ISNN 3030-3907

2026/4
VOLUME 10

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/4 VOLUME 10

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ ДВУХЖИДКОСТНОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В COMSOL MULTIPHYSICS ДЛЯ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ С НУЛЕВЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ.

Абдухамидов Сардор Кахарбоевич
Ассистент, Ташкентский государственный транспортный университет
E-mail: Sardor.abdukhamidov@mail.ru,
Исламов Ёркин
Доцент, исполняющий обязанности профессора Ташкентский государственный транспортный университет
Юлдашев Санджарбек Атабекович
Ташкентский университет прикладных наук, факультет «Цифровые и фундаментальные науки».

Annotatsiya. Ushbu maqolada raqamli modellashtirish natijalarining ekonometrik tahlili muhokama qilinadi. Modelning aniqligi va uning bashorat qilish qobiliyatini statistik baholash amalga oshiriladi. Asosiy model parametrlari va eksperimental ma'lumotlar o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlash uchun regressiya tahlil usullari qo'llaniladi. Tahlil modelning aniqligiga ta'sir qiluvchi omillarni aniqlaydi va miqdorini belgilaydi va olingan ma'lumotlar asosida turbulentlik modellarini takomillashtirish yo'llarini taklif qiladi. Maqolada bosim gradienti nol bo'lgan tekis plastinka atrofida oqim muammosi uchun Comsol Multiphysics dasturiy paketidan foydalangan holda ikki suyuqlikli turbulentlik modeli o'rganiladi. Nol bosim gradienti bo'lgan tekis plastinkaga hisoblash suyuqlik dinamikasini (CFD) qo'llash plastinka atrofidagi suyuqlik yoki gazning harakatini simulyatsiya qilish imkonini beradi. CFD suyuqlik va gaz oqimlarini, shu jumladan turbulent va beqaror oqimlarni tahlil qilish va bashorat qilish uchun ishlatiladi. Ushbu muammoda CFD modellashtirish suyuqlik yoki gazning harakatini tavsiflovchi Navier-Stokes tenglamalarini, shuningdek, massa, impuls va energiya uzatish tenglamalarini raqamli echishga qaratilgan. Ushbu tenglamalarni yechish tekis plastinka atrofidagi oqimning tezligini, bosimini va boshqa xususiyatlarini aniqlash imkonini beradi. Ushbu turbulentlik tenglamalarini sonli amalga oshirish uchun chekli elementlar usuli, diskretlashtirilgan tenglamalarni barqarorlashtirish uchun esa Galerkin eng kichik kvadratlari usuli qo'llaniladi. Olingan natijalar SST va SA turbulentlik modellarining ma'lum ma'lumotlari, shuningdek, eksperimental ma'lumotlar bilan taqqoslanadi. Modelning Comsol Multiphysics-da amalga oshirilishi ikki suyuqlikli turbulentlik modelining yaxshi konvergentsiyasi, barqarorligi va yuqori aniqligini ko'rsatdi.

ISSN 3030-3907

Kalit so'zlar: hisoblash suyuqlik dinamikasi (CFD), Navier-Stokes tenglamalari, ajratilgan oqim, SST modeli, SA modeli, ikki suyuqlikli Malikov modeli, Comsol Multiphysics.

Abstract. This paper presents an econometric analysis of the numerical simulation results. A statistical assessment of the model accuracy and predictive power is provided. Regression analysis methods are used to determine the relationship between key model parameters and experimental data. The analysis allows us to identify and quantify the factors affecting the accuracy of the model and suggests ways to improve turbulence models based on the data obtained. The paper investigates a two-fluid turbulence model using the Comsol Multiphysics software package for the problem of flow past a flat plate with zero pressure gradient. The application of computational fluid dynamics (CFD) to a flat plate with zero pressure gradient allows us to simulate the behavior of a liquid or gas around the plate. CFD is used to analyze and predict liquid and gas flows, including turbulent and unsteady flows. In this problem, CFD modeling is focused on the numerical solution of the Navier-Stokes equations describing the motion of a fluid or gas, as well as the equations of mass, momentum, and energy transfer. The solution of these equations allows one to determine the velocity, pressure, and other characteristics of the flow past a flat plate. The finite element method is used to numerically implement these turbulence equations, and the Galerkin least squares method is used to stabilize the discretized equations. The obtained results are compared with known data from the SST and SA turbulence models, as well as with experimental data. The implementation of the model in Comsol Multiphysics demonstrated good convergence, stability, and high accuracy of the two-fluid turbulence model.

Keywords: computational fluid dynamics (CFD), Navier-Stokes equations, separated flow, SST model, SA model, Malikov two-fluid model, Comsol Multiphysics.

Аннотация. В данной статье рассматривается эконометрический анализ результатов численного моделирования. Проводится статистическая оценка точности модели и ее предсказательной способности. Используются методы регрессионного анализа для определения зависимости между ключевыми параметрами модели и экспериментальными данными. Анализ позволяет выявить и количественно оценить факторы, влияющие на точность модели, и предлагает пути улучшения моделей турбулентности на основе полученных данных. В статье исследуется двухжидкостная модель турбулентности с использованием программного пакета Comsol Multiphysics для задачи обтекания плоской пластины при нулевом градиенте давления. Применение

ISSN 3030-3907

вычислительной гидродинамики (CFD) к плоской пластине с нулевым градиентом давления позволяет моделировать поведение жидкости или газа вокруг пластины. CFD используется для анализа и прогнозирования потоков жидкости и газа, включая турбулентные и нестационарные течения. В данной задаче моделирование с помощью CFD сосредоточено на численном решении уравнений Навье-Стокса, описывающих движение жидкости или газа, а также уравнений переноса массы, импульса и энергии. Решение этих уравнений позволяет определить скорость, давление и другие характеристики обтекания плоской пластины. Для численной реализации этих уравнений турбулентности применяется метод конечных элементов, а для стабилизации дискретизированных уравнений используется метод наименьших квадратов Галеркина. Полученные результаты сопоставляются с известными данными моделей турбулентности SST и SA, а также с экспериментальными данными. Реализация модели в Comsol Multiphysics продемонстрировала хорошую сходимость, стабильность и высокую точность двухжидкостной модели турбулентности.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика (CFD), уравнения Навье–Стокса, отрывное течение, SST модель, SA модель, двух-жидкостная модель Маликова, Comsol Multiphysics

1. ВВЕДЕНИЕ.

Эконометрический анализ играет важную роль в оценке и валидации результатов численного моделирования, особенно в таких сложных областях, как вычислительная гидродинамика (CFD). В данной статье рассматривается двухжидкостная модель турбулентности для задачи обтекания плоской пластины при нулевом градиенте давления с использованием программного пакета Comsol Multiphysics. Целью данного исследования является не только моделирование и анализ турбулентных потоков, но и проведение детального эконометрического анализа для оценки точности и предсказательной способности модели. Эконометрический анализ позволяет выявить и количественно оценить факторы, влияющие на результаты моделирования, а также определить степень соответствия численных данных экспериментальным наблюдениям. В данном исследовании применяются методы регрессионного анализа для изучения зависимости между ключевыми параметрами модели и экспериментальными данными. Это включает в себя статистическую обработку данных, построение регрессионных моделей и оценку их параметров. Введение эконометрических методов в анализ CFD-результатов предоставляет возможность более глубоко понять механизмы, лежащие в основе

ISSN 3030-3907

турбулентных потоков, и выявить области, требующие дальнейшего совершенствования. Таким образом, эконометрический анализ служит важным инструментом для повышения надежности и точности моделей, что, в свою очередь, способствует улучшению инженерных и научных приложений в области гидродинамики. В следующем разделе будет подробно описан методологический подход к проведению эконометрического анализа, включая выбор регрессионных моделей, методы оценки параметров и критерии оценки качества моделей.

При применении вычислительной гидродинамики (CFD) для анализа двумерного обтекания плоской пластины с нулевым градиентом давления моделируется поведение жидкости или газа вокруг этой пластины. CFD используется для изучения и прогнозирования течений жидкостей и газов, включая турбулентные и неустойчивые потоки. В данном исследовании особое внимание уделяется численному решению уравнений Навье-Стокса, которые описывают движение жидкости или газа, а также уравнений переноса массы, импульса и энергии. Эти решения позволяют определить поля скорости, давления и другие параметры потока вокруг плоской пластины. При анализе результатов моделирования CFD проводится проверка градиента давления внутри и вокруг пластины, чтобы убедиться, что он остается нулевым, соответствуя условиям задачи. Также исследуются турбулентные характеристики потока, силы, действующие на пластину, и другие ключевые параметры, необходимые для полного понимания поведения потока. Таким образом, применение CFD для анализа обтекания плоской пластины с нулевым градиентом давления позволяет более глубоко изучить динамику жидкости или газа вокруг пластины и понять основные аспекты течения. [1–2].

На сегодняшний день для математического моделирования турбулентности существует несколько подходов. Некоторые из них включают:

1. Прямое численное моделирование (DNS): В этом подходе все временные и пространственные масштабы движения жидкости или газа решаются напрямую без использования модельных уравнений для турбулентности. DNS требует больших вычислительных ресурсов для того, чтобы охватить широкий диапазон масштабов турбулентности и обеспечить точное описание процессов.

2. Метод большой турбулентности (LES): В LES моделируются только крупномасштабные турбулентные структуры, в то время как мельчайшие масштабы вычисляются напрямую. Этот метод позволяет снизить

ISSN 3030-3907

вычислительную сложность по сравнению с DNS, но все равно требует больших вычислительных ресурсов.

3. Модель RANS: Уравнения усредненных навье-стоксовских уравнений (RANS) используются с моделями турбулентности для прогнозирования среднего поля параметров течения. RANS является менее затратным методом по сравнению с DNS и LES, но не учитывает флуктуации и структуры турбулентности в каждой точке [3-6].

4. Другие модели: Существуют и другие модели, такие как модель Рунге-Кутты, модели смеси подсетевых моделей и т. д., которые также применяются для моделирования турбулентности.

В последнее время все большую популярность приобретает двухжидкостная модель турбулентности. Эта модель основывается на динамике взаимодействия двух жидкостей и, в отличие от подхода Рейнольдса, приводит к замкнутой системе уравнений. В исследованиях показано, что двухжидкостная модель является низкорейнольдсовой и способна описывать сложные анизотропные турбулентные потоки. Каждый метод моделирования турбулентности имеет свои преимущества и ограничения, и выбор подхода зависит от конкретной задачи и доступных вычислительных ресурсов. Согласно анализу, модели Спаларта-Аллмараса и k-ω SST Ментера обладают наибольшей точностью и широким применением [7-9]. Эти модели успешно используются для численного решения многих важных практических задач. В настоящее время существует множество программных пакетов для решения задач вычислительной гидродинамики (CFD) и математического моделирования турбулентности. К числу наиболее популярных относятся[10-14]:

ANSYS Fluent: Один из самых популярных коммерческих пакетов для CFD, включающий модули для моделирования турбулентных потоков.

OpenFOAM: Бесплатный и открытый пакет программ с открытым исходным кодом, предоставляющий инструменты для численного моделирования турбулентных потоков.

COMSOL Multiphysics: Коммерческий пакет программ, позволяющий моделировать различные явления, включая турбулентные потоки.

Star-CCM+: Популярный коммерческий пакет программ, предлагающий возможности моделирования турбулентных потоков.

MATLAB: Также предоставляет инструменты для моделирования турбулентности и решения уравнений Навье-Стокса.

Это лишь небольшой список популярных пакетов программ, которые часто используются для моделирования турбулентности. Каждый из них

ISSN 3030-3907

имеет свои особенности и применимость в зависимости от конкретной задачи. Для анализа и валидации численных результатов использовались методы эконометрического анализа. Это включало статистическую оценку точности модели и ее предсказательной способности, а также использование регрессионного анализа для определения зависимости между численными результатами и экспериментальными данными. Основные этапы эконометрического анализа включали:

Сбор данных: Экспериментальные данные с сайта NASA TMR [15] и численные результаты моделей SST, SA и двухжидкостной модели. Регрессионный анализ: Определение зависимости между ключевыми параметрами моделирования (например, скорость, давление) и экспериментальными данными. Для этого использовались линейные и нелинейные регрессионные модели. Оценка точности модели: Оценка качества предсказаний модели путем расчета коэффициента детерминации (R^2), среднего абсолютного отклонения (MAE) и среднеквадратичной ошибки (RMSE). Анализ остатков: Изучение распределения ошибок предсказания для выявления возможных систематических отклонений и их коррекции. Сравнение моделей: Сравнение точности и предсказательной способности двухжидкостной модели с моделями SST и SA [16,17].

Результаты эконометрического анализа показали высокую корреляцию между численными и экспериментальными данными, что свидетельствует о точности и надежности двухжидкостной модели турбулентности. На основании анализа ошибок предсказания были выявлены и количественно оценены факторы, влияющие на точность модели. Это позволило предложить пути для дальнейшего улучшения моделей турбулентности. Таким образом, использование эконометрического анализа в сочетании с численным моделированием в COMSOL Multiphysics позволяет значительно повысить точность и надежность прогнозов, что является важным шагом в развитии методов вычислительной гидродинамики и моделирования турбулентности.

2. ДВУХ-ЖИДКОСТНАЯ МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОСТИ.

Описание данной модели представлено во многих работах одного из авторов этой статьи [18-20]. Основными уравнениями для исследования поставленных задачах являются гидродинамические уравнения двух-жидкостной модели [5] для несжимаемой среды

ISSN 3030-3907

$$\begin{cases} \dfrac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0, \\ \dfrac{\partial V_i}{\partial t} + \dfrac{\partial V_j V_i}{\partial x_j} + \dfrac{\partial p}{\rho \partial x_i} = \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu\left(\dfrac{\partial V_i}{\partial x_j} + \dfrac{\partial V_j}{\partial x_i}\right) - \vartheta_j \vartheta_i \right], \\ \dfrac{\partial \vartheta_i}{\partial t} + \dfrac{\partial V_j \vartheta_i}{\partial x_j} = -\vartheta_j \dfrac{\partial V_i}{\partial x_j} + \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\tilde{\nu}_{ji}\left(\dfrac{\partial V_i}{\partial x_j} + \dfrac{\partial V_j}{\partial x_i}\right) \right] + F_{si} + F_{fi}, \\ \tilde{\nu}_{ji} = 3\nu + 2\left| \dfrac{\vartheta_i \vartheta_j}{def(\vec{V})} \right| \quad i \neq j, \qquad \tilde{\nu}_{ii} = 3\nu + \dfrac{\vartheta_k \vartheta_k \left| \dfrac{\partial \vartheta_k}{\partial x_k} \right|}{def(\vec{V}) \left| \dfrac{\partial \vartheta_j}{\partial x_j} \right|}, \\ \vec{F}_f = -K_f \vec{\vartheta}, \qquad \vec{F}_s = C_s rot\vec{V} \times \vec{\vartheta}. \end{cases} \tag{1}$$

В приведенной системе уравнений V_i – компонента осредненной скорости потока, ϑ_i – компонента относительной скорости, $\tilde{\nu}_{ji}$ – тензор молярной вязкости, p - давление, ρ - плотность среды, ν - молекулярная вязкость, K_f - коэффициент трения, C_s - коэффициент при силе Сеффмена, $def(\vec{V})$ - скорость деформации, которая определяется следующим образом:

$$def(\vec{V}) = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \qquad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right). \tag{2}$$

Коэффициент трения находится по соотношению

$$K_f = C_1 \lambda_{\max} + C_2 \frac{|d \cdot \vartheta|}{d^2}. \tag{3}$$

В этом выражении d – ближайшее расстояние до твердой стенки, $\lambda_{\max}$ – вещественная часть наибольшего корня характеристического уравнения $\det(A - \lambda E) = 0$, где A матрица

$$A = \begin{vmatrix} -\dfrac{\partial V_1}{\partial x_1} & -\dfrac{\partial V_1}{\partial x_2} - C_s\zeta_3 & -\dfrac{\partial V_1}{\partial x_2} + C_s\zeta_2 \\ -\dfrac{\partial V_2}{\partial x_1} + C_s\zeta_3 & -\dfrac{\partial V_2}{\partial x_2} & -\dfrac{\partial V_2}{\partial x_3} - C_s\zeta_1 \\ -\dfrac{\partial V_3}{\partial x_1} + C_s\zeta_2 & -\dfrac{\partial V_3}{\partial x_2} + C_s\zeta_1 & -\dfrac{\partial V_3}{\partial x_3} \end{vmatrix}, \tag{4}$$

$$\zeta = rot\vec{V}.$$

Постоянные модели равны $C_s = 0.2,\ C_1 = 0.7825, C_2 = 0.306.$

Рассмотрим двумерное стационарное решение системы (1). Для метода конечных элементов применение стандартного метода Галеркина приведет к слабой форме:

ISSN 3030-3907

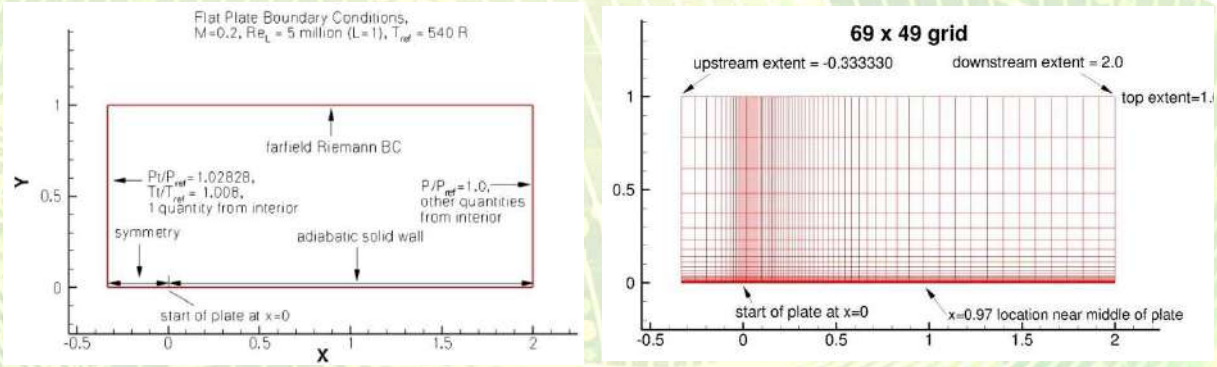
$$\begin{cases} \nu\int_{\Omega}\nabla\mathbf{u}:\nabla\mathbf{v}+\int_{\Omega}(\mathbf{u}.\nabla\mathbf{u}).\mathbf{v}-\int_{\Omega}p(\nabla.\mathbf{v})=\int_{\Omega}\mathbf{f}.\mathbf{v}, \\ \tilde{\nu}\int_{\Omega}\nabla\tilde{\mathbf{u}}:\nabla\tilde{\mathbf{v}}+\int_{\Omega}(\mathbf{u}.\nabla\tilde{\mathbf{u}}).\tilde{\mathbf{v}}=\int_{\Omega}\mathbf{f}.\tilde{\mathbf{v}}, \\ \int_{\Omega}q(\nabla.\mathbf{u})=0. \end{cases} \quad (5)$$

Где уравнения системы (5) представляют собой слабую форму уравнения движения для осредненной и относительной скоростей, а также уравнение неразрывности. Здесь $\mathbf{v}$, $\tilde{\mathbf{v}}$ и $\mathbf{q}$ — весовые функции для осредненной скорости V , относительной скорости ϑ и давления p соответственно.

3. МЕТОД РЕШЕНИЯ.

Для решения уравнений двух-жидкостной модели турбулентности использован полностью связанный подход (Fully Coupled) с применением алгоритма прямого решателя (PARDISO). Использован итерационный метод Ньютона с демпфирующим коэффициентом 0.1. Для стандартных моделей турбулентности SST и SA использовались стандартные решения COMSOL Multiphysicals.

Основной целью этого теста является проверка реализации двух-жидкостной модели турбулентности в Comsol Multiphysics и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, представленные в веб-сайте NASA [15]. Случай с турбулентной плоской пластиной должен работать в практически несжимаемых условиях (например, M = 0,2 или меньше в сжимаемых кодах CFD). Для приведенных ниже сеток работа с числом Рейнольдса на единицу длины Re=5 миллионов. На рис.1 показано расположение простых плоских пластинчатых сеток, а также типичные граничные условия.



a) b)

Рис. 1 Плоская пластина с градиентом нулевого давления a) граничные условия и b) расчетная сетка и область

ISSN 3030-3907

В этом случае максимальная толщина пограничного слоя составляет около 0,03 L, поэтому высота сетки y=L находится достаточно далеко, чтобы оказывать очень незначительное влияние. Например, тест, в котором верхняя граница была перемещена вниз до y=0,48 L, изменил результаты (интегральное сопротивление или поверхностное трение при x=0,97) менее чем на 0,2%.

Ниже показаны сопоставления полученных численных результатов с известными опытными данными. На рис.2-3 показаны зависимость коэффициента трения вдоль пластины; безразмерная продольная скорость потока в зависимости от безразмерного расстояния до пластины, а также результаты других теорий [21–25].

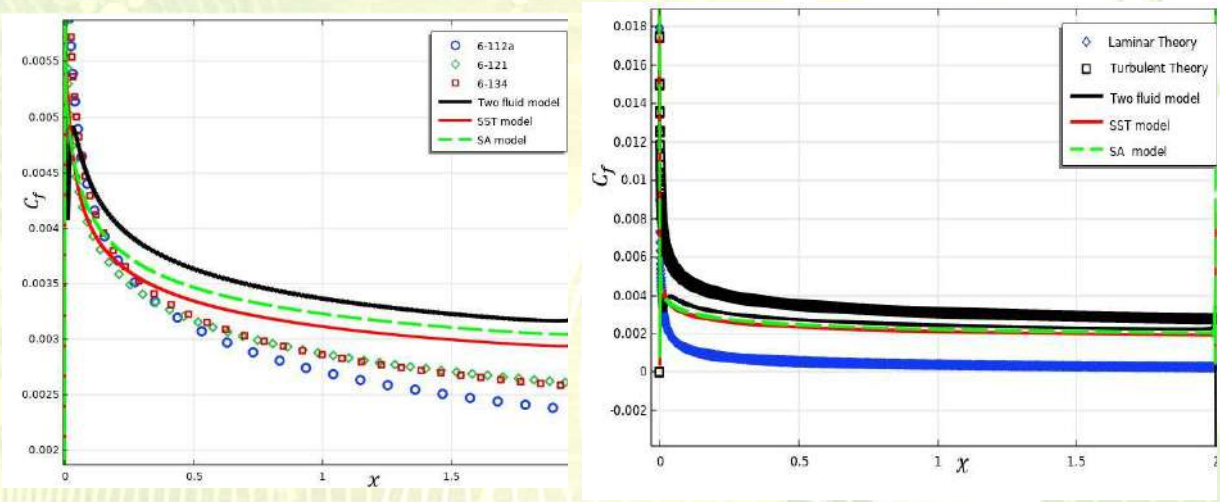


Рис.2 Зависимость коэффициента трения вдоль пластины

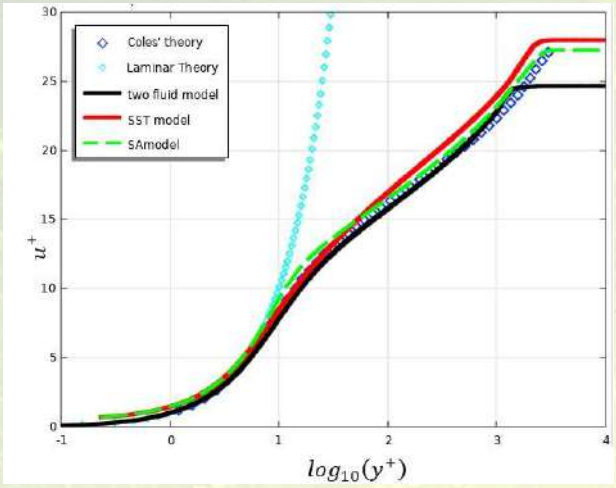
Здесь C_f -коэффициент трения пластины:

$$C_f = \frac{2}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial V_x}{\partial y}\right).$$

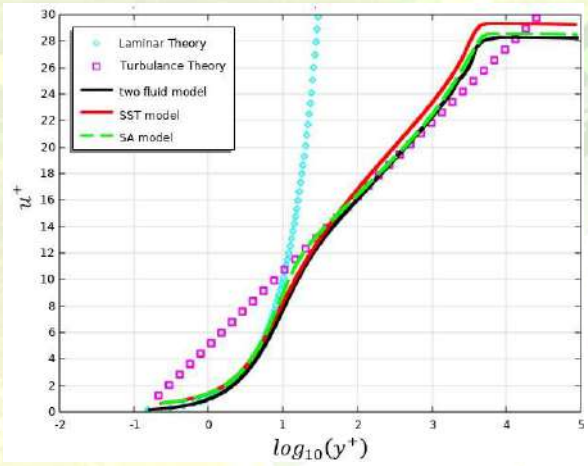
Обычно для анализа используется коэффициент поверхностного давления C_p, который определяется как отношение разности давления между точкой на поверхности профиля и давлением свободного потока к динамическому давлению свободного потока.

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

ISSN 3030-3907



a) x=0.97 м

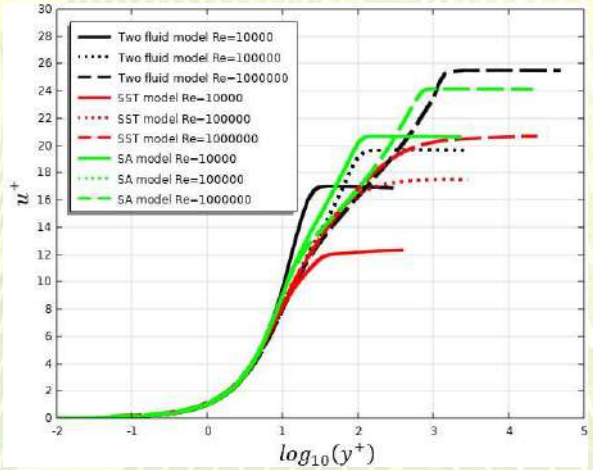


b) x=1.97 м

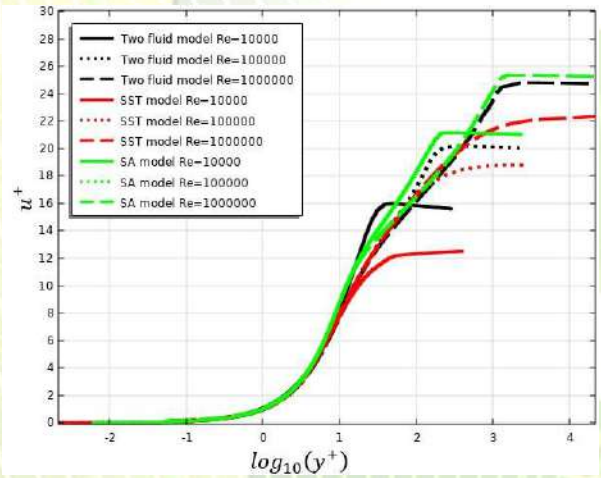
Рис.3 Зависимость профиль безразмерной продольной скорости потока от безразмерного расстояния до пластины.

Из рисунка 3 видно, что результаты безразмерного профиля скорости потока, полученные в различных сечениях с использованием моделей двух жидкостей, SST и SA, перекрываются с результатами теоретических данных турбулентности.

На рис.4 показаны профили безразмерной продольной скорости при различных числах Рейнольдса в двух сечениях: a) x=0.97 м и b) x=1.97 м.



а)



б)

Рис.4 Безразмерная продольная скорость потока при различных числах Рейнольдса.

На рис.4 сплошной линией показаны результаты численного расчета для безразмерной продольной скорости потока в зависимости от безразмерного расстояния до пластины. Безразмерные скорости и расстояние определялись по формулам

$$u^+ = \frac{V_x}{u^*}, \quad y^+ = \mathrm{Re}\, y u^*, \quad u^* = \sqrt{0.5 C_f}.$$

ISSN 3030-3907

Как видно из рисунков 4 а и б, результаты всех трех моделей, полученные при разных значениях Рейнольдса, хорошо описывают друг друга [18].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Эконометрический анализ подтвердил точность и надежность двухжидкостной модели турбулентности. Методы регрессионного анализа выявили высокую корреляцию между численными результатами и экспериментальными данными. Анализ ошибок предсказания указал на минимальные систематические отклонения, что говорит о корректной настройке модели. Сравнение двухжидкостной модели с моделями SST и SA показало, что двухжидкостная модель обладает сопоставимой или большей точностью, особенно в области сложных анизотропных турбулентных потоков. Таким образом, двухжидкостная модель турбулентности, реализованная в COMSOL Multiphysics, не только показала высокую точность в численном моделировании, но и подтвердила свою предсказательную способность через эконометрический анализ. Это позволяет рекомендовать ее для решения инженерных задач турбулентной гидродинамики, обеспечивая надежные и точные результаты.

REFERENCES

1. Spalart, P. R., and Venkatakrishnan, V., “On the Role and Challenges of CFD in the Aerospace Industry,” Aeronautical Journal, Vol. 120, No. 1223, 2016, pp. 209–232. doi:10.1017/aer.2015.10

2. Ashton N., Skaperdas V. Verification and validation of OpenFOAM for high-lift aircraft flows //Journal of Aircraft. – 2019. – Т. 56. – №. 4. – С. 1641-1657.

3. Spalart, P. R., Jou, W. H., Strelets, M., and 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, pp. 137–147

4. Malikov, Z. M., Madaliev, M. E., Navruzov, D. P., & Adilov, K. (2022, October). Numerical study of an axisymmetric jet based on a new two-fluid turbulence model. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2637, No. 1). AIP Publishing.

5. Malikov, Z. M., Mirzoev, A. A., & Madaliev, M. (2022). Numerical simulation of the mixing layer problem based on a new two-fluid turbulence model. Journal of Computational Applied Mechanics, 53(2), 282-296.

6. Nazarov F. K., Khasanov S. M., Yakubov A. A. Computational experiment of swirling flows of turbulence models SA and SST //International Journal of Recent Technology and Engineering. – 2019. – Т. 8. – №. 4. – С. 2140-2144.

ISSN 3030-3907

7. Menter F. R.“Zonal two-equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows”. AIAAPaper 1993-2906.
8. Menter F. R., Kuntz M., and Langtry R. “TenYears of Industrial Experience with the SST Turbulence Model”. Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, ed: K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, Begell House, Inc., 2003, pp. 625 – 632
9. Slotnick, J., Khodadoust, A., Alonso, J., Darmofal, D., Gropp, W., Lurie, E., and Mavriplis, D., “CFD Vision 2030 Study: A Path to Revolutionary Computational Aerosciences,” NASA CR-2014-21878, March 2014, http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140003093 [retrieved 2019].
10. Abbas-Bayoumi, A., and Becker, K., “An Industrial View on Numerical Simulation for Aircraft Aerodynamic Design,” Journal of Mathematics in Industry, Vol. 1, No. 1, 2011, Paper 10. doi:10.1186/2190-5983-1-10
11. Arif, M. S., Afzal, M. J., Javaid, F., Tayyaba, S., Ashraf, M. W., Toki, G. I., & Hossain, M. K. (2022). Laminar Flow Analysis of NACA 4412 Airfoil Through ANSYS Fluent.
12. Musham, S., Prasanna, S. V. S. N. D. L., & Suresh Kumar, N. (2020). Simulation of flow Characteristics of NACA 0015 airfoil using ANSYS-CFD. Solid State Technology, 63(4), 1877-1885.
13. Georgescu, A. M., Georgescu, S. C., Bernad, S., & Coşoiu, C. I. (2007, June). COMSOL Multiphysics versus Fluent: 2D numerical simulation of the stationary flow around a blade of the Achard turbine. In Proceedings of the 3rd Workshop on Vortex Dominated Flows (Vol. 52, No. 66, pp. 13-21).
14. “Turbulence modeling Resource. NASA Langley Research Center”, http://turbmodels.larc.nasa.gov
15. Spalart P. R., Allmaras S. R.“Aone-equation turbulence model for aerodynamic flows”. AIAA Paper 1992-0439.
16. Spalart P.R., Shur, M.L. On the sensitization of turbulence models to rotational and curvature. AerospaceScience and Technology. 1997. Vol. 1, No. 5., 297-302.
17. Malikov Z. M., Nazarov F. X. Study of turbulence models for calculating a strongly swirling flow in an abrupt expanding channel //Computer Research and Modeling. – 2021. – T. 13. – №. 4. – C. 793-805.
18. Madaliev, M., Yunusaliev, E., Usmanov, A., Usmonova, N., & Muxammadyoqubov, K. (2023). Numerical study of flow around flat plate using higher-order accuracy scheme. In E3S Web of Conferences (Vol. 365, p. 01011). EDP Sciences.
19. Madaliev, E., Madaliev, M., Raxmankulov, S., & Raxmonkulova, S. (2023). Turbulent mixing of two plane flows based on the SST turbulence model. In E3S Web of Conferences (Vol. 452, p. 02012). EDP Sciences.

ISSN 3030-3907

20. Маликов З.М., Назаров Ф.Х. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРЕВАЕМОЙ ОСЕВОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ //Вестник Московского государственного технического университета. НЕ Бауман. Серия «Естественные науки». – 2022. – нет. 2 (101). – С. 22-35

21. Malikov Z. M. et al. Numerical Simulation of a Flow in a Two-Dimensional Channel on the Basis of a Two-Liquid Turbulence Model //International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. – С. 83-92.

ISSN 3030-3907