

ВЕРИФИКАЦИЯ ОТКРЫТОГО ПАКЕТА OpenFOAM НА ЗАДАЧАХ КЛАССИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ERCOFTAC

Жайнаков А. Ж., Калеева А. К., Курбаналиев А. Ы.

Институт горного дела и горных технологий им. У. И. Асаналиева КГТУ.

им. И. Разакова, Бишкек, Кыргызстан,

Кызыл-Кийский гуманитарно-педагогический институт Баткенского государственного университета, г.

Кызыл-Кыя, Кыргызстан

В работе рассматриваются возможности открытого пакета OpenFOAM для решения ряда задач вычислительной гидродинамики. Показаны результаты расчетов доступных в открытой литературе наиболее информативных и надежных тестовых задач.

In this paper we consider the possibility of opening a package OpenFOAM to solve several problems in computational fluid dynamics. Shows the results of the calculations are available in the open literature of the most informative and reliable test problems.

При решении задач широкого класса задач вычислительной аэродинамики все более широко применяется свободно распространяемый пакет OpenFOAM[1]. Открытость исходного кода данного пакета представляет широкие возможности по изучению и доработке реализованных в нем математических моделей, методов решения систем линейных алгебраических уравнений, численных методов решения дифференциальных уравнений в частных производных. По своей архитектуре

OpenFOAM является набором большого количества библиотек на языке Си++, что позволяет пользователю, не обладающему глубокими знаниями по внутренней структуре самого пакета, гибко модифицировать пакет под свои конкретные нужды. Необходимо подчеркнуть, что пользователь должен акцентировать особое внимание на математические модели и методы решения прикладных задач, причем весь процесс решения задачи вычислительной гидродинамики в пакете

OpenFOAM состоит из последовательности блоков работы препроцессора, решателя и постпроцессора. Ядро пакета непосредственно применяется на этапе решателя, а для пре- и постпроцессинга могут использоваться как средства OpenFOAM, так и внешние средства. Среди них имеется большое количество свободно распространяемых, что позволяет при совместном использовании их с OpenFOAM организовать весь процесс решения без привлечения дорогостоящих коммерческих программных средств.

В данной работе приведены результаты численного моделирования некоторых задач из открытой классической базы данных Европейского сообщества по исследованию течения, турбулентности и горения ERCOFTAC[2], а именно:

1. Моделирование обтекания симметричного и гладкого выступа над поверхностью (ERCOFTAC test case 18).
2. Моделирование обтекания труб, расположенных в шахматном порядке (ERCOFTAC test case 78).
3. Моделирование обтекания крыла (ERCOFTAC test case 11).
4. Моделирование течения в канале с наклонным уступом (ERCOFTAC test case 53).
5. Моделирование течения в трубе квадратного сечения с изгибом на 90° (ERCOFTAC test case 62).

Математическая модель. В качестве исходных уравнений для описания стационарных турбулентных течений использовалась система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, которая для несжимаемого течения при отсутствии массовых сил имеет вид[3, с. 293]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad ; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \rho \overline{u'_i u'_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j}$$

где \bar{u}_i – компоненты средней скорости, ρ – плотность, \bar{p} – среднее давление,

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \text{тензор вязких}$$

напряжений, связанный с молекулярной вязкостью μ , а $\rho \overline{u'_i u'_j}$ – напряжения Рейнольдса, требующие моделирования. Осреднение производится по времени, а штрих означает флуктуационную часть. При наличии внешних сил систему этих уравнений необходимо дополнить соответствующими членами. Учет влияния турбулентных пульсаций на характеристики среднего течения производится на основе классических RANS-моделей турбулентности[4, с.66].

Численная модель. Дискретизация расчетной области получается методом

контрольного объема, который обеспечивает строгое соблюдение законов сохранения, и основные понятия метода напрямую соответствуют физическим таким величинам, как массовый расход, поток и т.д.[5, с. 24]. Расчетную область разбивают на некоторое число непересекающихся гексаэдрических контрольных объемов таким образом, что каждая узловая точка содержится в одном контрольном объеме. Дифференциальное уравнение интегрируют по каждому контрольному объему. Для вычисления интегралов используют кусочные профили, которые описывают изменение искомой величины между узловыми точками. В качестве начальных условий во внутренних узлах расчетной сетки для скорости и давления заданы величины $u=0$ м/с $p=0$ Па. Как известно, для стационарного течения нет необходимости задания начальных условий. Однако, в пакете OpenFOAM, определение начальных полей скорости и давление является обязательным[1]. Предполагается, что турбулентность на входе является изотропной, а флуктуации скорости составляют 5% от средней скорости. На входе в канал кинетическая энергия турбулентности определяется по интенсивности турбулентности потока, а скорость диссипации кинетической энергии турбулентности вычисляется по соотношению:

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} k^{3/2} / L$$

где L –характерный линейный входной размер канала, который равен 10% входной ширины канала.

На выходе из камеры продольные градиенты всех искомым переменных, кроме давления, полагаются равными нулю. Гидродинамические граничные условия на твердых стенках канала для турбулентных величин ставились при помощи аппарата пристеночных функций, позволяющих снести граничные условия непосредственно со стенок в первый от стенки сеточный узел [3, с. 276].

Численное решение систем нелинейных уравнений проведено с помощью приложения simpleFoam пакета OpenFOAM, которое предназначено для стационарных турбулентных течений и использует известный алгоритм сопряжения скорости и давления SIMPLE[5, с. 84].

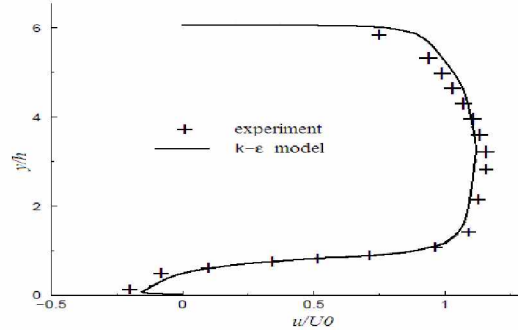
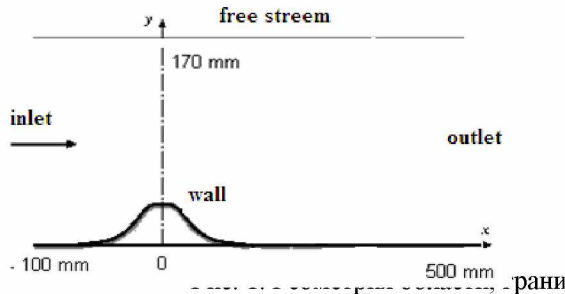
Для повышения устойчивости итерационного метода решения взаимосвязанных и нелинейных алгебраических уравнений, использовались следующие коэффициенты нижней релаксации 0,7 для $U, k, \varepsilon, \omega$ и 0,3 для p . Относительная ошибка сходимости итераций для всех рассматриваемых переменных была равной $\varepsilon = 10^{-4}$.

Первая тестовая задача. Рассматривается двумерное течение несжимаемой турбулентной вязкой среды в канале с симметричными плавными выступами на поверхности. Высота

канала 170мм, расстояние от входа в канал до центра выступа – 100мм, от центра выступа до выхода из канала – 500мм. Высота выступа $h=28$ мм, длина – 108мм. Средняя осевая скорость на входе $U_0 = 2,147$ м/с, кинематическая вязкость воды $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, вычисленное по этим характеристикам число Рейнольдса было

равно $Re = \frac{U_0 \cdot h}{\nu} = 6 \cdot 10^4$. Геометрия

рассматриваемой задачи и граничные условия показаны на рис. 1, слева, а профиль продольной скорости при $x = 50$ мм (в единицах U_0) приведен справа.



Следующей задачей является моделирование обтекания расположенных в шахматном порядке труб, а геометрия

вычислительной области и граничные условия задачи показаны на рис. 2.

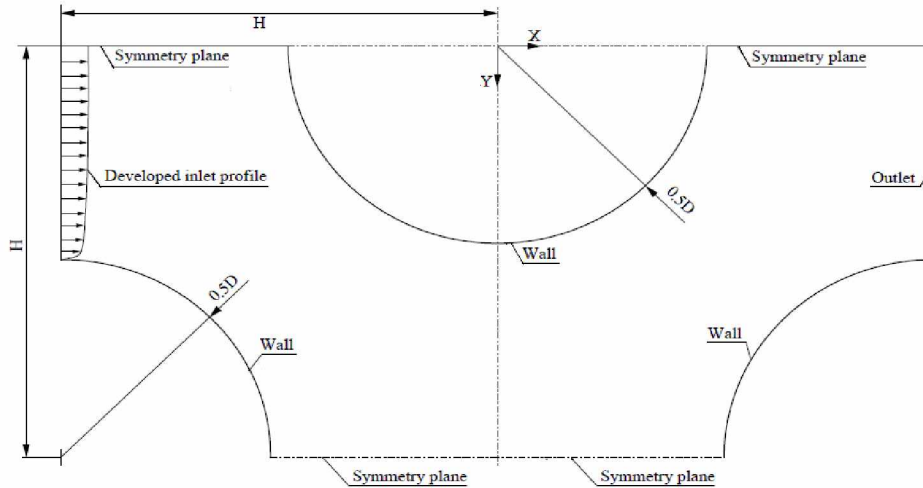


Рис.2. Геометрия области и граничные условия.

Сравнение поперечных профилей продольной U_x и поперечной U_y скоростей в сечении $x = 0,489H$ представлено на рис. 3. Здесь обе скорости представлены в единицах средней входной скорости. Видно, что характер изменений численных результатов и

экспериментальных данных совпадают. Однако имеются небольшие отличия в максимальных значениях, что вероятно связано с использованной RANS моделью турбулентности.

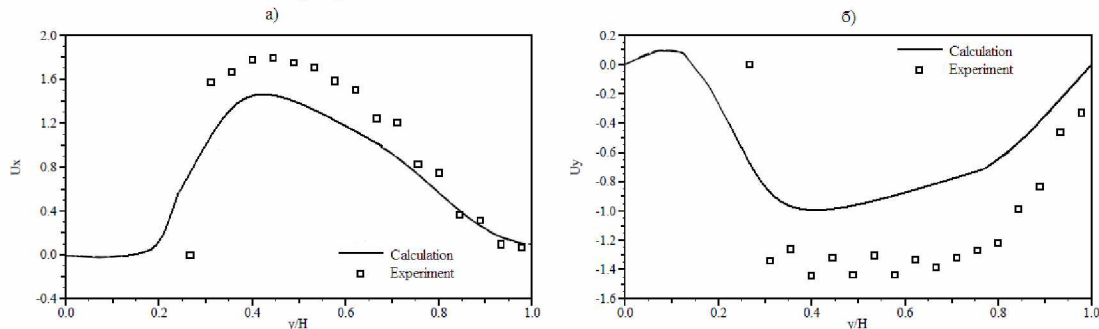


Рис. 3. Профили осевой скорости (рис. 3а) и поперечной скорости (рис.3б).

Моделирование обтекания крыла.
Рассматривается обтекание тонкого крыла

воздушным потоком со скоростью

$U_0 = 30,5 м/с$ с нулевым углом атаки. Длина хорды крыла равна $c=610 мм$, а число Рейнольдса, вычисленное по длине хорды, было равно $Re = 1,2 \cdot 10^6$. На рис. 4 представлены

поперечные профили продольной скорости u в единицах U_0 при различных значениях безразмерной продольной координаты x .

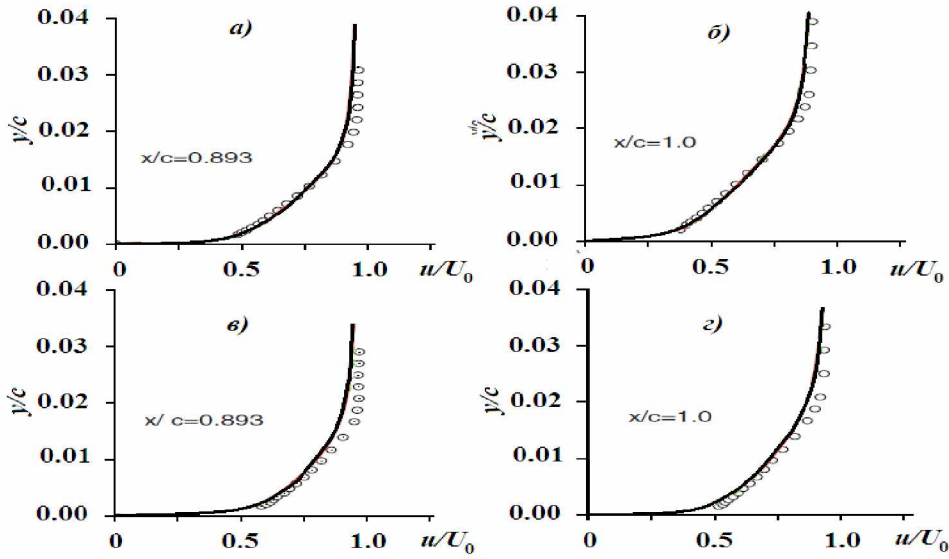


Рис. 4. Профили осевой скорости в различных сечениях.

Рисунки *а* и *б* соответствуют профилям скорости над поверхностью крыла, а рисунки *в* и *с* – под поверхностью крыла.

Канал с наклонным уступом. Стационарный турбулентный поток несжимаемой жидкости поступает слева в прямоугольную с поперечным сечением 25x250мм длиной 2250мм

входную часть канала (рис. 5.). Высота уступа была равна $H = 50 мм$, а степень расширения канала $Er = 3$. Число Рейнольдса Re , рассчитанное через высоту уступа и максимальной входной скорости U_0 , равнялось величине 73000.

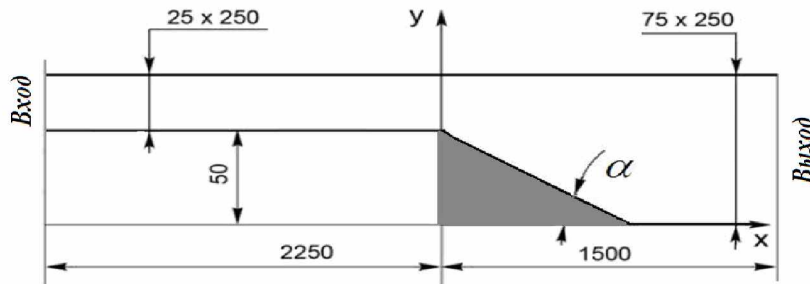


Рис.5. Канал с наклонным уступом.

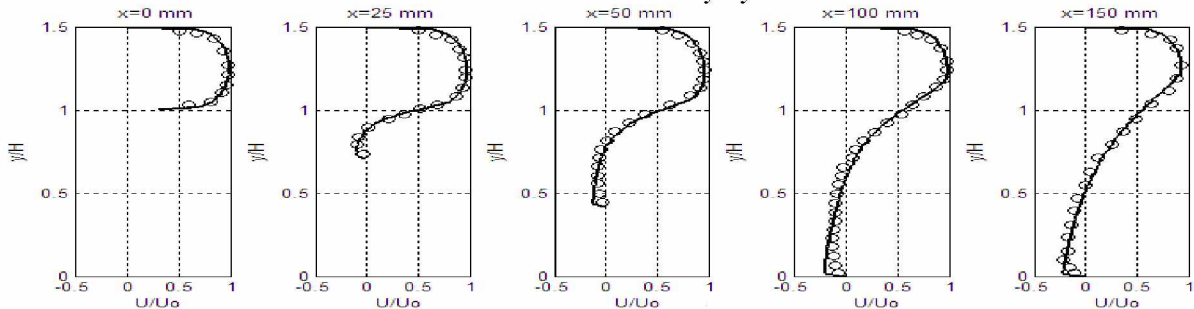


Рис. 6. Профили безразмерной продольной скорости в различных сечениях.

На рис. 6. представлены поперечные профили продольной скорости в различных сечениях вниз по потоку. Сплошная линия соответствует численным результатам данной работы и маркеры представляют экспериментальные данные.

Квадратная, изогнутая на 180° труба. Стационарный турбулентный поток воздуха

входит в трубу с максимальной скоростью $U_0 = 11 м/с$ ((см. рис. 7а). Число Рейнольдса, рассчитанное через ширину канала, равно $Re = 56690$.

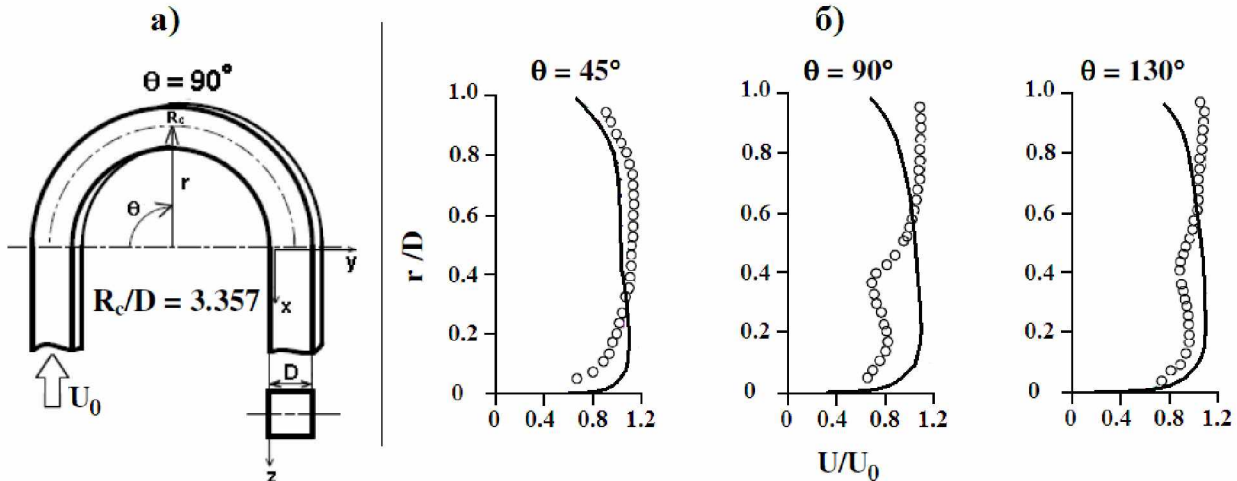


Рис. 7. Схема течения (рис. 7а) и профили скорости (рис. 7б).

Сравнение численных результатов с соответствующими экспериментальными данными представлены на рис. 7б. Видно, что численные данные удовлетворительно повторяют характер изменения экспериментальных данных.

Заключение. В работе приведены численные результаты моделирования тестовых задач базы данных ERCOFTAC с помощью свободно распространяемого пакета OpenFOAM. При этом открытость кода представляет широкие возможности для модификации и доработки исходных программных средств для более точной их настройки под решение конкретных практических задач вычислительной гидродинамики.

Литература:

8. <http://www.openfoam.org>.
9. <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/>
10. Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics // Springer Verlag, 2002, 423 p.
11. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics // Edinburg: Pearson Education Limited, 2007, 517p.
12. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. –М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.