



SCIENTIFIC BULLETIN

PHYSICAL AND MATHEMATICAL RESEARCH

ILMIY HABARNOMA

FIZIKA-MATEMATIKA TADQIQOTLARI

**2024
VOLUME 6
ISSUE 1**

ЗАХИРИДДИН
МУҲАММАД БОБУР
НОМИДАГИ АНДИЖОН
ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ANDIJAN STATE
UNIVERSITY NAMED
AFTER ZAKHIRIDDIN
MUKHAMMAD BABUR

ИЛМИЙ ХАБАРНОМА

Физика-математика
тадқиқотлари

SCIENTIFIC BULLETIN

Physical and
Mathematical Research

2024/№1(6)

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДКОЛЛЕГИИ

Зайнобидинов Сирожиддин – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, академик Академии наук Республики Узбекистан.

ЗАМПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДКОЛЛЕГИИ

Акбаралиев Бахтиёр Бакирович – доктор технических наук (DSc), профессор, ректор Андижанского государственного университета. им. З.М.Бобура

ФИЗИКА

Юлдашев Бехзод Садыкович – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, академик Академии наук Республики Узбекистан, Президент Академии наук Республики Узбекистан.

Утамурадова Шарифа Бекмурадовна – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, директор Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека.

Маматкаримов Одилжон Охундаевич – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, ректор Наманганского инженерно-технологического института

Олимов Хусниддин Косимович – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, директор Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан.

Каримов Иброхим Набиевич – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, профессор кафедры физики Андижанского государственного университета им. З.М.Бобура

Тургунов Нозимжон Абдуманнопович – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, замдиректор Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека.

Исмаилов Канатбай Абдреймович – доктор физико-математических наук, профессор Каракалпакского государственного университета.

Каражанов Смагул – доктор физико-математических наук (DSc), с.н.с. отдела солнечной энергетики Института энергетических технологий, Кьеллер, Норвегия

Рембеза Екатерина Станиславовна – доктор физико-математических наук (DSc), профессор Воронежского государственного университета.

Вайткус Юозас Юозович – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, академик АН Литва.

Абдужабборов Ахмаджон – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, г.н.с. института Астрономии АН РУз

ТЕХНИКА

Мамадалимов Абдугафур Тишабаевич – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, академик Академии наук Республики Узбекистан.

Содилов Илхом Исмаилович – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, директор Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

Ашуров Хотам Бахронович – доктор технических наук (DSc), профессор, директор Института ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова Академии наук Республики Узбекистан.

Далиев Хожакбар Султанович – доктор физико-математических наук (DSc), профессор, директор Ташкентского филиала Федерального государственного бюджетного высшего образовательного учреждения «Национальный исследовательский университет» МЭИ».

Алиев Раимжон Усмонович – доктор технических наук (DSc), профессор Андижанского государственного университета. им. З.М.Бобура

Юлдашев Носиржон Хайдарович – доктор технических наук (DSc), профессор, Ферганский политехнический институт.

Касимахунова Анора Мамасодиқовна – доктор технических наук (DSc), профессор Ферганского государственного университета

Тагаев Марат Баймуратович – доктор технических наук (DSc), профессор Каракалпакского Государственного университета имени Бердаха.

Мансуров Хатамжон Жураевич – кандидат физико-математических наук, доцент, декан Физического факультета Андижанского государственного университета. им. З.М.Бобура

МАТЕМАТИКА

Ўринов Ахмаджон Кушакович – доктор физико-математических наук (DSc), профессор Ферганского государственного университета.

Арзикулов Фарходжон Нейматович – доктор физико-математических наук, профессор Андижанского государственного университета. им. З.М.Бобура

Кайгородов Иван – доктор физико-математических наук, профессор университета Beira Interior, Ковилян, Португалия

Xabier Garcia Martinez – professor, Department of Mathematics, University of Vigo, Vigo, Spain

Каримжанов Икболжон Абдулазизович – PhD по физико-математических наук, доцент, Проректор Андижанского государственного университета

Муллажонов Рустамжон Вахобжанович – кандидат физико-математических наук, доцент, Проректор Андижанского государственного университета. им. З.М.Бобура

Ибайдуллаев Туланбой Турсунбоевич – кандидат физико-математических наук, доцент, декан Математического факультета, Андижанского государственного университета. им. З.М.Бобура

Умрзаков Нодирбек Мухаммадович – кандидат физико-математических наук, доцент, Заведующий кафедры Алгебра, Андижанского государственного университета. им. З.М.Бобура

Ахмедов Одилжон Сойибжонович – кандидат физико-математических наук, доцент, Заведующий кафедры Механика-математика, Андижанского государственного университета. им. З.М.Бобура

ИНФОРМАТИКА

Расулов Акбарали Махаматович – доктор физико-математических наук (DSc). Ферганского филиала Ташкентского

университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми.

Махкамов Мадаминжон Комилович – кандидат физико-математических наук, доцент, Проректор Андижанского государственного университета. им. З.М.Бобура

Дадабаев Сардорбек Усманович – PhD по физико-математических наук, доцент, декан Информационного технологического факультета Андижанского государственного университета

Худойбергенов Мирзоали Уразалиевич – доктор физико-математических наук (DSc), профессор. Заведующий кафедрой Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека.

Абдурахманов Жамолидин Комолдинович – кандидат физико-математических наук, доцент Андижанского государственного университета.

Редактор:

Бобоев Акрамжон Йулдашбоевич – PhD по физико-математических наук, доцент Андижанского государственного университета.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Физика

С.З. ЗАЙНАБИДИНОВ, Н.А. ТУРГУНОВ, Ш.К. АКБАРОВ Морфология примесных скоплений кобальта и никеля в монокристаллах кремния.....	7
A.T. MAMADALIMOV, S.U. UMAROVA, N.K. KHAKIMOVA, SH.M. NORBEKOV, D.E. XAZRATOV Study of the electrophysical properties of "surkhon-104" grade cotton fibers alloyed with KMnO_4	12
Е.С. РЕМБЕЗА, Ш.Х. ЙУЛЧИЕВ, Б.М. ЭРГАШЕВ Синтез и свойства многокомпонентных наноструктурированных пленок $(\text{SnO}_2)_x(\text{ZnO})_{1-x}$	16
Х.Б. АШУРОВ, Б.Р. КУТЛИМУРОТОВ, С.Е. МАКСИМОВ, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР О путях подавления фотодеградации аморфного гидрогенизированного кремния используемого в солнечных элементах.....	21
Б.К. ТУЙЧИБАЕВ, В. Т. МИРЗАЕВ, Т.И. РАХМОНОВ Характеристики электрических свойств нанокристаллических систем селенида кадмия.....	26
Н.А. ТУРГУНОВ, Р.М. ТУРМАНОВА, Н.Б. ХАЙТИММЕТОВ Исследование структурных свойств образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Fe}\rangle$	32
А. ТУРАЕВ, Р. БУРХАНОВ, О. РАЙИМЖОНОВ Влияние давления на токопрохождение в БИП изготовленных на основе $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$	36
Н.А. СУЛТАНОВ, З. МИРЗАЖОНОВ, Т.И.РАХМОНОВ, Ф.Т. ЮСУПОВ Характеристика термически окисленных пленок ZnO: Значение для оптоэлектронных применений.....	40
К. АБДУЛВАХИДОВ, ZHENGYOU LI, С. ОТАЖОНОВ, Н. ЮНУСОВ Исследование структурных, магнитных, магнитодиэлектрических свойств наноструктурированных композитов на основа « $(1-x)\text{AFe}_{12}\text{O}_{19}-x\text{BTiO}_3(\text{A-Ba, Pb, Sr; B-Ba, Pb})$ ».....	48

Техника

С.С. НАСРИДДИНОВ, А.К. ХАМРАКУЛОВ, М.А. АБДУРАХМАНОВА, Ф.С. САИДОВА, Н.Т. МОВЛОНОВ Мониторинг влажности почв с помощью информационно технологических систем.....	54
--	----

A. SEYTOV, O. ABDURAXMONOV, N. CHORIYOROV Development of algorithms for planning and management of water resources in Irrigation systems in the conditions of climate changing.....	59
<u>Математика</u>	
X.SH. QO‘SHAQOV, M.A. MUHAMMADJONOVA, SH.SH. MAXAMMADZOKIROV Differential game of three pursuers and one evader on an Elongated Square Gyrobicupola.....	68
М.Ш. КОСИМОВА Об однозначной разрешимости обобщенной задачи колебания балки с заделанными концами в классах соболева в многомерном случае с оператором миллера-росса.....	73
G.SH. ABDUMANNONOVA Differential pursuit game with geometric constraints for an infinite system of differential equations.....	87
<u>Информатика</u>	
M.K. MAXKAMOV, C.C. AXMAДЖОНОВ Решение задачи о закачке газа в элементарный участок трубопровода в приближении «короткого» трубопровода.....	92
S.U. DADABAYEV, A.M. SOBIROV, M.O. SOLIJONOV Ikki o‘lchovli simmetrik t-giperbolik sistemaning xarakteristik tezliklarini boshqaruvchi dasturiy ta’minot.....	97
M.K. MIRZAAXMEDOV, N.SH. TOJIYEV, I.A. OVXUNOV R-funksiya usuli (rfm) yordamida murakkab shaklli sohalarni qurish.....	102
M.M. ХАМДАМОВ, С.А. МУЗАФФАРОВ, Х.А. МАМАДАЛИЕВ, А.М. СОБИРОВ Численное исследование обтекания аэродинамического профиля bell 540 на основе современных моделей турбулентности.....	110
J.K. ABDURAKHMANOV Some generalizations of communication channels and error correcting codes.....	118
M. KAMILOV, M. XUDAYBERDIYEV, N. ALIMQULOV Timsollarni tanib olishning algebraik yondashuv algoritmlari.....	122
З.З. ШИРИНОВ, И.К. ХУЖАЕВ, Х.А. МАМАДАЛИЕВ Упрощенный способ расчет участка одноконтурной сети отопления с современным теплообменником.....	130
И.М. САЙМАНОВ, Н.Т. УРИНОВ, А. МУРАДУЛЛАЕВ, М.О. СОЛИЖОНОВ Модели основанные на вычислении оценок.....	142

УДК: 004.93

Численное исследование обтекания аэродинамического профиля bell 540 на основе современных моделей турбулентности

¹Хамдамов М.М., ¹Музаффаров С.А., ²Мамадалиев Х.А., ³Собиров А.М.

¹ Механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз, Ташкент, Узбекистан

²Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Ташкент, Узбекистан

³Андижанский государственный университет. Узбекистан, 170100. г. Андижан. ул. Университет.129.

Получена 1 мая 2024 г. Принята к печати 21 мая 2024 г

Аннотация. В данной статье представлено исследование модели турбулентности в обтекании дозвуковым потоком профиля BELL 540 с углами атаки от 0 до 12 градусов. Для численной реализации уравнений турбулентности использовался метод конечных элементов, осуществленный с использованием пакета программ Comsol Multiphysics. Полученные результаты сравнивались с данными экспериментальных измерений и показали хорошее соответствие между ними, что подтверждает адекватность предложенной модели турбулентности. Обсуждаются основные аспекты методики исследования, включая параметры моделирования и анализ полученных данных. Это исследование вносит вклад в понимание турбулентного обтекания профилей и может быть полезным для разработки более точных инженерных моделей.

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

Аннотация: Ушбу мақола Белл 540 аэродинамик профилни атрофида турли 0 дан 12 градусгача бурчакдаги субсоник оқимнинг турбулентлик моделини ўрганишни тақдим этади. Турбулентлик тенгламаларини сонли ечиш учун Comsol Multiphysics дастурий пакети ёрдамида амалга оширилган чекли элементлар усули қўлланилди. Олинган натижалар тажриба натижалари билан солиштирилди ва уларнинг ўзаро мост келиши аниқланди, бу тақлиф қилинган турбулентлик модели ушбу масала учун мост келишини тасдиқлайди. Тадқиқот методологиясининг асосий жиҳатлари, жумладан, моделлаштириш параметрлари ва олинган маълумотларни таҳлил қилиш муҳокама қилинади. Ушбу тадқиқот ҳаво плёнкалари атрофидаги турбулент оқимни тушунишга ёрдам беради ва аниқроқ муҳандислик моделларини ишлаб чиқиш учун қўллаш мумкин.

Калит сўзлар: Навье–Стокс тенгламалари; Ажратилган оқим; $k - \varepsilon$ модели; Comsol Multiphysics; NACA.

Abstract: This article presents a study of the turbulence model in subsonic flow around a BELL 540 airfoil with angles of attack from 0 to 12 degrees. For the numerical implementation of the turbulence equations, the finite element method was used, implemented using the Comsol Multiphysics software package. The results obtained were compared with experimental measurement data and showed good agreement between them, which confirms the adequacy of the proposed turbulence model. The main aspects of the research methodology are discussed, including modeling parameters and analysis of the data obtained. This study contributes to the understanding of turbulent flow around airfoils and may be useful for developing more accurate engineering models.

Keywords: Navier–Stokes equations; separated flow; model $k - \varepsilon$; Comsol Multiphysics; NACA.

I. Введение

Турбулентные потоки представляют собой сложные явления в области аэродинамики и гидродинамики, которые возникают в результате нелинейных взаимодействий между частицами жидкости или газа. Эти взаимодействия порождают хаотические и непредсказуемые движения, что делает турбулентность одним из наиболее сложных объектов изучения в физике потоков. Понимание турбулентных потоков имеет важное значение для различных инженерных областей. В аэродинамике, например, турбулентность

влияет на аэродинамические характеристики самолетов и ветрогенераторов, а также на эффективность и безопасность их полетов. В гидродинамике, турбулентные потоки определяют поведение воды в реках, океанах и трубопроводах, что важно для проектирования гидротехнических сооружений и систем водоснабжения. Кроме того, турбулентность играет ключевую роль в разработке и оптимизации различных механизмов и машин, таких как турбомашины, насосы и вентиляторы. Исследование турбулентных потоков является актуальной задачей

исследования в настоящее время, так как оно способствует разработке более точных и эффективных инженерных моделей. При этом, несмотря на значительные достижения в этой области, многие аспекты турбулентных потоков остаются недостаточно изученными, что создает потребность в дальнейших исследованиях и разработках. Таким образом, понимание турбулентных потоков имеет фундаментальное значение для различных инженерных приложений и является объектом активного исследования в настоящее время.

Аэродинамический профиль BELL 540 представляет собой крыло, разработанное с целью улучшения аэродинамических характеристик и повышения эффективности летательных аппаратов. Этот профиль используется в различных авиационных приложениях благодаря своим уникальным свойствам и высокой производительности.

Аэродинамический профиль BELL 540 также используется в дизайне лопастей ветрогенераторов благодаря своим превосходным аэродинамическим характеристикам. Вот основные моменты, которые стоит учитывать при использовании этого профиля в контексте ветрогенераторов [7-12].

Основные характеристики.

Профиль BELL 540 имеет сглаженные контуры с закругленной носовой частью и заостренной задней кромкой, что способствует минимизации аэродинамического сопротивления и улучшению производительности ветрогенератора.

Толщина профиля, составляющая от 12% до 18% хорды, оптимальна для создания подъемной силы и снижения сопротивления. Верхняя и нижняя поверхности имеют кривизну для оптимального распределения давления и улучшения аэродинамических характеристик.

Профиль BELL 540 разработан для минимизации турбулентности, что важно для устойчивости работы ветрогенератора и уменьшения вибраций, которые могут негативно сказаться на сроке службы оборудования.

В данном исследовании мы сосредоточимся на численном моделировании турбулентного обтекания профиля BELL 540. Этот профиль широко используется в аэродинамических исследованиях благодаря своей простоте и хорошей характеристике подъемной силы. Мы будем исследовать обтекание профиля при различных углах атаки, начиная от 0 до 12 градусов. Для численного моделирования мы используем пакет программ Comsol Multiphysics, который

предоставляет широкие возможности для решения разнообразных задач механики сплошных сред, включая моделирование турбулентных потоков [15-18].

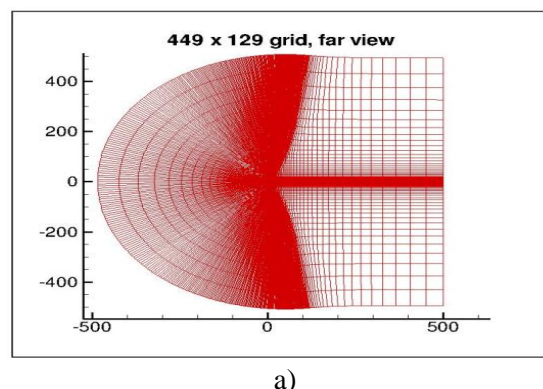
Исследования аэродинамики являются важным компонентом разработки и оптимизации ветрогенераторов. BELL 540 является одним из наиболее распространенных аэродинамических профилей. Эффективные методы, такие как вычислительная гидродинамика (CFD), могут быть использованы для изучения обтекания профиля и определения его аэродинамических характеристик.

Исследование с использованием CFD позволяет проводить виртуальные эксперименты, моделируя течение вокруг профиля в различных условиях. Для оценки аэродинамических параметров используются различные подходы, такие как модели $k-\varepsilon$ и $k-\omega$, для решения уравнений Навье-Стокса и уравнений турбулентности.

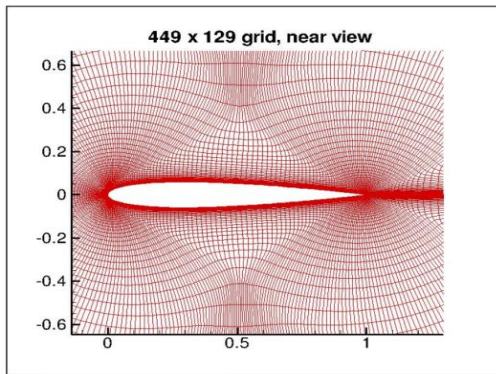
Основная цель этого исследования – проверить адекватность предложенной модели турбулентности путем сравнения полученных численных данных с результатами экспериментальных измерений. Успешное сопоставление этих результатов подтвердит применимость нашей модели к реальным инженерным задачам и повысит уровень доверия к численным методам в аэродинамике. Далее в статье мы подробно опишем методику исследования, представим полученные результаты и обсудим их значимость для практических приложений.

Физическая и математическая постановка задачи.

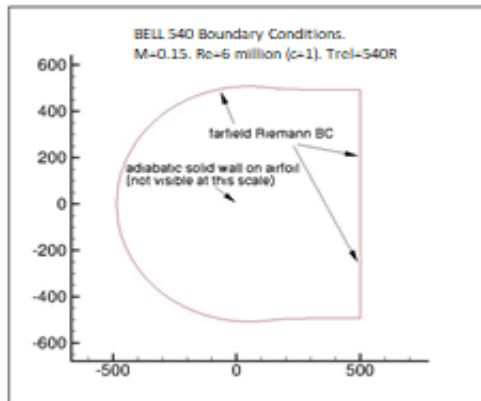
Турбулентный профиль крыла BELL 540 должен эксплуатироваться в практически несжимаемых условиях. Число Рейнольдса на хорду $Re = 5$ миллионов. На рис. 1 показаны расчетная сетка и граничные условия [13-16].



a)



a)



b)

Рис. 1. 2D Профиль BELL 540:
a) вычислительная сетка b) 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]:

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

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

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

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].

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

Здесь использованы обозначения

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}},$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{k U^*}{\varepsilon}}, \quad U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}},$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k, \quad A_S = \sqrt{6} \cos \phi,$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\sqrt{6} W \right), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}},$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i},$$

$$S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t \partial T}{\text{Pr}_t \partial x_i}, \quad \text{Pr}_t = 1 / a_t,$$

$$a_0 = 1 / \text{Pr} = k / \mu c_p, \quad \beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p,$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \quad M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}, \quad a = \sqrt{\gamma R T}.$$

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

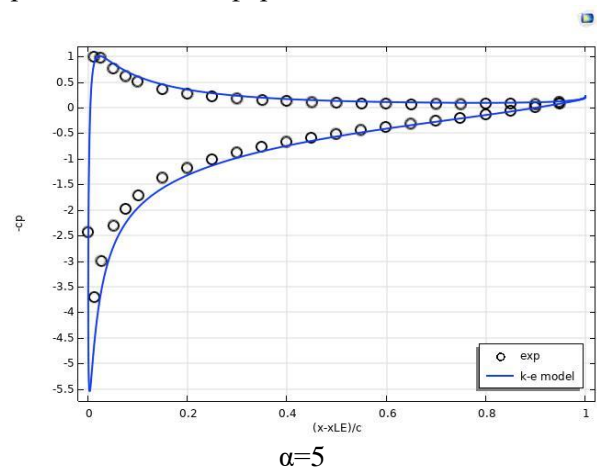
Изменение давления на стенке канала в зависимости от расстояния называется распределением коэффициента поверхностного давления [19-25].

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5 \rho U_0^2}.$$

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.



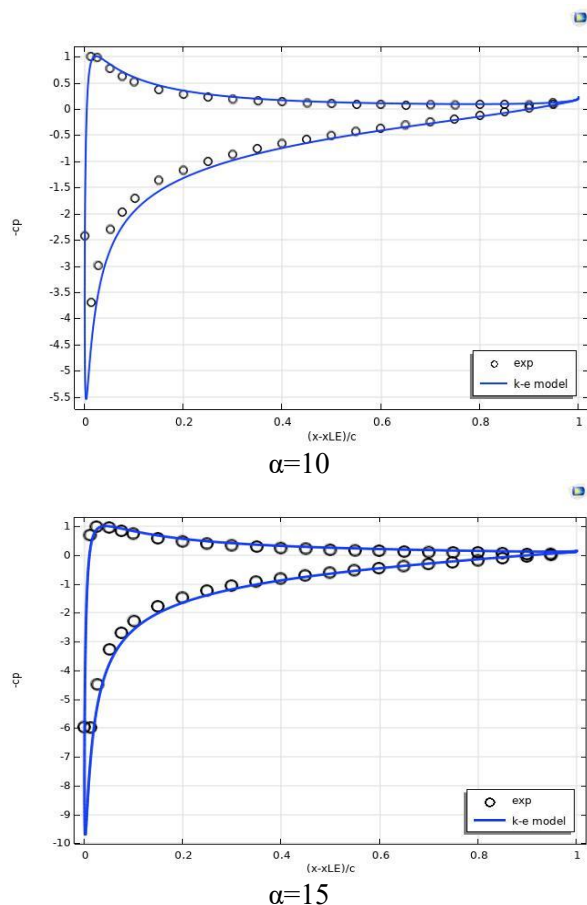


Рис.2. Коэффициент давления, различающийся в зависимости от угла атаки поверхности профиля [13]

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.

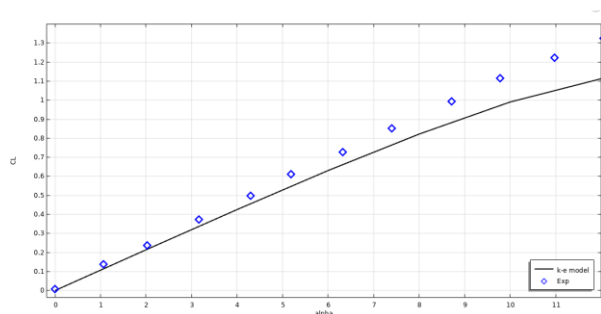


Рис.3. Влияние углов атаки на коэффициенты подъемной силы [13]

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

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

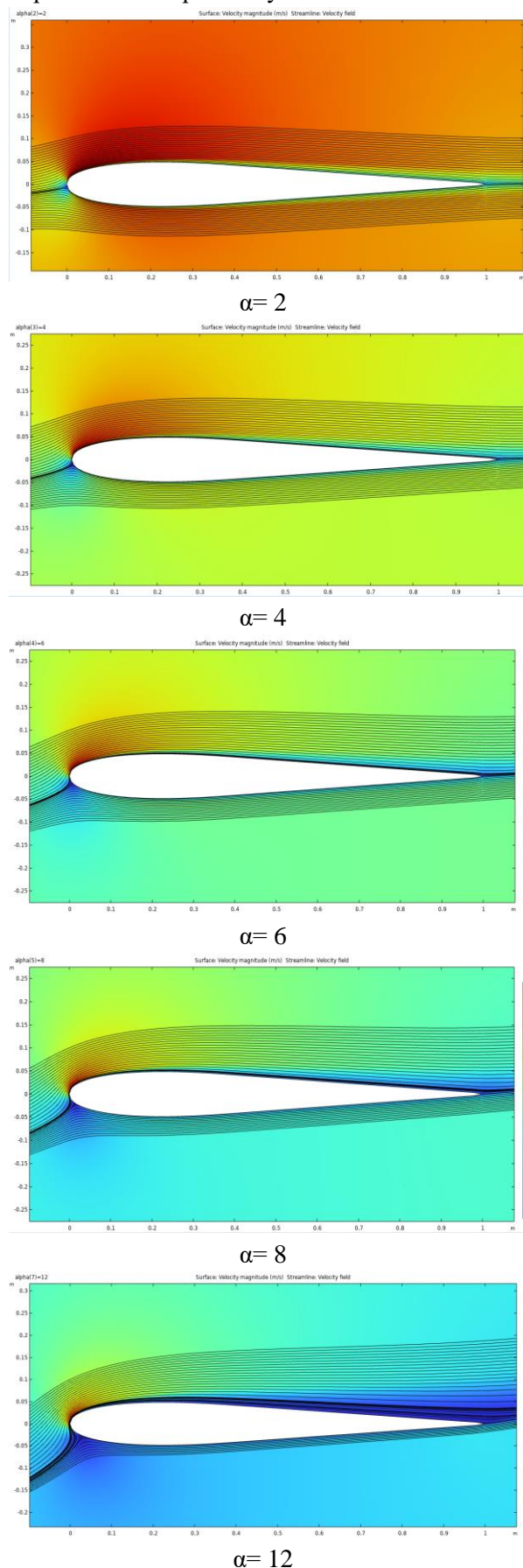


Рис.4. Изолинии скорости потока разных углов атаки

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.

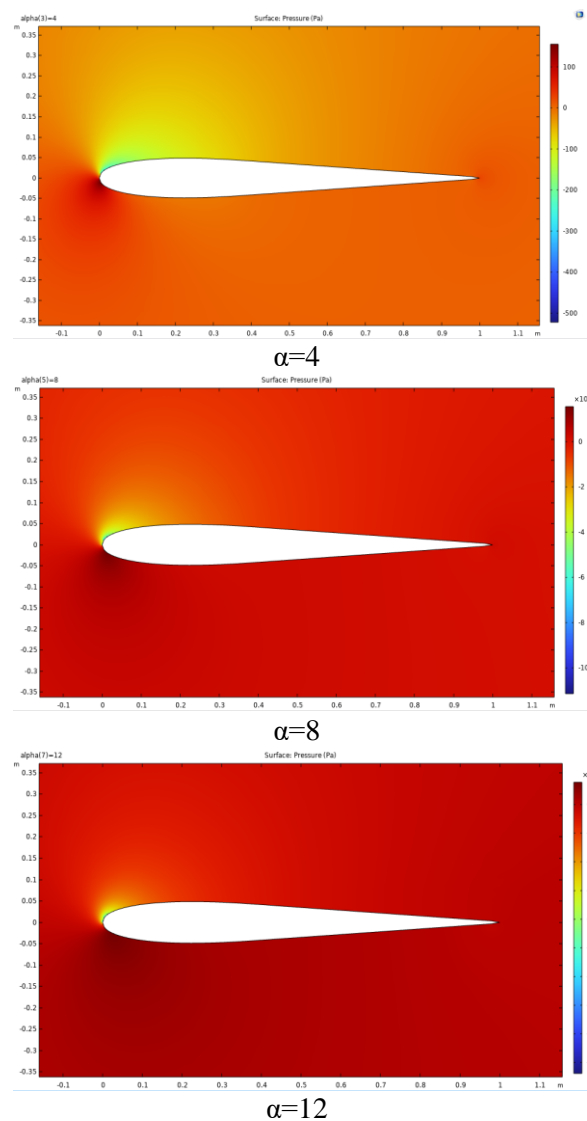
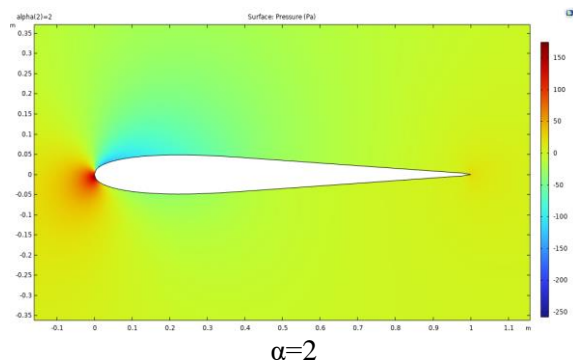


Рис. 5. Изолинии поле давление разных углов атаки

Построение изолиний поля давления при разных углах атаки является важной частью аэродинамического анализа, так как позволяет визуализировать распределение давления вокруг аэродинамического профиля и оценить его характеристики.

Угол атаки $\alpha = 0$:

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

Угол атаки $\alpha = 4$:

С увеличением угла атаки, давление на нижней поверхности профиля увеличивается, а на верхней поверхности уменьшается. Изолинии

давления будут сгущаться ближе к носовой части профиля.

Угол атаки $\alpha=8$:

Дальнейшее увеличение угла атаки приведет к более значительным изменениям давления. Образуются области низкого давления на верхней поверхности профиля, и высокое давление на нижней поверхности.

Угол атаки $\alpha=12$:

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

Построение изолиний поля давления при разных углах атаки позволяет визуализировать и анализировать аэродинамические характеристики профиля BELL 540. Эти данные могут быть использованы для оптимизации формы профиля и улучшения его аэродинамических свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование обтекания аэродинамического профиля BELL 540 с использованием методов CFD дает инженерам и дизайнерам полезные данные. Эти данные могут быть использованы для того, чтобы повысить аэродинамическую эффективность, оптимизировать форму профиля и создавать более эффективные ветрогенераторы и летательные аппараты. Понимание аэродинамических характеристик профиля на уровне численного моделирования помогает в разработке инновационных технологий, направленных на разработку возобновляемых источников энергии для промышленности.

Профиль обладает низким аэродинамическим сопротивлением, что способствует экономии топлива и повышению скорости летательных аппаратов. Профиль разработан для минимизации турбулентности, что улучшает устойчивость и управляемость летательного аппарата.

Аэродинамический профиль BELL 540 представляет собой высокоэффективное решение для дизайна лопастей ветрогенераторов. Его геометрические и аэродинамические свойства обеспечивают высокую подъемную

силу, низкое сопротивление и отличное аэродинамическое качество, что делает его идеальным выбором для современных ветрогенераторов.

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.
7. Turbulence, Heat and 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.

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 - ω 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 sub-series 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 - ω

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.

Информация об авторах

1. **Хамдамов Музаффар Мухиддинович** – PhD., с.н.с., Докторант. Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева, Ташкент, Узбекистан. e-mail: mmhamdamov@mail.ru

2. **Музаффаров Сардорбек Акрам ўгли** – базовый докторант. Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева, Ташкент, Узбекистан. e-mail: kamina.0691@mail.ru

3. **Мамадалиев Хусниддин Абдижалилович** – PhD, доцент, заведующей кафедры. Ташкентского университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Ташкент, Узбекистан. e-mail: x.mamadaliev@tuit.uz

4. **Собиров Абдуллохбек Мамасидик ўгли**-Андижанский государственный университет. Факультет информационных технологий и компьютерной инженерии, преподаватель кафедры компьютерной инженерии. Узбекистан, 170100. г. Андижан. ул. Университет.129. abdullohbek936@gmail.com