

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ BELL 540 В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

^{1,4}Музаффаров С.А., ²Маратов Х.У., ³Курбонова Г.Ф.

¹Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т.

Уразбаева АН РУз, Ташкент, Узбекистан

²Бухарский государственный технический университет, Бухара,
Узбекистан ³Ташкентский университет информационных технологий
имени Мухаммада ал-Хоразмий, Ташкент, Узбекистан

⁴Ориентал Университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В данной статье представлено численное исследование турбулентного обтекания аэродинамического профиля BELL 540 дозвуковым потоком при углах атаки от 0° до 12°. Для численной реализации уравнений турбулентности использовался метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Полученные результаты сравнивались с данными экспериментальных измерений и показали хорошее согласование, что подтверждает адекватность выбранной модели турбулентности и корректность проведённого численного моделирования. В статье подробно рассматриваются основные аспекты методики исследования, включая постановку задачи, параметры моделирования и анализ распределения аэродинамических характеристик. Проведённое исследование способствует углублённому пониманию особенностей турбулентного обтекания аэродинамических профилей и может быть полезным при разработке более точных инженерных моделей и аэродинамических расчётов вертолётных лопастей.

Ключевые слова: уравнения Навье–Стокса; отрывное течение; модель $k-\varepsilon$; Comsol Multiphysics; NASA.

Введение.

Турбулентные потоки представляют собой сложные явления в области аэродинамики и гидродинамики, возникающие в результате нелинейных взаимодействий между частицами жидкости или газа. Эти взаимодействия формируют хаотические и непредсказуемые движения, что делает турбулентность одним из наиболее трудных объектов для теоретического и численного анализа в физике сплошных сред.

Понимание природы турбулентных потоков имеет решающее значение для широкого круга инженерных задач. В аэродинамике турбулентность существенно влияет на формирование аэродинамических характеристик

летательных аппаратов, на устойчивость и эффективность их полёта, а также на снижение энергетических потерь. В гидродинамике турбулентные режимы определяют особенности движения воды в реках, каналах, океанах и трубопроводах, что важно при проектировании гидротехнических сооружений, систем водоснабжения и охлаждения. Кроме того, турбулентные процессы оказывают значительное влияние на работу и оптимизацию различных технических устройств — турбомашин, насосов, вентиляторов и теплообменных систем.

Исследование турбулентных потоков остаётся одной из актуальных задач современной науки, поскольку понимание механизмов турбулентности способствует созданию более точных и эффективных инженерных моделей. Несмотря на значительные достижения в области экспериментальных и численных методов моделирования, многие аспекты турбулентных течений всё ещё недостаточно изучены, особенно при сложных геометриях и переменных условиях обтекания. Это обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на уточнение турбулентных моделей и повышение точности вычислительных прогнозов.

Одним из объектов практического интереса в аэродинамических исследованиях является аэродинамический профиль BELL 540. Данный профиль разработан с целью повышения аэродинамического качества и эффективности работы несущих систем летательных аппаратов. Он широко применяется как в авиации, так и в смежных областях, где требуется высокая подъёмная сила при минимальном сопротивлении.

Кроме того, профиль BELL 540 нашёл применение в конструкции лопастей ветрогенераторов, где его благоприятные аэродинамические свойства обеспечивают улучшение энергетической эффективности установки. Использование данного профиля в ветротехнических системах позволяет оптимизировать распределение нагрузки вдоль лопасти, снизить аэродинамические потери и повысить общий коэффициент полезного действия. В связи с этим исследование особенностей турбулентного обтекания профиля BELL 540 представляет собой важное направление для разработки современных аэродинамических и энергетических систем [7–12].

Основные характеристики.

Аэродинамический профиль BELL 540 характеризуется сглаженными контурами с закруглённой носовой частью и заострённой задней кромкой, что способствует снижению аэродинамического сопротивления и повышению аэродинамической эффективности. Толщина профиля, составляющая от 12 % до 18 % хорды, оптимальна для формирования подъёмной силы при одновременном уменьшении сопротивления. Верхняя и нижняя поверхности имеют плавную

кривизну, обеспечивающую благоприятное распределение давления и устойчивые аэродинамические характеристики в широком диапазоне углов атаки.

Профиль BELL 540 разработан с целью минимизации турбулентных эффектов, что особенно важно для повышения устойчивости работы ветрогенераторов и снижения вибраций, оказывающих влияние на долговечность оборудования. Благодаря этим свойствам данный профиль широко применяется как в авиационной технике, так и в конструкциях лопастей ветрогенераторов, где требуется высокая энергетическая эффективность и надёжность в эксплуатации.

В настоящем исследовании основное внимание уделяется численному моделированию турбулентного обтекания профиля BELL 540 в дозвуковом потоке. Профиль выбран в качестве базового объекта благодаря своей геометрической простоте, хорошо изученным аэродинамическим характеристикам и наличию экспериментальных данных для валидации численных моделей.

Обтекание рассматривается при углах атаки от 0° до 12° , что охватывает диапазон, наиболее характерный для работы ветрогенераторных лопастей и элементов несущих систем. Для численного моделирования используется программный комплекс COMSOL Multiphysics, который предоставляет широкие возможности для решения задач механики сплошных сред с учётом турбулентных эффектов [15–18].

Применение методов вычислительной гидродинамики (CFD) позволяет проводить виртуальные эксперименты, моделируя структуру течения вокруг профиля при различных параметрах потока. Такой подход обеспечивает получение детальной информации о распределении давления, скорости, коэффициентах подъёмной силы (C_L) и сопротивления (C_D). Для описания турбулентных эффектов применяются современные модели турбулентности, основанные на решении уравнений Навье–Стокса, таких как Spalart–Allmaras, $k-\omega$ SST и их модификации.

Основная цель данного исследования заключается в оценке адекватности выбранной модели турбулентности путём сравнения численных результатов с экспериментальными данными. Совпадение этих результатов подтвердит достоверность применяемой методики и позволит рекомендовать её для решения практических инженерных задач аэродинамики.

В последующих разделах статьи подробно описываются методика численного моделирования, постановка задачи, граничные условия, а также представлены результаты расчётов и их сравнение с экспериментальными измерениями, что позволяет оценить точность и эффективность предложенного

подхода.

Физическая и математическая постановка задачи.

Турбулентный профиль крыла BELL 540 должен эксплуатироваться в практически несжимаемых условиях. Число Рейнольдса на хорду $Re = 5$ миллионов. На рис. 1 показаны расчетная сетки и граничные условия [13-16].

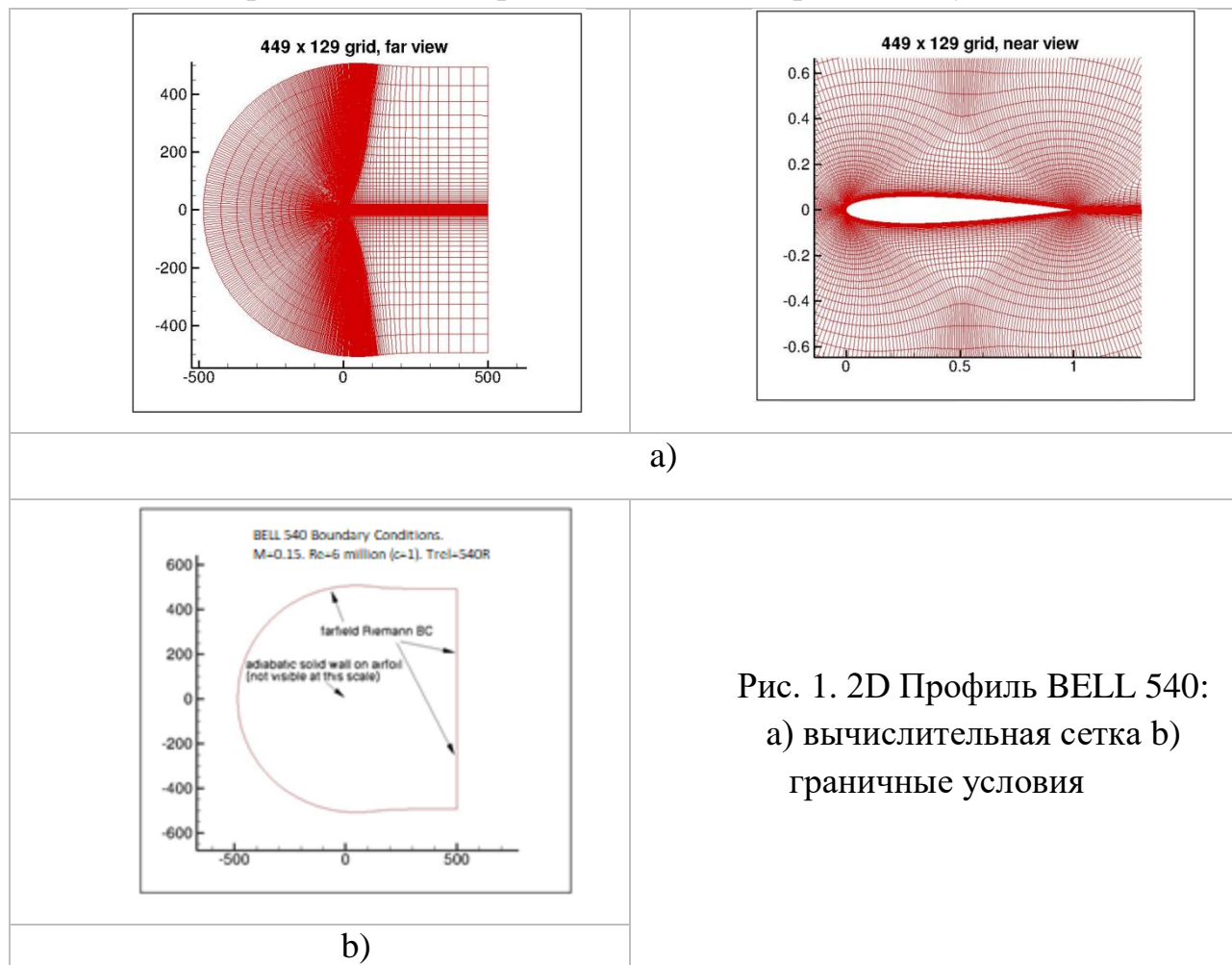


Рис. 1. 2D Профиль BELL 540:
 а) вычислительная сетка б)
 граничные условия

Математическая модель.

Для решения задачи анализа обтекания аэродинамического профиля BELL 540 использовались осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS). Эти уравнения лежат в основе математического описания динамики несжимаемой жидкости и представляют собой систему дифференциальных уравнений, которые моделируют изменения скорости и давления в жидкой среде во времени и пространстве.

Уравнения Навье-Стокса в осреднённой форме учитывают турбулентные потоки и представляют собой следующую систему уравнений:

Уравнение сохранения массы (уравнение непрерывности), которое описывает закон сохранения массы внутри расчетной области [7-9]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0. \tag{1}$$

Уравнение сохранения импульса, которое описывает изменение скорости жидкости под воздействием внешних и внутренних сил:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

где \bar{u}_i – компоненты среднего скоростного поля, \bar{p} – среднее давление, ν – кинематическая вязкость, τ_{ij} – компоненты тензора напряжений, ρ – плотность.

Использование уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу, позволяет учесть турбулентные эффекты и их влияние на обтекание аэродинамического профиля BELL 540. Эти уравнения решаются численными методами, например методом конечных элементов, с применением специализированных программных пакетов, таких как COMSOL Multiphysics. Такой подход обеспечивает получение детальных данных о характеристиках потока и его воздействии на профиль.

Исследование модели турбулентности $k-\varepsilon$ для задач течения турбулентного потока в обтекании аэродинамического профиля BELL 540 является целью этой статьи. Полученные численные данные сопоставляются с известными экспериментальными данными, доступными на веб-сайте NASA Turbulence Modeling Resource (TMR) [12].

Модели турбулентности.

Модель $k-\varepsilon$ широко используется в инженерной практике благодаря своей относительной простоте и способности адекватно описывать различные типы турбулентных потоков, включая потоки вокруг аэродинамических профилей. Она подходит для аэродинамических расчетов, прогнозирования сил и моментов на профили, оценки коэффициентов подъемной силы и сопротивления.

Когда цепочка уравнений для корреляций турбулентных величин обрывается на уравнения для корреляций первого порядка, очевидно, что модель турбулентности первого уровня замыкания $k-\varepsilon$ является наиболее эффективной. Массовая плотность турбулентной энергии k и скорость диссипации турбулентной энергии ε описываются системой двух нелинейных диффузионных уравнений.

Применение $k-\varepsilon$ модели для определения профилей ветра, температуры и коэффициентов турбулентной диффузии в атмосферном пограничном слое различной стратификации можно рассматривать как прецедент учета гравитационной (конвективной) турбулентности. Для этого варианта модели эмпирические константы несколько отличаются от устоявшегося варианта констант [5, 6], выбранного для описания сдвиговых течений. Кроме того, для описания профилей величин приземного атмосферного слоя в случае устойчивой и неустойчивой стратификации необходимо использовать множество различных

эмпирических констант. Работа [5], посвященная использованию $k-\varepsilon$ модели для расчета автомодельного гравитационного перемешивания двух несжимаемых жидкостей, предложила еще большее отличие эмпирических констант модели от устоявшегося набора.

На данный момент эта модель очень популярна и включена во многие пакеты вычислительной гидродинамики [10-18].

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - 2\rho \varepsilon M_t^2 + S_k, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь использованы обозначения

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}},$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}, \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k, \quad A_S = \sqrt{6} \cos \phi, \quad \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3},$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t \partial T}{\text{Pr}_t \partial x_i}, \quad \text{Pr}_t = 1/a_t,$$

$$a_0 = 1/\text{Pr} = k/\mu c_p, \quad \beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, \quad G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \quad M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}, \quad a = \sqrt{\gamma RT}.$$

Эмпирические константы $k-\varepsilon$ модели принимают стандартные значения: $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2, A_0 = 4.04$.

Метод решения.

Для стандартной модели турбулентности $k-\varepsilon$ использованы стандартные решатели COMSOL Multiphysics.

Результаты и их обсуждение.

Изменение давления на стенке канала в зависимости от расстояния называется распределением коэффициента поверхностного давления [19-25].

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5 \rho U_0^2}.$$

Здесь p – давление в точке на поверхности профиля, P_∞ – давление свободного потока, ρ – плотность свободного потока, U_0 – скорость свободного потока.

Ниже показаны сравнения полученных численных результатов с известными экспериментальными данными. На рис. 2 показаны коэффициенты давления и результаты эксперимента для различных углов атаки поверхности профиля.

Зависимость коэффициента давления C_p от угла атаки является важным

инструментом для анализа и оптимизации аэродинамических профилей. Она позволяет оценивать эффективность профиля при различных условиях и использовать эту информацию для проектирования более эффективных аэродинамических форм.

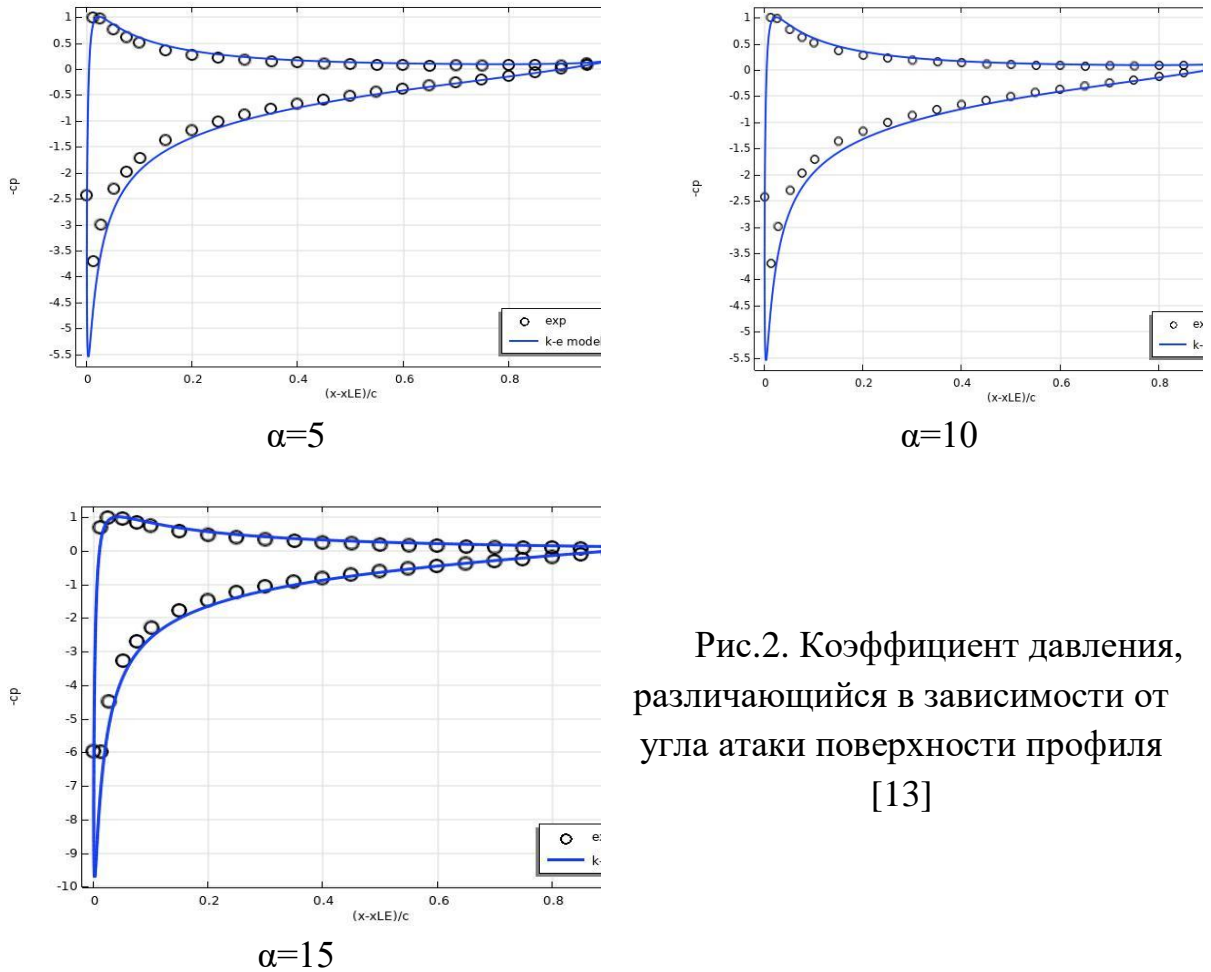


Рис.2. Коэффициент давления, различающийся в зависимости от угла атаки поверхности профиля [13]

Профиль BELL 540 характеризуется высокой подъемной силой при различных углах атаки, что делает его эффективным в широком диапазоне условий полета. Влияние углов атаки на коэффициенты подъемной силы показано на рис. 3.

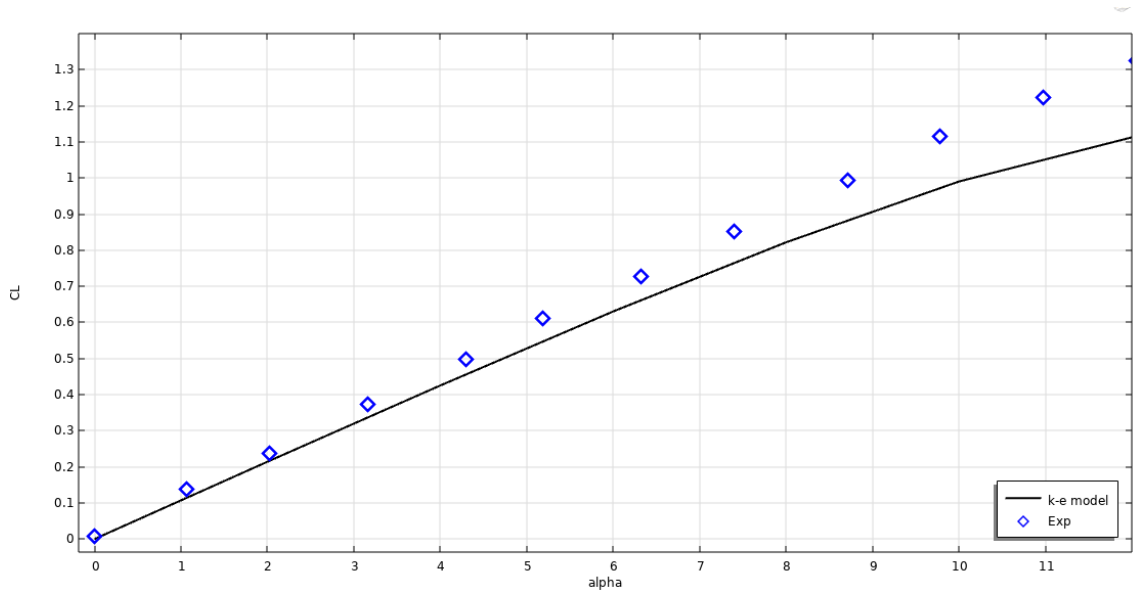


Рис.3. Влияние углов атаки на коэффициенты подъемной силы [13]

Результаты эксперимента сходны с результатами $k - \varepsilon$ модели, как показано на рис. 2-3.

На рис. 4 представлены изолинии скорости потока разных углов атаки:

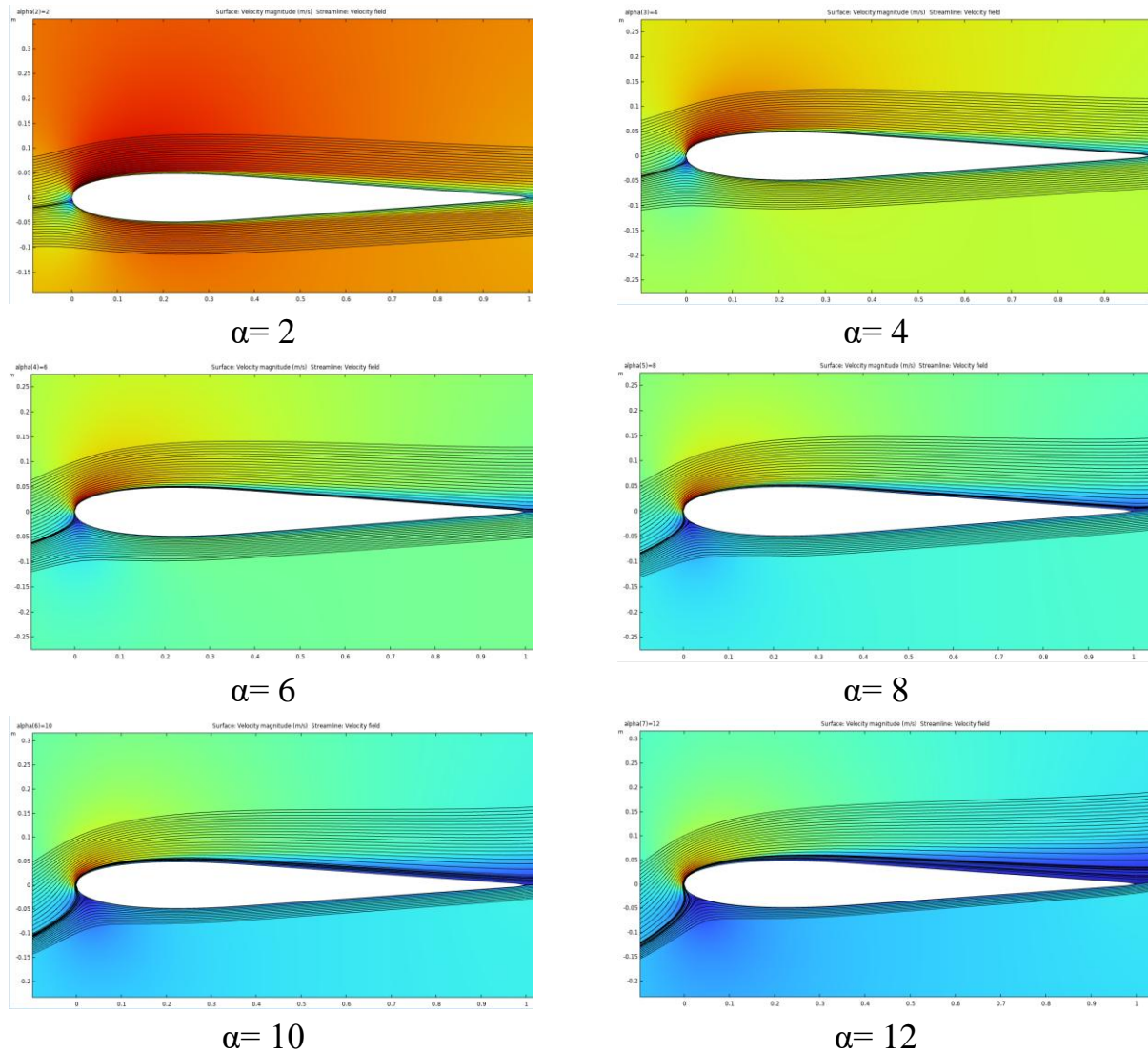


Рис.4. Изолинии скорости потока разных углов атаки

Анализ изолиний скорости потока вокруг аэродинамического профиля при разных углах атаки помогает понять, как изменяется распределение скорости и где возникают зоны высоких или низких скоростей. Это важно для оценки эффективности профиля и выявления областей возможного отрыва потока.

Угол атаки $\alpha = 0$:

При нулевом угле атаки поток симметричен относительно профиля. Изолинии скорости будут равномерно распределены, без значительных изменений скорости на верхней и нижней поверхностях профиля.

Угол атаки $\alpha = 4$:

С увеличением угла атаки, скорость на верхней поверхности профиля увеличивается, а на нижней поверхности уменьшается. Изолинии скорости будут сгущаться ближе к верхней поверхности профиля.

Угол атаки $\alpha = 8$:

Дальнейшее увеличение угла атаки приведет к более значительным изменениям скорости. Образуются области высокой скорости на верхней поверхности профиля и низкой скорости на нижней поверхности.

Угол атаки $\alpha = 12$:

При высоких углах атаки могут возникнуть турбулентные области и отрыв потока от поверхности профиля. Изолинии скорости будут показывать резкие изменения, особенно на верхней поверхности.

Модель турбулентности $k-\varepsilon$ считается самой лучшей полу эмпирической моделью на сегодняшний день.

Заключение.

Исследование обтекания аэродинамического профиля BELL 540 с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD) предоставляет инженерам и конструкторам ценную информацию для оптимизации аэродинамических характеристик и повышения эффективности летательных аппаратов и ветрогенераторов. Полученные данные позволяют улучшать аэродинамическое качество, оптимизировать геометрию профиля и снижать аэродинамическое сопротивление, что способствует созданию энергоэффективных и экологически устойчивых технологий.

Понимание аэродинамических характеристик профиля на уровне численного моделирования играет ключевую роль в разработке инновационных решений для систем возобновляемой энергетики. CFD-моделирование позволяет не только предсказывать распределение скоростей, давления и вихревых структур, но и выявлять потенциальные пути улучшения аэродинамической эффективности при различных эксплуатационных условиях.

Профиль BELL 540 отличается низким аэродинамическим сопротивлением, что способствует снижению расхода топлива и повышению скорости

летательных аппаратов. Его конструкция ориентирована на минимизацию турбулентных эффектов, обеспечивая устойчивость, управляемость и надёжность работы аэродинамических систем.

Кроме того, данный профиль является высокоэффективным решением для проектирования лопастей ветрогенераторов. Благодаря своей геометрии и оптимальному распределению толщины по хорде, профиль BELL 540 обеспечивает высокую подъёмную силу, низкое сопротивление и высокое аэродинамическое качество, что делает его одним из наиболее перспективных профилей для современных систем возобновляемой энергетики.

В рассмотренной статье показаны результаты стандартного модели турбулентности $k-\varepsilon$ в пакете программ Comsol Multiphysics, где используется метод конечных элементов. Для валидации модели $k-\varepsilon$ рассмотрены задачи обтекания аэродинамического профиля BELL 540. Из полученных результатов видно, что $k-\varepsilon$ модель имеет высокую точность для этой задачи.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Orozco Murillo W., Palacio-Fernande J. A., Patiño Arcila I. D., Zapata Monsalve J. S. & Hincapié Isaza J.A. Analysis of a Jet Pump Performance under Different Primary Nozzle Positions and Inlet Pressures using two Approaches: One Dimensional Analytical Model and Three Dimensional CFD Simulations // Journal of Applied and Computational Mechanics. 2020, No.6 (Special Issue), pp.1228-1244.

[2] Hadad K., Eidi H. R. & Mokhtari J. VOC level control by ventilation improvement of Flexography printing room using CFD modeling // Journal of Applied and Computational Mechanics. 2017, No.3(3), pp.171-177.

[3] Tsega E.G., Katiyar V.K. A Numerical Simulation of Inspiratory Airflow in Human Airways during Exercise at Sea Level and at High Altitude // Journal of Applied and Computational Mechanics. 2019, No.5(1), pp.70-76.

[4] Sentyabov A.V, Gavrilov A.A, Dekterev A.A. Investigation of turbulence models for computation of swirling flows // Thermophysics and aeromechanics. 2011, No.18:1, pp.73-85.

[5] Menter F.R. Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. AIAAPaper 1993-2906.

[6] Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. Turbulence, Heat and [7] Mass Transfer 4, ed: K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, Begell House, Inc., 2003, pp. 625-632.

[8] Pasha A.A. Study of parameters affecting separation bubble size in high speed flows using $k-\omega$ turbulence model // Journal of Applied and Computational Mechanics 2018, No. 4(2), pp.95-104.

[9] Malikov Z.M., Madaliev M.E. Numerical study of a swirling turbulent flow

through a channel with an abrupt expansion // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i Mekhanika. 2021, No. 72, pp.93-101.

[10] Malikov Z.M., Madaliev M.E. Mathematical modeling of a turbulent flow in a centrifugal separator // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i Mekhanika. 2021, No. 71, pp.121-138.

[11] Madaliev M.E. Numerical Calculation of an Air Centrifugal Separator Based on the SARC Turbulence Model // J. Appl. Comput. Mech. 2021, No. 7(2), pp.1133-1140 URL:<https://doi.org/10.22055/JACM.2020.31423.1871>

[12] Spalart P.R., Jou W.H., Strelets M., Allmaras S.R. Comments on the Feasibility of LES for Wings and on a Hybrid, RANS/LES Approach / Advances in DNS/LES, Proceedings of 1st AFOSR International Conference on DNS/LES, Vol. 1, Greyden Press, Columbus, 1997. P. 137-147

[13] Turbulence modeling Resource. NASA Langley Research Center. URL: <http://turbmodels.larc.nasa.gov> .

[14] Ladson C.L. Effects of Independent Variation of Mach and Reynolds Numbers on the Low-Speed Aerodynamic Characteristics of the NACA 0012 Airfoil Section / NASA TM 4074, October 1988.

[15] Khujaev I., Jumayev J., Hamdamov M. Modeling of Combustion Processes in Cylindrical Chambers Using Modern Package Programs / AIP Conference Proceedings, 2024, 3004(1), 060015

[16] Khujaev I., Toirov O., Jumayev J., Hamdamov M. Modeling of vertical axis wind turbine using Ansys Fluent package program / E3S Web of Conferences, 2023, 401, 04040

[17] Hamdamov M., Bozorov B., Mamataliyeva H. Ergashov D. Numerical modeling of wind turbine with vertical axis using turbulence model $k - \omega$ in ANSYS FLUENT / E3S Web of Conferences, 2023, 401, 02024

[18] Hamdamov M.M., Ishnazarov A.I., Mamadaliev K.A. Numerical Modeling of Vertical Axis Wind Turbines Using ANSYS Fluent Software // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2023, 13772 LNCS. P.156-170

[19] Hamdamov M., Bozorov B., Mamataliyeva H. , Ergashov D. Numerical modeling of wind turbine with vertical axis using turbulence model $k - \omega$ in ANSYS FLUENT / E3S Web of Conferences, 2023, 401, 02024

[20] Mathew S. Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics. New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

[21] Goudarzi A., Ahmadi A. Intelligent Analysis of Wind Turbine Power Curve Models. In Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG), IEEE, 2014, P. 1-7,

[22] Carrillo C., Montan A., Cidras J., Diaz-Dorado E. Review of powercurve

modeling for wind turbines // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013, Vol. 21, pp. 572-581.

[23] Sohoni V., Gupta S., Nema R. A Critical Review on WindTurbine Power Curve Modeling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems // Journal of energy. 2016, pp.1-18.

[24] Alhassan A. Teyabeen. Statistical Analysis of Wind Speed Data / 6th International Renewable Energy Congress (IREC), 2015, IEEE. P.1-6.

[25] Alhassan A. Teyabeen. Selection of appropriate statistical model for wind speed data, and selecting suitable turbine generator at four locations in Libya. [Master's thesis]; Dept. of EE; University of Tripoli, Libya, 2017.