиля. На рис. 1а представлена область двумерной геометрии, а на рис 1б – сгенерированный профиль сетки. При этом длина аэродинамического профиля принята равной 1 м. Количество узлов в сетке 37495, количество элементов 36790.

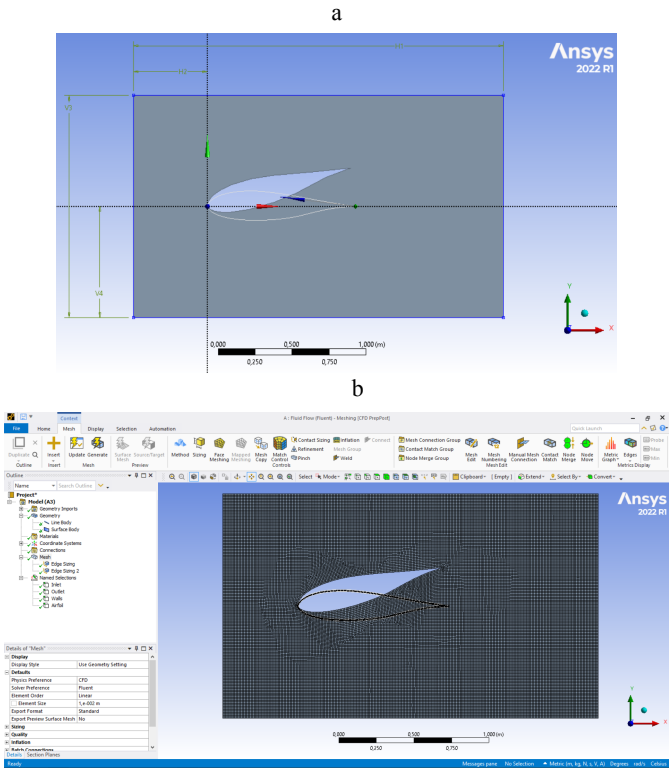


Рис. 1. Область 2D-геометрии аэродинамического профиля DU-06-W-200 (а),
профиль сетки, созданный для поверхности DU-06-W-200 (b)
Fig. 1. Domain of 2D geometry of the airfoil DU-06-W-200 (a),
grid profile created for the surface of DU-06-W-200 (b)

Определение граничных условий является важной частью любой вычислительной задачи динамики жидкостей и газа. Модель исследуемого аэродинамического профиля предполагает переменный угол атаки турбулентного потока над его верхней частью. Для проведения моделирования получены граничные условия задачи и некоторые исходные данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Граничные условия и исходные данные
Boundary conditions and the initial data

Параметр	Значение
Тип анализа	Устойчивое состояние
Тип аэродинамического профиля	DU-06-W-200
Скорость потока	15 m/s
Рабочая температура	23 °C
Рабочее давление	$1 \cdot 10^5$ Pa
Плотность воздушного потока	$1,23 \text{ kg/m}^3$
Длина хорды аэродинамического профиля	$L = 1 \text{ m}$
Динамическая вязкость воздушного потока	$\mu = 1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$
Типы турбулентных моделей	SST $k - \omega$, $k - \epsilon$ (SST $k - \epsilon$)
Число Рейнольдса	$Re = 1,05 \cdot 10^6$
Турбулентный поток	$Re > 5 \cdot 10^5$

На рис. 2 представлена модель обнаружения значений коэффициентов сопротивления и подъемной силы при аэродинамической скорости потока на поверхности DU-06-W-200, равной 15 м/с, число Рейнольдса $1,05 \cdot 10^6$, углы атаки -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15° . При этом использовались модели турбулентности SST $k - \omega$ ($k - \omega$), $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$). Расчеты проводились в количестве 500 итераций.

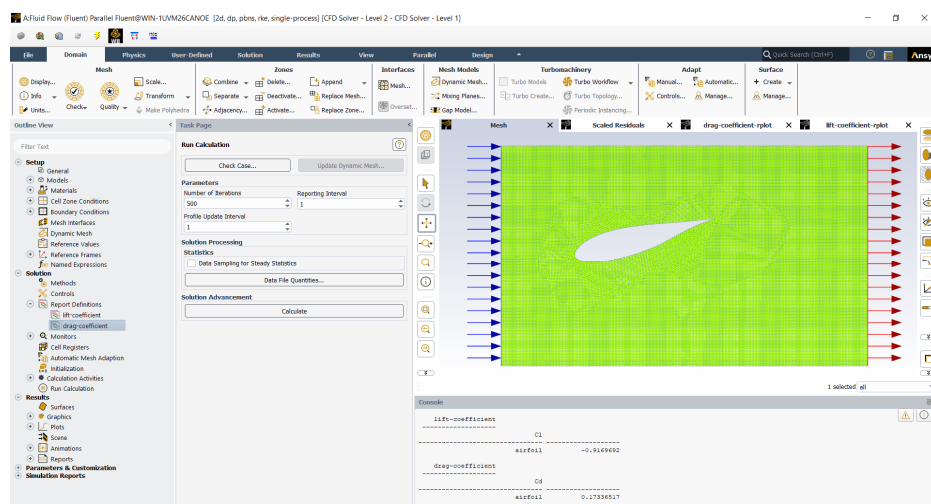


Рис. 2. Моделирование аэродинамической поверхности DU-06-W-200 при различных углах атаки

Fig. 2. Modeling of the DU-06-W-200 airfoil at various angles of attack

Результаты и обсуждения

По результатам исследований на рис. 3 представлены значения коэффициентов сопротивления и подъемной силы аэродинамического профиля DU-06-W-200. Было установлено, что коэффициенты сопротивления (C_d) SST $k - \omega$ ($k - \omega$) для модели турбулентности равны: 0,1734, 0,0721, 0,0311, 0,0204, $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) для модели турбулентности: 0,2065, 0,0789, 0,0318, 0,0212, коэффициенты подъемной силы (C_l) SST $k - \omega$ ($k - \omega$) для модели турбулентности: -0,9169, -0,9239, -0,5394, 0,0842, $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) для турбулентной модели: 0,9278, -0,8674, -0,5336, 0,0848 при углах атаки -15° , -10° , -5° , 0 соответственно.

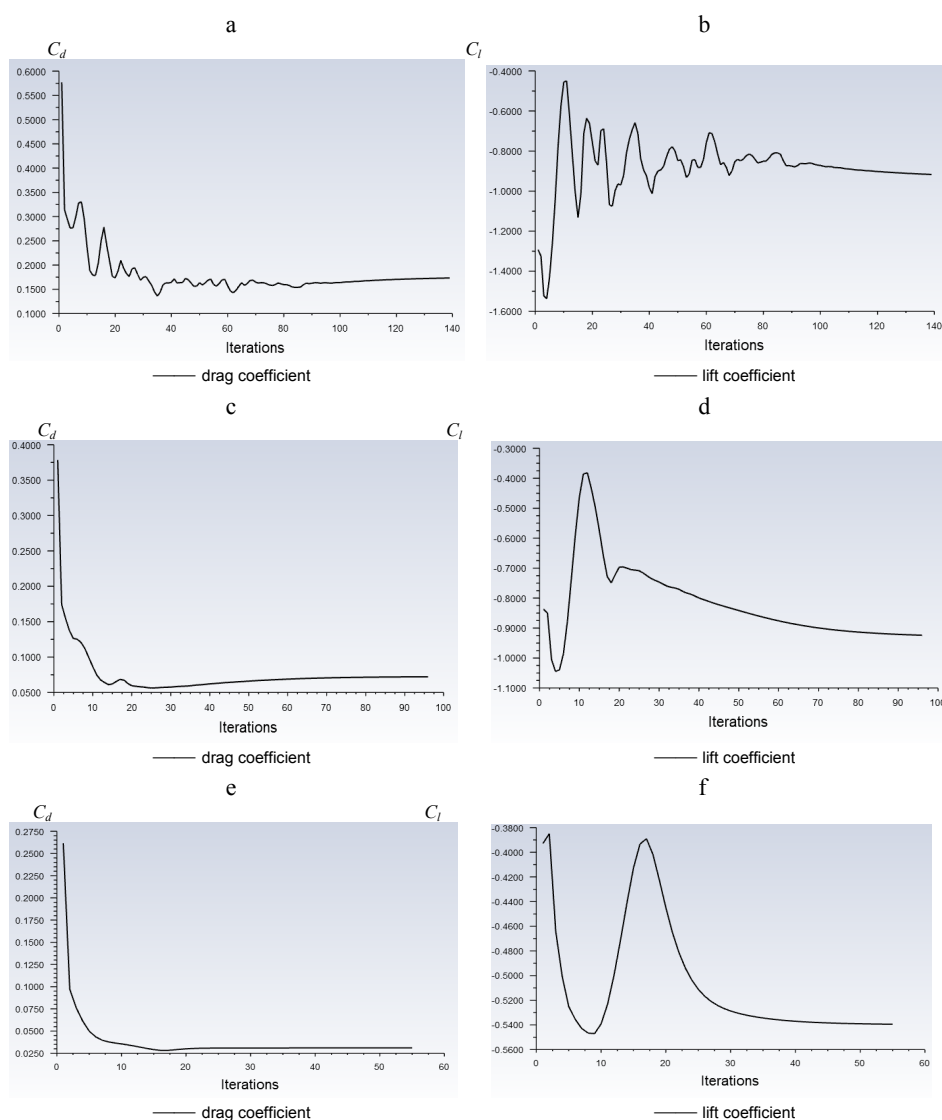


Рис. 3. Кривые коэффициентов сопротивления и подъемной силы аэродинамического профиля DU-06-W-200: a, b – $\alpha = -15^\circ$; c, d – -10° ; e, f – -5° ; g, h – 0 (окончание рис. на с. 106)

Fig. 3. Curves of drag and lift coefficients of the DU-06-W-200 airfoil:
a, b – $\alpha = -15^\circ$; c, d – -10° ; e, f – -5° ; g, h – 0 (ending of the Fig. is on p. 106)

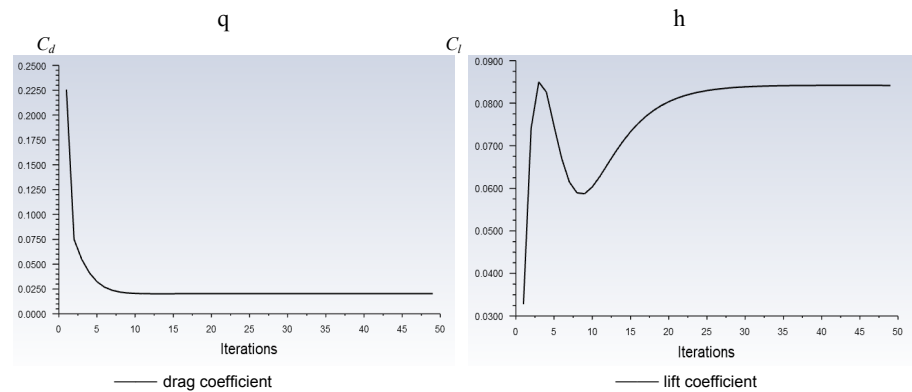


Рис. 3. Окончание

Fig. 3. Ending

Результаты моделирования зависимости давления на аэродинамический профиль DU-06-W-200 изменчивой скорости потока при углах атаки, равных -15° , -10° , -5° , 0 , представлены на рис. 4.

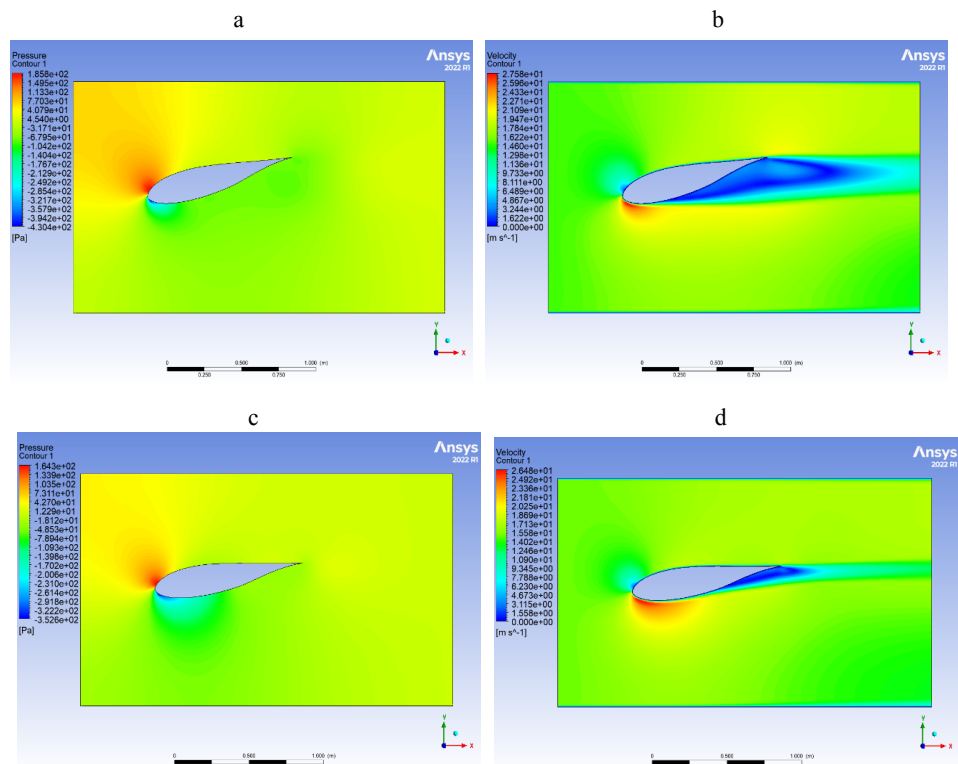


Рис. 4. Результаты зависимости давления от изменчивой скорости потока на аэродинамический профиль DU-06-W-200 при углах атаки, равных -15° , -10° , -5° , 0 :
a, b – $\alpha = -15^\circ$; c, d – -10° ; e, f – -5° ; g, h – 0 (окончание рис. на с. 107)

Fig. 4. Results of pressure dependence versus variable flow rate on the DU-06-W-200 airfoil at angles of attack equal to -15° , -10° , -5° , 0 : a, b – $\alpha = -15^\circ$; c, d – -10° ; e, f – -5° ; g, h – 0 (ending of the Fig. is on p. 107)

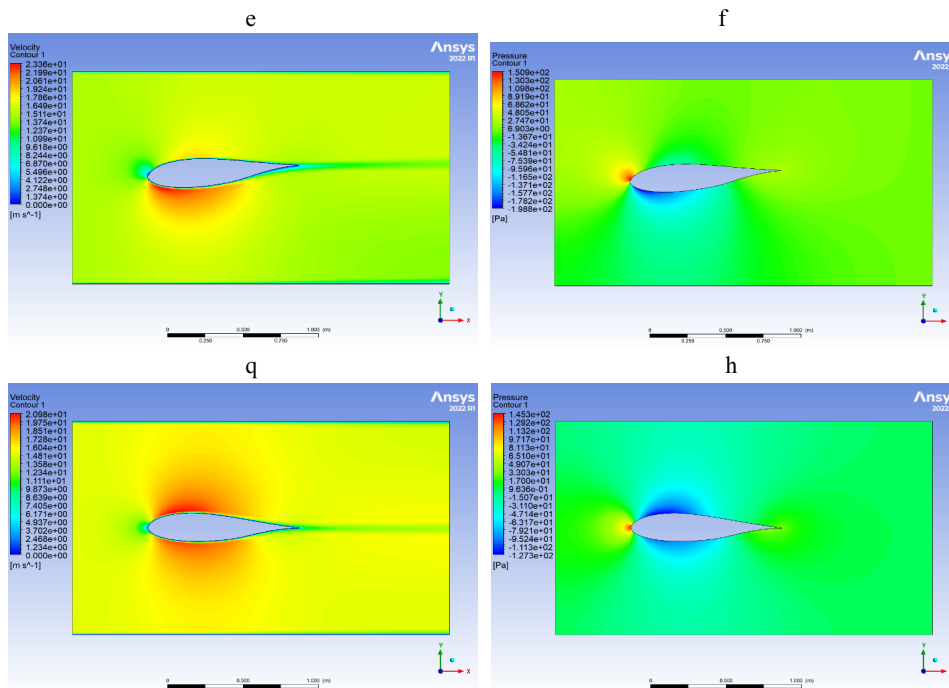


Рис. 4. Окончание

Fig. 4. Ending

На рис. 5 представлены коэффициенты подъемной силы (C_l) SST $k - \omega$ ($k - \omega$) для турбулентной модели, равные: 0,7416, 1,3134, 1,1229, $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) для модели турбулентности: 0,7394, 1,1215, 1,122, коэффициенты сопротивления (C_d) SST $k - \omega$ ($k - \omega$) для модели турбулентности: 0,0351, 0,0782, 0,1712, $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) для модели турбулентности: 0,0359, 0,0787, 0,2019, позволяющие определить коэффициенты сопротивления и подъемной силы аэродинамического профиля DU-06-W-200 при углах атаки 5° , 10° , 15° соответственно.

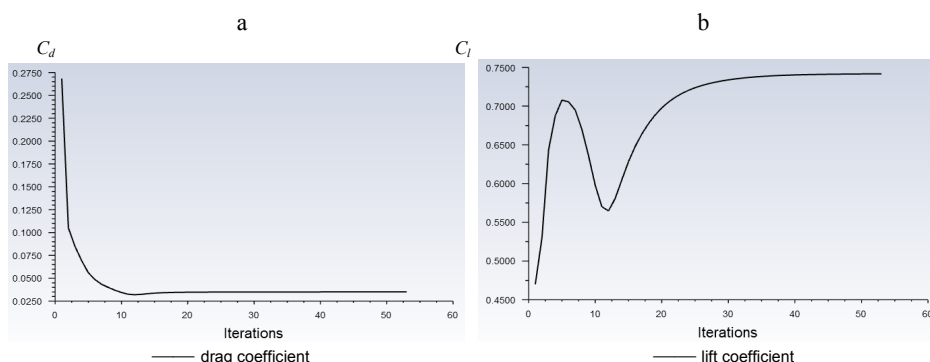


Рис. 5. Результаты определения коэффициентов сопротивления и подъемной силы аэродинамического профиля DU-06-W-200: а, b – $\alpha = 5^\circ$; c, d – 10° ; e, f – 15° (окончание рис. на с. 108)

Fig. 5. Results of determining the drag and lift coefficients of the DU-06-W-200 airfoil: а, b – $\alpha = 5^\circ$; c, d – 10° ; e, f – 15° (ending of the Fig. is on p. 108)

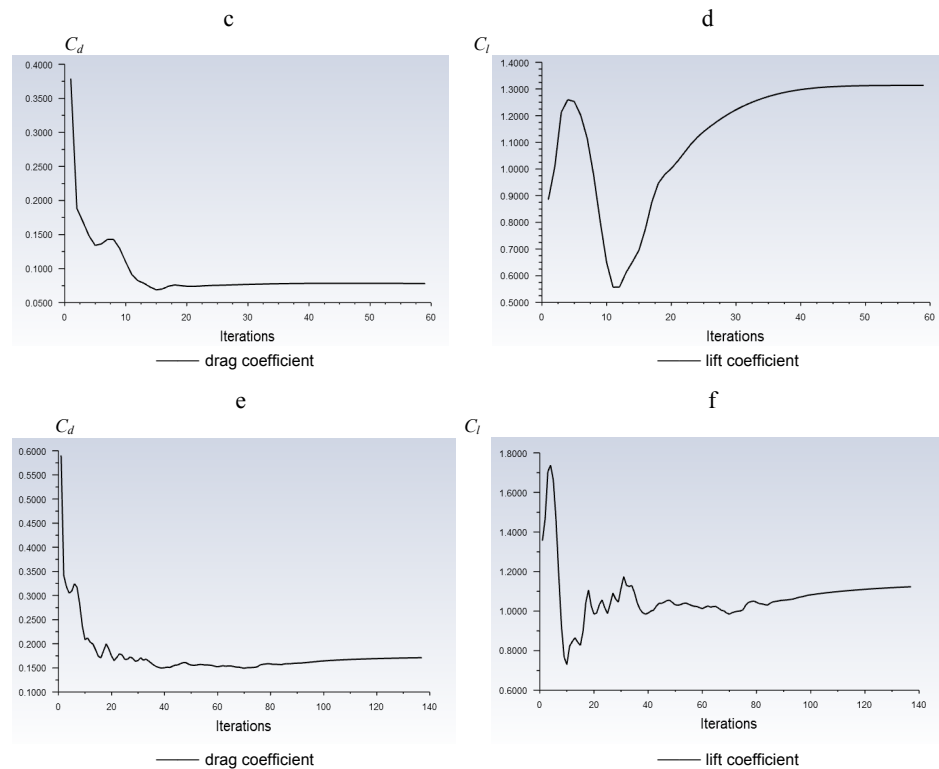


Рис. 5. Окончание

Fig. 5. Ending

Результаты симуляции зависимости давления на аэродинамический профиль DU-06-W-200 от изменчивой скорости потока при углах атаки, равных 5° , 10° , 15° , представлены на рис. 6.

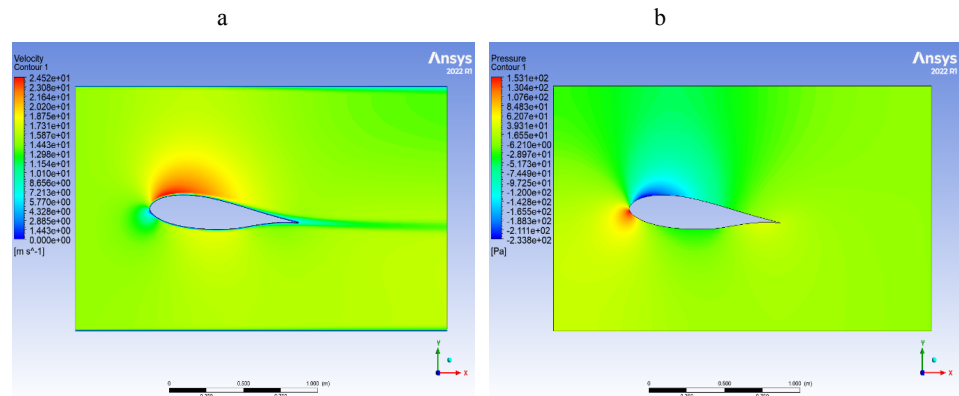


Рис. 6. Результаты симуляции зависимости давления на аэродинамический профиль DU-06-W-200 от изменчивой скорости потока при углах атаки, равных 5° , 10° , 15° (окончание рис. на с. 109)

Fig. 6. Results of simulation of pressure dependence on variable flow rate on the DU-06-W-200 airfoil at angles of attack equal to 5° , 10° , 15° (ending of the Fig. is on p. 109)

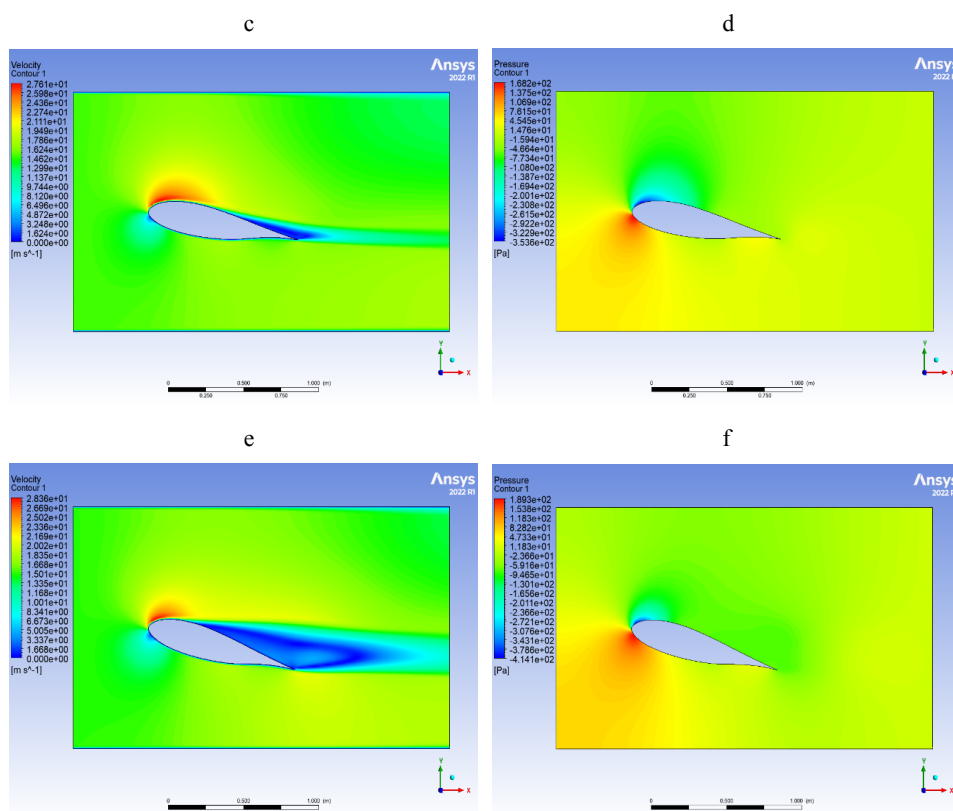


Рис. 6. Окончание
Fig. 6. Ending

Результаты сравнения коэффициентов сопротивления и подъемной силы модели и экспериментальных [22] в зависимости от изменения угла атаки представлены на рис. 7. Приведены результаты экспериментальных данных и определения коэффициентов сопротивления и подъемной силы при углах атаки, равных $-15^\circ \dots +15^\circ$, для SST $k - \omega$ ($k - \omega$), $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) турбулентных моделей, полученных в Ansys Fluent, при аэродинамической скорости потока на профиль DU-06-W-200, равной 15 м/с.

На рис. 8 показаны результаты зависимости соотношения коэффициентов сопротивления и подъемной силы от изменения угла атаки. При этом использовались модели турбулентности SST $k - \omega$ ($k - \omega$), $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$). По результатам исследования установлено, что максимальное значение отношения коэффициентов сопротивления и подъема силы составляет 21 при оптимальном угле наклона атаки, равном 5° .

В табл. 3 приведены результаты оценки соответствия модельных и экспериментальных данных коэффициентов сопротивления и подъемной силы аэродинамического профиля DU-06-W-200. При этом использовались методики критерия соответствия χ^2 , среднеквадратичной погрешности (RMSE), коэффициента детерминации (R^2), средней погрешности смеще-

ния (МВЕ). Исследование показало, что наиболее эффективными оказались моделирование коэффициента подъемной силы (C_l) через $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) и коэффициента сопротивления (C_d) через модель SST $k - \omega$ ($k - \omega$).

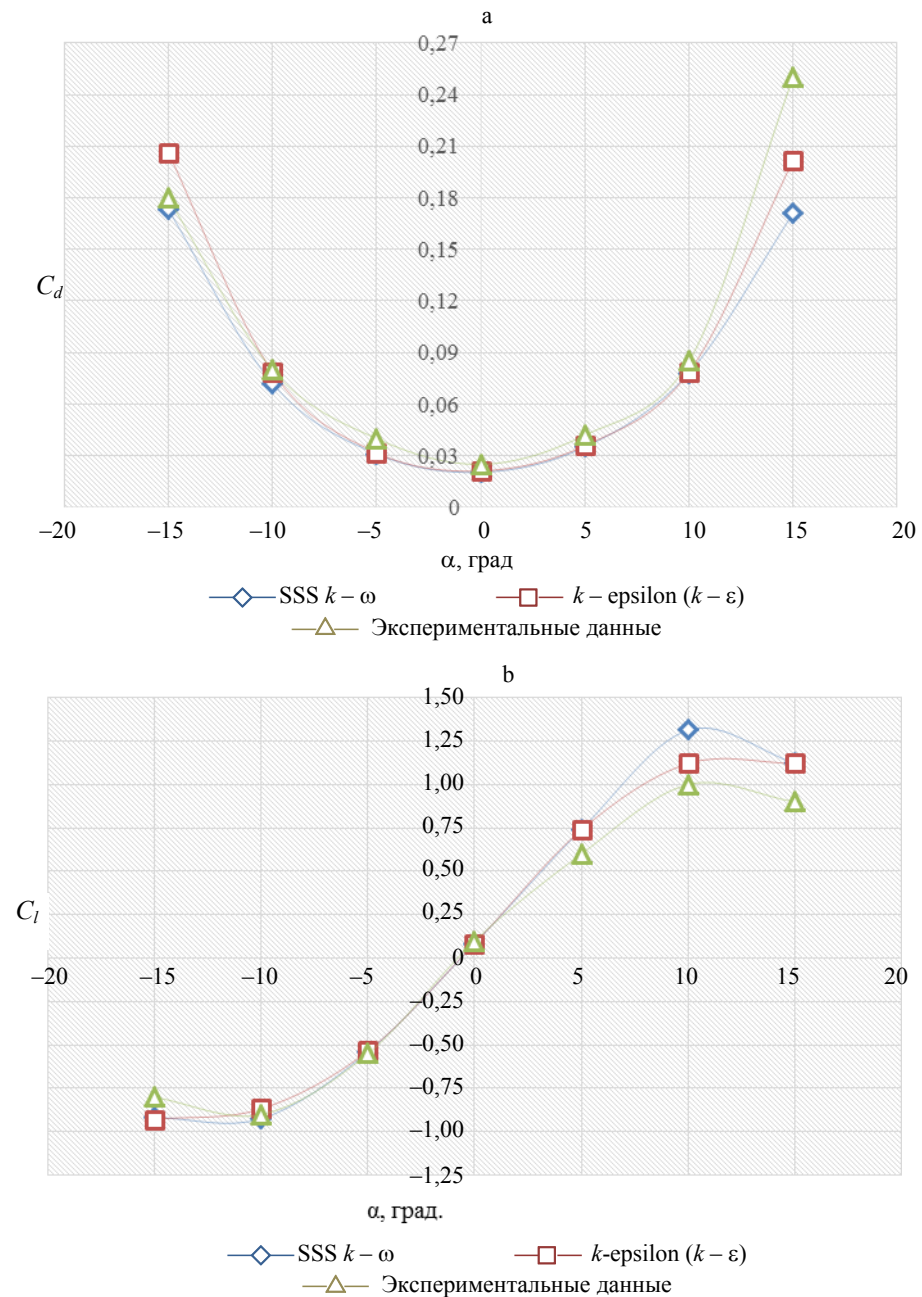


Рис. 7. Результаты сравнения коэффициентов сопротивления (а) и подъемной силы (б) модели и экспериментальных данных в зависимости от изменения угла атаки

Fig. 7. Results of comparison of drag (a) and lift (b) coefficients of the model and experimental data from changing the angle of attack

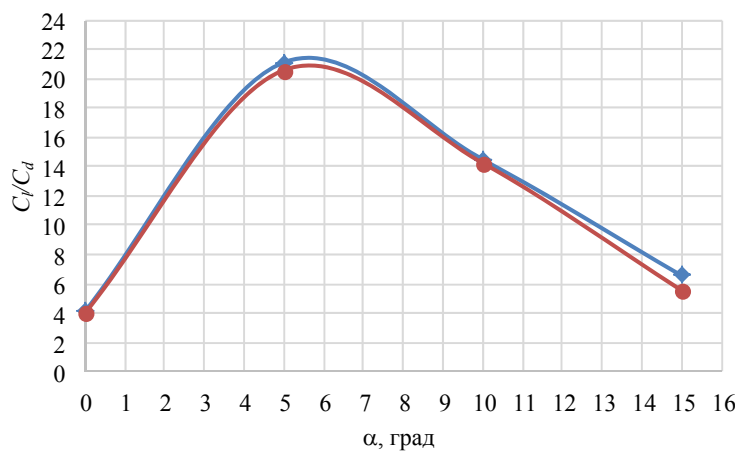


Рис. 8. Кривые зависимости соотношения коэффициентов сопротивления и подъема силы от изменения угла атаки

Fig. 8. Curves of the relationship between the coefficients of drag and lifting force on changes in the angle of attack

Таблица 3

Результаты оценки соответствия результатов эксперимента и модели
Results of assessing the correspondence between the experimental results and the model

Вид модели	Коэффициент	χ^2	RMSE	R^2	MBE
Модель SST $k - \omega$ ($k - \omega$)	C_d	0,0303	0,0320	0,9328	0,00093
	C_l	0,1714	0,1614	0,9955	0,026079
Модель $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$)	C_d	0,0167	0,0213	0,9327	0,000454
	C_l	0,0821	0,1203	0,9942	0,014482

ВЫВОДЫ

1. Изучена зависимость материала и формы лопастей турбины, позволяющей повышать надежность и эффективность ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения при изменчивых потоках ветра, а также ее аэродинамики. На основании анализа установлено, что использование модели CFD системы ANSYS Fluent при разработке оптимальных размеров лопастей ветротурбины дает положительный эффект.

2. Аэродинамический профиль DU-06-W-200 был смоделирован с углами атаки в промежутке от -15° до $+15^\circ$, граничными условиями и скоростью потока входных данных 15 м/с, рабочей температурой 23°C , рабочим давлением $1 \cdot 10^5$ Па, плотностью воздушного потока $1,23 \text{ кг/м}^3$, длина хорды аэродинамического профиля 1 м, динамическая вязкость воздушного потока $1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$, типы турбулентных моделей SST $k - \omega$ ($k - \omega$), $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$), число Рейнольдса $1,05 \cdot 10^6$.

3. Установлено, что коэффициенты сопротивления (C_d) SST $k - \omega$ ($k - \omega$) для модели турбулентности: 0,1734, 0,0721, 0,0311, 0,0204,

0,0351, 0,0782, 0,1712, $k - \epsilon$ для модели турбулентности: 0,2065, 0,0789, 0,0318, 0,0212, 0,0359, 0,0787, 0,2019, коэффициенты подъемной силы (C_l) SST $k - \omega$ ($k - \omega$) для модели турбулентности: $-0,9169$, $-0,9169$, $-0,9239$, $-0,5394$, 0,0842, 0,7416, 1,3134, 1,1229, $k - \epsilon$ для турбулентной модели: $-0,9278$, $-0,8674$, $-0,5336$, 0,0848, 0,0359, 0,0787, 0,2019 при углах атаки аэродинамического профиля DU-06-W-200, равных -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15° соответственно.

4. При оценке совместимости модели и результатов экспериментов аэродинамического профиля DU-06-W-200 были использованы: критерий соответствия χ^2 , среднеквадратичная погрешность (RMSE), коэффициент детерминации (R^2), средняя погрешность смещения (MBE). По результатам исследования установлено, что наиболее эффективными оказались моделирование коэффициента подъемной силы (C_l) через $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) и коэффициента сопротивления (C_d) через модель SST $k - \omega$ ($k - \omega$).

5. Оценка зависимости соотношения коэффициентов сопротивления и подъемной силы от изменения угла атаки осуществлялась с помощью моделей турбулентности SST $k - \omega$ ($k - \omega$), $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$). По результатам исследования установлено, что максимальное значение отношения коэффициентов сопротивления и подъема силы составляет 21 при оптимальном угле наклона атаки, равном 5° .

ЛИТЕРАТУРА

1. Global Wind Report 2023 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://gwec.net/globalwindreport2023/#:~:text=Total%20installed%20global%20capacity%20grew,%2Dyear%20growth%20of%2015%25>.
2. WWEA Half-year Report 2023: Additional Momentum for Windpower in 2023[Electronic Resource]. Mode of access: <https://wwindea.org/wwea-half-year-report-2023-additional-momentum-for-windpower-in-2023>.
3. О мерах по повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан на «зеленую» экономику до 2030 года: постановление Президента Республики Узбекистан, 02 дек. 2022 г., № ПП-436 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lex.uz/docs/6303233>.
4. Тепловой и материальный баланс гелиопиролизного устройства / Г. Н. Узаков [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 1. С. 57–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-57-65>.
5. Design and Modeling of Dynamic modes of Low Speed Electric Generators for Electric Power Generation From Renewable Energy Sources / A. B. Safarov [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2686, № 1. P. 020013. <https://doi.org/10.1063/5.0111646>.
6. Safarov, A. B. Study of Effective Omni-Directional Vertical Axis Wind Turbine for low Speed Regions / A. B. Safarov, R. A. Mamedov // IIUM Engineering Journal. 2021. Vol. 22, No 2. P. 149–160. <https://doi.org/10.31436/iiuj.v22i2.1565>.
7. Математическое моделирование комбинированной системы теплоснабжения солнечного дома / Г. Н. Узаков [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 5. С. 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-412-421>.
8. Assessment of wind and hydropower potential of Bukhara region / N. N. Sadullayev [et al.] // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 614. P. 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012036>.
9. Rashid, F. L. Numerical Study of the Air Flow Over Modified NACA 2412 Airfoil Using CFD / F. L. Rashid, H. S. Abd, E. Q. Hussein // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2415, No 1. P. 20005. <https://doi.org/10.1063/5.0092303>.

10. Comparing the Effect of Different Turbulence Models on The CFD Predictions of NACA0018 Airfoil Aerodynamics / S. A. Khan [et al.] // *CFD Letters*. 2020. Vol. 12, Is. 3. P. 1–10. <https://doi.org/10.37934/cfdl.12.3.110>.
11. Steenwijk, B. Numerical Study of Turbulent Flows Over a NACA 0012 Airfoil: Insights Into Its Performance and the Addition of a Slotted Flap / B. Steenwijk, P. Druetta // *Appl. Sci.* 2023. Vol. 13, No 13. P. 7890. <https://doi.org/10.3390/app13137890>.
12. Shelil, N. 2D Numerical Simulation Study of Airfoil Performance [Electronic Resource] / N. Shelil // *Wind Energy Science Discussion [Preprint]*. 2021. Mode of access: <https://wes.copernicus.org/preprints/wes-2021-45/>. <https://doi.org/10.5194/wes-2021-45>.
13. Görgülü, Y. F. CFD Analysis of a Naca 0009 Aerofoil at a Low Reynolds Number / Y. F. Görgülü, M. A. Özgür, R. Köse // *Politeknik Dergisi*. 2021. Vol. 24, No 3. P. 1237–1242. <https://doi.org/10.2339/politeknik.877391>.
14. Kulshreshtha, A. FEM/CFD Analysis of Wings at Different Angle of Attack / A. Kulshreshtha, S. K. Gupta, P. Singhal // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26, Part 2. P. 1638–1643. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.342>.
15. CFD Study of Drag and Lift Coefficients of Non-Spherical Particles / A. Ullah [et al.] // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.10.003>.
16. Shirzadi, M. Improvement of k-epsilon Turbulence Model for CFD Simulation of Atmospheric Boundary Layer Around a High-Rise Building Using Stochastic Optimization and Monte Carlo Sampling Technique / M. Shirzadi, P. A. Mirzaei, M. Naghashadegan // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017. Vol. 171. P. 366–379. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.005>.
17. Wei, H. Assessment of Different Turbulence Models on the Large Scale Internal Heated Water pool Natural Convection Simulation / H. Wei, Y. Chen // *Annals of Nuclear Energy*. 2019. Vol. 131. P. 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.03.018>.
18. Rezaeiha, A. On the accuracy of Turbulence Models for CFD Simulations of Vertical Axis Wind Turbines / A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken // *Energy*. 2019. Vol. 180. P. 838–857. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.053>.
19. Lanzafame, R. Wind Turbine CFD Modeling Using a Correlation-Based Transitional Model / R. Lanzafame, S. Mauro, M. Messina // *Renewable Energy*. 2013. Vol. 52. P. 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.007>.
20. Staudte, R. G. Evidence for Goodness of Fit in Karl Pearson Chi-Squared Statistics / R. G. Staudte // *Statistics*. 2020. Vol. 54, Is. 6. P. 1287–1310. <https://doi.org/10.1080/02331888.2020.1862115>.
21. Chai, T. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) –Arguments against avoiding RMSE in the literature / T. Chai, R. R. Draxler // *Geoscientific Model Development*. 2014. Vol. 7, No 3. P. 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>.
22. Aerodynamic Performance of VAWT Airfoils: Comparison between Wind Tunnel Testing Using a New Three-Component Strain Gauge Balance and CFD Modelling / L. Santamaria [et al.] // *Energies*. 2022. Vol. 15, Is. 24. P. 9351. <https://doi.org/10.3390/en15249351>.

Поступила 19.12.2023 Подписана в печать 19.02.2023 Опубликовано онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. *Wind Report 2023*. Available at: <https://gwec.net/globalwindreport2023/#:~:text=Total%20in stalled%20global%20capacity%20grew,%2Dyear%20growth%20of%2015%25>.
2. *WWEA Half-year Report 2023: Additional Momentum for Windpower in 2023*. Available at: <https://wwindea.org/wwea-half-year-report-2023-additional-momentum-for-windpower-in-2023>.
3. *Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan “On Measures to Improve the Effectiveness of Reforms Aimed at the Transition of the Republic of Uzbekistan to a “Green” Economy by 2030, dated December 2, 2022, No RP-436*. <https://lex.uz/docs/6303233> (in Russian).
4. Uzakov G. N., Novik A. V., Davlonov X. A., Almardanov X. A., Chuliev S. E. (2023) Heat and Material Balance of Heliopyrolysis Device. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (1), 57–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-57-65> (in Russian).

5. Safarov A. B., Davlonov H. A., Mamedov R. A., Charieva M., Kodirov D. (2022) Design and Modeling of Dynamic Modes of Low Speed Electric Generators for Electric Power Generation from Renewable Energy Sources. *AIP Conference Proceedings*, 2686 (1), 020013. <https://doi.org/10.1063/5.0111646>.
6. Safarov A. B., Mamedov R. A. (2021) Study of Effective Omni-Directional Vertical Axis Wind turbine for Low Speed Regions. *IJUM Engineering Journal*, 22 (2), 149–160. <https://doi.org/10.31436/ijumej.v22i2.1565>.
7. Uzakov G. N., Charvinski V. L., Ibragimov U. Kh., Khamraev S. I., Kamolov B. I. (2022) Mathematical Modeling of the Combined Heat Supply System of a Solar House. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (5), 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-412-421> (in Russian).
8. Sadullayev N. N., Safarov A. B., Mamedov R. A., Kodirov D. (2020) Assessment of Wind and Hydropower Potential of Bukhara Region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 614, 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012036>.
9. Rashid F. L., Abd H. S., Hussein E. Q. (2022) Numerical Study of the Air Flow over Modified NACA 2412 Airfoil Using CFD. *AIP Conference Proceedings*, 2415 (1), 020005. <https://doi.org/10.1063/5.0092303>.
10. Khan S. A., Bashir M., Baig M. A. A., Ali F. A. G. M. (2020) Comparing the Effect of Different Turbulence Models on The CFD Predictions of NACA0018 Airfoil Aerodynamics. *CFD Letters*, 12 (3), 1–10. <https://doi.org/10.37934/cfdl.12.3.110>.
11. Steenwijk B., Druetta P. (2023) Numerical Study of Turbulent Flows over a NACA 0012 Airfoil: Insights into Its Performance and the Addition of a Slotted Flap. *Applied Sciences*, 13 (13), 7890. <https://doi.org/10.3390/app13137890>.
12. Shelil N. (2021) 2D Numerical Simulation Study of Airfoil Performance. *Wind Energy Science Discussion* [Preprint]. Available at: <https://wes.copernicus.org/preprints/wes-2021-45/>. <https://doi.org/10.5194/wes-2021-45>.
13. Görgülü Y. F., Özgür M. A., Köse R. (2021) CFD Analysis of a Naca 0009 Aerofoil at a Low Reynolds Number. *Politeknik Dergisi*, 24 (3), P. 1237–1242. <https://doi.org/10.2339/politeknik.877391>.
14. Kulshreshtha A., Gupta S. K., Singhal P. (2020) FEM/CFD Analysis of Wings at Different Angle of Attack. *Materials Today: Proceedings*, 26 (2), 1638–1643. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.342>.
15. Ullah A., Zaman M. B., Bhatti M. A., Qasim D., Hamid A., Xiong Q., Khan A. (2021) CFD Study of Drag and Lift Coefficients of Non-Spherical Particles. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* [in press]. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.10.003>.
16. Shirzadi M., Mirzaei P. A., Naghashzadegan M. (2017) Improvement of k-epsilon Turbulence Model for CFD Simulation of Atmospheric Boundary Layer Around a High-Rise Building Using Stochastic Optimization and Monte Carlo Sampling Technique. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 171, 366–379. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.005>.
17. Wei H., Chen Y. (2019) Assessment of Different Turbulence Models on the Large Scale Internal Heated Water Pool Natural Convection Simulation. *Annals of Nuclear Energy*, 131, 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.03.018>.
18. Rezaeiha A., Montazeri H., Blocken B. (2019) On the Accuracy of Turbulence Models for CFD Simulations of Vertical Axis Wind Turbines. *Energy*, 180, 838–857. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.053>.
19. Lanzafame R., Mauro S., Messina M. (2013) Wind Turbine CFD Modeling Using a Correlation-Based Transitional Model. *Renewable Energy*, 52, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.007>.
20. Staudte R. G. (2020) Evidence for Goodness of Fit in Karl Pearson Chi-Squared Statistics. *Statistics*, 54 (6), 1287–1310. <https://doi.org/10.1080/02331888.2020.1862115>.
21. Chai T., Draxler R. R. (2014) Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE) – Arguments Against Avoiding RMSE in the Literature. *Geoscientific Model Development*, 7 (3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>.
22. Santamaria L., Vega M. G., Pandal A., Pérez J. G., Velarde-Suárez S., Oro J. M. (2022) Aerodynamic Performance of VAWT Airfoils: Comparison between Wind Tunnel Testing Using a New Three-Component Strain Gauge Balance and CFD Modelling. *Energies*, 15 (24), 9351. <https://doi.org/10.3390/en15249351>.