

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ДВУМЕРНЫХ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПАКЕТЕ OPENFOAM

Жайнаков А. Ж.,¹Институт горного дела и горных технологий им. У. И. Асаналиева Кыргызского государственного технического университета им. И. Разакова, Бишкек, Кыргызстан, jainakov-41@mail.ru

*Калмурзаева А. Т.,²Кызыл-Кийский педагогический институт Баткенского государственного университета г. Кызыл-Кия, Кыргызстан, anira.kalmurzaeva.80@mail.ru ,
Турганбаева А.Б.,³Ошский гуманитарно-педагогический институт, г. Ош, Кыргызстан, mir_syka@mail.ru*

Аннотация. В статье представлены численные результаты моделирования обтекания двумерного холма турбулентным потоком жидкости. Рассмотрены различные модели турбулентности и изучено влияние входных параметров на характеристики потока вокруг холма. Одним из важных аспектов, который был проверен, является способность решателя воспроизводить рециркуляцию. Проведено сравнение численных профилей скорости в различные сечения с соответствующими данными из экспериментов и получено удовлетворительное согласие. Кроме того, выполнена проверка зависимости численных результатов от плотности расчетной сетки.

THE ALGORITHM OF MODELLING OF TWO DIMENSIONAL RECIRCULATING FLOWS USING OPENFOAM

Zhainakov A. Zh., U. I. Asanaliyev Institute of Mining and Mining Technologies of the I. Razakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyzstan jainakov-41@mail.ru

Kalmursaeva A. T., Kyzyl-Kya Pedagogical Institute of Batken of State University, Kyzyl-Kya, Kyrgyzstan, anipa.kalmurzaeva.80@mail.ru

Turganbaeva A. T., Osh Humanitarian Pedagogic Institute Osh, Kyrgyzstan, mir_ayka@mail.ru

Annotation. The article presents the numerical results of modeling a turbulent flow of water around a two-dimensional hill. Various models of turbulence are considered and the influence of input parameters on the flow characteristics around the hill is studied. One important aspect that has been tested is the ability of the solver to reproduce recirculation zone. Comparison of the numerical velocity profiles at various different cross sections with the corresponding data from the experiments was carried out and satisfactory agreement was obtained. In addition, the verification of the dependence of the numerical results on the density of the computational grid was performed.

Введение. В данной работе рассмотрена одна из надежных моделей турбулентности, которая будет использоваться для моделирования обтекания простых поверхностей рельефа в атмосферном пограничном слое с низкими вычислительными ресурсами. Эта модель турбулентности способна воспроизводить сложные особенности потока, которые нельзя выделить с помощью традиционных моделей RANS. Чтобы определить оптимальную модель турбулентности, были апробированы несколько вариантов традиционной k-ε- модели.

Целью работы было применены выбранной модели турбулентности для численного моделирования обтекания холма двухмерной полиномиальной формы, установленного на плоской пластине с образованием области рециркуляции в подветренной стороне холма. Численное моделирование реализованная в открытом программном обеспечении OpenFOAM [1] с использованием решателя simpleFoam. Кроме того, при моделировании особое внимание уделено к построению вычислительной сетки с оптимальными характеристиками. Численное моделирование воспроизводило экспериментальную установку тестового примера C18 из Европейского исследовательского сообщества «Поток, турбулентность» [2, case 18].

Постановка задачи. Геометрия задачи приведена на рис. 1. Этот тестовый пример относится к двумерной модели холма, установленной на дне канала на плоской пластине с областью рециркуляции. Поток воздуха поступает в канал слева, а выходит справа. В экспериментальной работе [3] измерены скорость и кинетическая энергия турбулентности с использованием метода лазерной доплеровской анемометрии в полностью развитом турбулентном потоке. Высота канала составляла $H = 170$ мм, а максимальная высота и длина холма составляли $h_{\max} = 28$ мм и $2R = 108$ мм соответственно (см. рис. 1). Рабочей жидкостью является вода с кинематической вязкостью $\nu = 1 \times 10^{-6}$ м²/с. Число Рейнольдса, рассчитанное через среднюю скорость $u_0 = 2,147$ м/с и h_{\max} было равно 60 116.

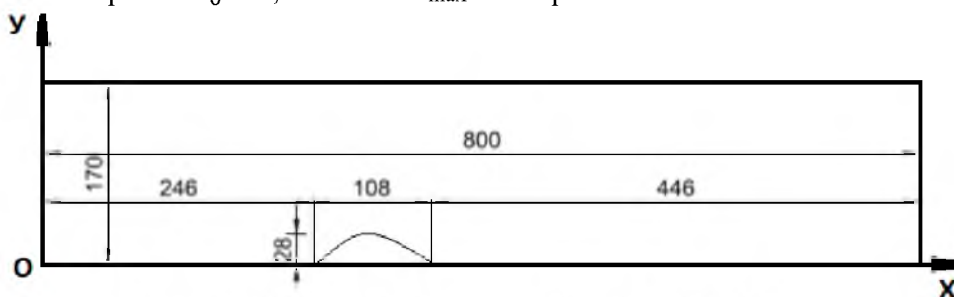


Рис. 1. Геометрия одиночного холма и оси координат.

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 [4, с. 293]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0; \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{\rho u'_i u'_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

где \bar{u}_i – компоненты средней скорости, ρ – плотность, \bar{p} – среднее давление, $\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ – тензор вязких напряжений, μ – молекулярная вязкость, а $\overline{\rho u'_i u'_j}$ – напряжения Рейнольдса.

Численная модель. Граничные условия. Метод решения численных уравнений.

Для дискретизации расчетной области (рис. 1) и систем нелинейных уравнений (1) применяется метод контрольных объемов [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 5 % 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 [6, 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 $\varepsilon = 10^{-4}$.

Результаты численных расчетов и их обсуждения.

Параметры применяемых моделей турбулентности приведены в таблице 1.

Таблица. 1. Коэффициенты модели турбулентности.

к-ε-модель		C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
1	Стандарт	0,09	1,44	1,9	1,0	1,3
2	Realizable	0,09	1,44	1,9	1,0	1,2
3	RNG	0,033	1,176	1,92	1,0	1,3
4	Монин-Обухов	0,033	1,176	1,92	1,0	1,3
5	Атмосферный пограничный слой	0,0256	1,13	1,9	0,74	1,3

В расчетах использованы 4 разных сеток (см. рис. 2).



Рис. 2. Расчетные сетки с разными числами ячеек.

На рис. 3 приведено распределение поля вектора скорости для стандартной k-ε-модели турбулентности. Видно, что перед холмом происходит торможение потока, по мере приближения к вершине холма скорость возрастает, а за холмом имеется рециркуляционная зона.

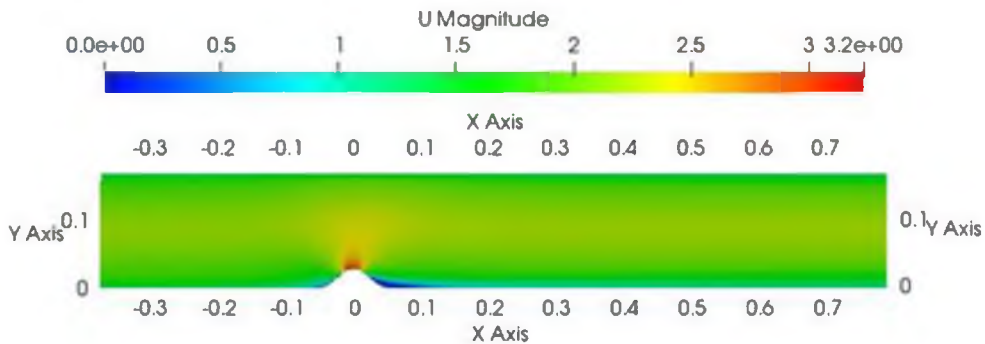


Рис. 3. Поле вектора скорости.

На следующих рисунках приведено сравнение численных значений продольной скорости (рис.4) и кинетической энергии турбулентности (рис. 5) в сечении x = 90мм.

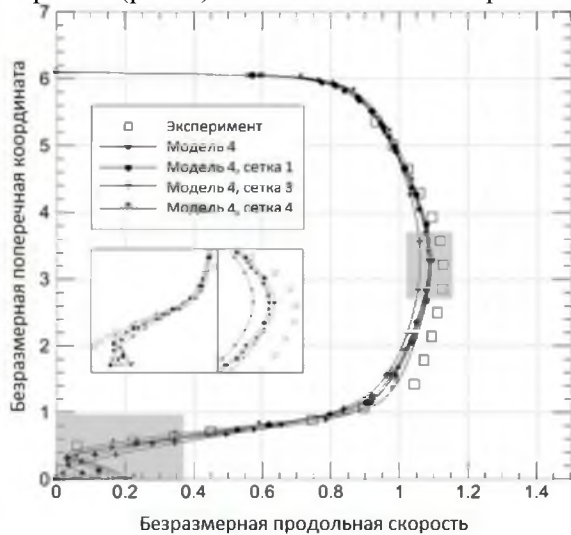


Рис. 4. Профили продольной скорости

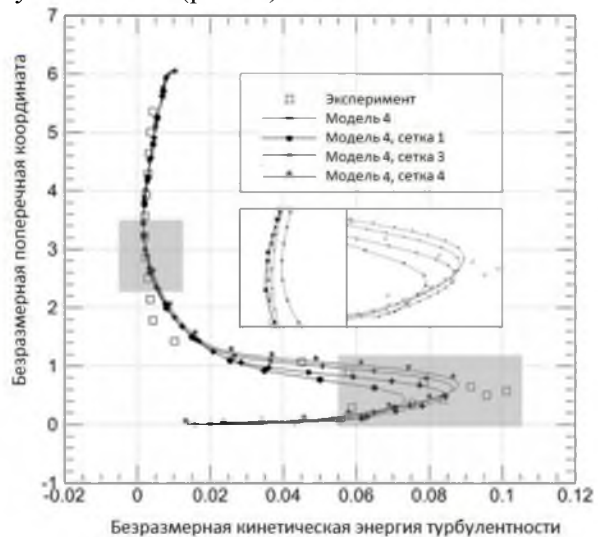


Рис. 5. Профили энергии турбулентности.

Продольная скорость представлена в единицах u_0 , кинетическая энергия турбулентности разделена на величину u_0^2 , а поперечная координата разделена на величину h_{max} . Из рисунков 4-5 видно, что наилучшее совпадение с экспериментальными данными соответствует для расчетной сетки 4 с общим числом $1440 \times 360 = 518400$ ячеек.

Заключение.

В работе было тестировано 5 различных моделей турбулентности на основе модели $k-\epsilon$, с использованием различных сеток. Сравнение распределений скорости и турбулентной кинетической энергии показало, что модель турбулентности $k-\epsilon$ Монина-Обухова приводит к численным результатам, которые наилучшим образом согласуются с экспериментальными измерениями. Было проверено несколько сеток, чтобы установить зависимость решения от сетки. Более грубые и более мелкие расчетные сетки были проверены с помощью модели турбулентности $k-\epsilon$ Монина-Обухова. Цель работы состояла в том, чтобы увидеть, какая сетка приводит к численным результатам, которые хорошо согласуются с экспериментом, в то время как численное моделирование остается экономически эффективным с точки зрения вычислительных ресурсов. Было установлено, что оптимальная сетка - это та, которая уточняется дважды по сравнению со стандартной.

Литература:

1. OpenFOAM user guide. Version 6. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/>.
2. <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/>.
3. G. P. Almeida, D. F. G. Durao and M. V. Heitor, "Wake flows behind two dimensional model hills", Exp. Thermal and Fluid Science, vol. 7(1), 87-101, 1992.
4. Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics // Springer Verlag, 2002, 423 p.
5. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. –М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.
6. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics // Edinburg: Pearson Education Limited, 2007, 517p.