
УДК 532.54

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБТЕКАНИЯ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ

Турганбаева А. Б.

Ошский государственный педагогический университет, г.Ош

В данной работе проведено исследование возможностей двухпараметрических моделей турбулентности при моделировании обтекания плоской пластины и двумерной модели местности. Математическую основу моделирования составляют осреднённые по Рейнольдсу стационарные уравнения Навье-Стокса. Численное решение основных уравнений проведено при помощи пакета OpenFOAM. Сравнение результатов численных расчетов с соответствующими экспериментальными данными позволяет сделать вывод о том, лучшее согласие по профилям скорости и размеру зоны обратных токов соответствует имплементированной в пакет OpenFoam RNG k-ε-модели турбулентности.

Ключевые слова: пристеночные функции, OpenFoam, simpleFoam. отрыв потока, k-ε- RNG модель, k-ω модель.

ЭКИ ӨЛЧӨМДҮҮЛҮКТҮН АЙЛАНАСЫНДАГЫ ТУРБУЛЕНТТҮҮ АГЫМДЫН ЖЕРГИЛИКТҮҮ МОДЕЛДЕРИ

Турганбаева А. Б.

Ош мамлекеттик педагогикалык университети, Ош ш.

Бил иште жалпак пластинанын жана жер бетинин эки өлчөмдүү моделинин айланысындагы агымдарды моделдештирүү учурундагы турбуленттүүлүктүн эки параметрлүү моделдеринин мүмкүнчүлүктөрүн изилдөө каралды. Моделдештирүүнүн математикалык негизин Рейнольдстун ыкмасы менен ортолоштурулган Навье-Стокстун теңдемелери түздү. Негизги теңдемелерди сандык чечүү OpenFOAM пакетинин жардамында жүргүзүлдү. Тескери агымдын узундугу жана ылдамдыктын профили боюнча мыкты дал келүүчүлүктү OpenFOAM пакетине киргизилген турбуленттүүлүктүн RNG k-ε-модели камсыз кылары сандык эсептөөлөрдүн жыйынтыктарын эксперименталдык берилгендер менен салыштыруу көрсөттү.

Баштапкы сөздөр: дубалга жакын функциялар, OpenFoam, simpleFoam, агымдын ажыроосу, k-ε- RNG модель, k-ω модель.

MODELING OF TURBULENT FLOW AROUND A TWO-DIMENSIONAL TERRAIN MODEL

Turganbaeva A.B.

Osh State Pedagogical University, Osh, Kyrgyz Republic

In this paper, the capabilities of two-parameter turbulence models for modeling the flow around a flat plate and a two-dimensional terrain model are investigated. The mathematical basis of the simulation is based on the Reynolds-averaged stationary Navier-Stokes equations. The numerical solution of the basic equations was carried out using the OpenFOAM package. Comparison of the results of numerical calculations with the corresponding experimental data allows us to conclude that the good agreement on the velocity profiles and the size of the reverse current zone corresponds to the k-ε- RNG turbulence model implemented in the OpenFOAM package.

Keywords: wall functions, OpenFoam, simpleFoam, flow separation, k-ε- RNG model, k-ω model.

Введение. В преимущественно горных странах, таких как Кыргызстан, где большие площади суши покрыты сплошными горными массивами, сложный рельеф оказывает очень значительное влияние на рассеивание загрязняющих веществ в атмосфере, которое редко может быть описано простыми моделями [1]. Упрощенные алгоритмы, которые были внедрены в модели нормативной дисперсии в течение последних десятилетий, позволили справиться с такими явлениями, как первое воздействие шлейфа на ближайший холм. Эти модели, как правило, сохраняют гипотезы стационарности потока и горизонтальной однородности, которые больше не действуют, когда сложность рельефа приводит к циркуляции в мезомасштабе и локальном масштабе.

В данной работе проведено моделирование поля атмосферного течения над плоской пластиной и двумерной модели местности. Математическую основу моделирования составляют осреднённые по Рейнольдсу стационарные уравнения Навье-Стокса. Численное решение

основных уравнений проведено при помощи пакета OpenFOAM [2]. Пакет программ OpenFOAM успешно применяется во многих прикладных задачах механики сплошных сред [3-5].

Математическая модель. Основу математической модели рассматриваемой задачи составляют уравнения неразрывности и переноса импульса, которые в нашем случае имеют следующий вид:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0;$$

$$\frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) - 2\epsilon_{ijk} \overline{\omega_j} U_k; \quad (1)$$

где $i, j, k = 1, 2, 3$, U_i и u_i – средняя и пульсационная составляющие вектора скорости потока в направлении координаты x_i , ρ и ν – плотность и коэффициент кинематической вязкости жидкости, p – давление, $\overline{\omega_j}$ – средняя составляющая угловой скорости вращения Земли в направлении координаты x_i .

В уравнении (1) напряжения Рейнольдса $\overline{u_i u_j}$ в рамках приближения Бусинеска, связаны со средним потоком с помощью линейной и изотропной вихревой вязкости следующим образом [6, 7]:

$$-\overline{u_i u_j} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2)$$

где $\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon$ – вихревая или турбулентная вязкость, а $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$ – тензор вязких напряжений.

Значения коэффициентов, применяемых у этой работы двухпараметрических моделей турбулентности в этих моделях приведены в табл. 1.

В данной работе использовался численный метод, представленный в [3-7] с соответствующей геометрией местности, шероховатостью и граничными условиями. Измерения в аэродинамической трубе или в

полевых условиях на эталонном участке местности использовались для задания граничных условий выше по потоку. Однородное условие Неймана было применено для всех переменных потока на внешних границах.

Таблица 1. Константы двухпараметрических моделей турбулентности.

Модели турбулентности	C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ϵ
Стандартная $k-\epsilon$ модель	0.09	1.44	1.92	1.0	1.3
Модифицированная $k-\epsilon$ модель	0.033	1.46	1.83	1.0	2.38
$k-\epsilon$ - RNG модель	0.085	$1.42-C_{1R}$	1.68	0.7179	0.7179

где $C_{1R} = \eta(1 - \eta/4.38)/(1 + 0.015 \eta^3)$, $\eta = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}k}/\epsilon$.

Все расчеты относятся к почти двумерному приближению. Поэтому в этих случаях моделировался только двумерный поток с использованием ортогональных криволинейных сеток. Численное моделирование использует дискретизацию уравнений (1) - (3) методом конечных объемов и алгоритм SIMPLE для сопряжения давления и скорости на неравномерной сетке с использованием стационарного решателя simpleFoam открытого пакета OpenFOAM.

Обтекание плоской пластины (модель равнинной местности).

Скорость свободного потока была равна $U_0 = 10$ м/с, сила Кориолиса не учитывалась. На рис. 1 показаны результаты расчетов с помощью двух моделей турбулентности, толщина пограничного слоя была равна $\delta = 500$ м, где сплошная линия представляет эмпирическую зависимость из работы [8].

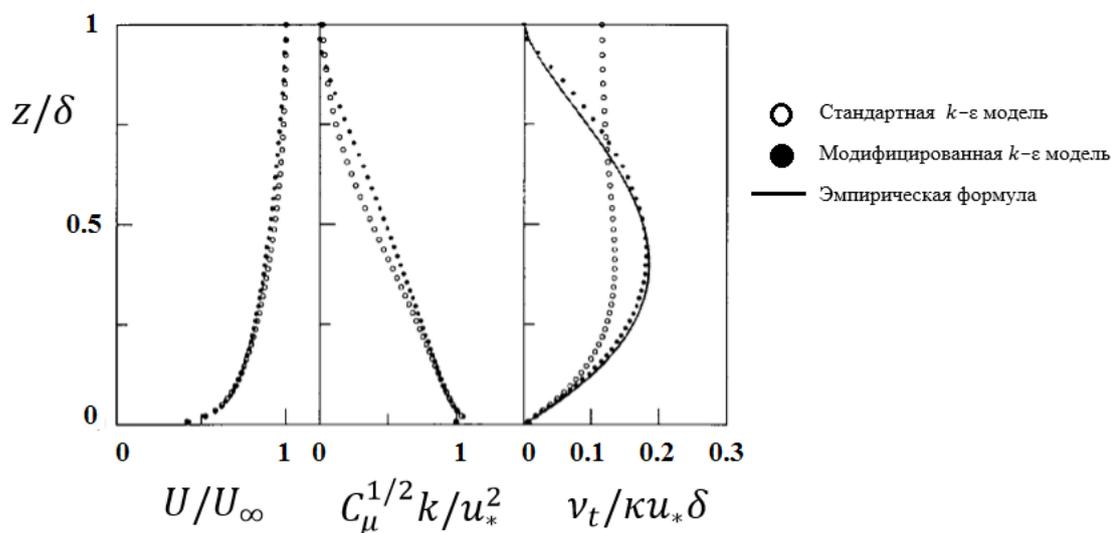


Рис. 1. Моделирование обтекания плоской модели местности.

Как видно из рис. 1, что полученные с помощью стандартной и модифицированной моделей турбулентности численные профили продольной компоненты вектора скорости U и кинетической энергии турбулентности k , достаточно взаимосогласованы.

Обтекание холма треугольной формы. Рассмотренная задача (см. рис. 2) экспериментально изучена в работе [9].

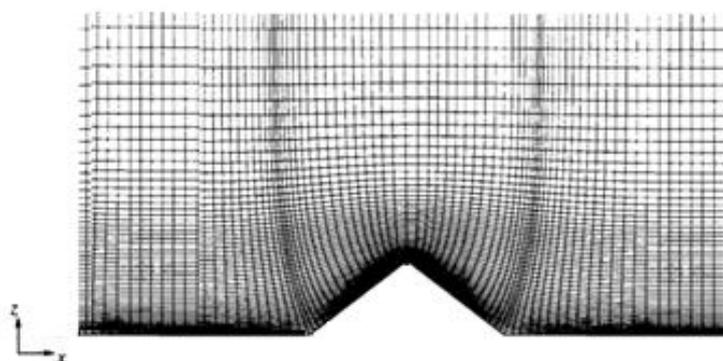


Рис. 2. Неравномерная сетка вокруг треугольного гребня.

В этой работе экспериментально изучено влияние низкого гребня на структуру среднего течения и турбулентности пограничного слоя. Эксперимент проведен в большой метеорологической аэродинамической трубе. Двумерный треугольный гребень, имеющий наклон от 2 до 1 и высоту h около $1/10$ толщины пограничного слоя, располагался

перпендикулярно потоку воздуха. Были проведены экспериментальные измерения среднего и турбулентного течения в пограничном слое в различных положениях относительно гребня и сравнены с измерениями в потоке без гребня. Наибольший эффект гребня состоит в том, чтобы вызвать область разделительного пузыря или полости с сильно уменьшенным, но рециркулирующим средним потоком и очень интенсивной турбулентностью; эта область простирается на расстояние $13H$ вниз по течению от вершины гребня и на максимальную высоту $2.5H$. Кроме того, в результате образуется расширенная область следа, в которой средняя скорость уменьшается, а турбулентность значительно усиливается на больших расстояниях x за гребнем. Экспериментальные наблюдения показывают, что толщина следа увеличивается примерно пропорционально $\sqrt{x/h}$, в то время как возмущения средней скорости, напряжения Рейнольдса и отклонения флуктуаций скорости затухают как $(x/h)^{-1}$.

В табл. 2 показаны численные значения точки повторного присоединения потока со соответствующими экспериментальными данными.

Координаты точки присоединения потока измеряется от вершины треугольного холма с координатой $x=0$ и $z=H=15$ см.

На следующем рис.3 показаны поперечные профили продольной скорости в различные сечения вниз по потоку, проведено сравнение результатов численных расчетов при использовании $k - \varepsilon -$ (сплошная кривая), $k - \varepsilon$ RNG (пунктирная линия) и $k - \varepsilon$ PDM (пунктирная линия с точкой) моделей с соответствующими экспериментальными измерениями. Соответствие между экспериментом и расчетом следует признать удовлетворительным.

Таблица 2. Точка присоединения потока при обтекании холма треугольной формы.

Название	Источник	Координаты точки присоединения
Эксперимент	[9]	$13.0H$
Измененная $k - \varepsilon$ – модель	[10]	$10.0H$
Измененные константы	[11]	$12.0H$
$k - \varepsilon$ – модель	Текущие расчеты	$9.8H$
k- ω модель		$11.0H$
PDM		$9.8H$
$k - \varepsilon$ – RNG модель		$13.5H$
Измененные константы		$16.5H$

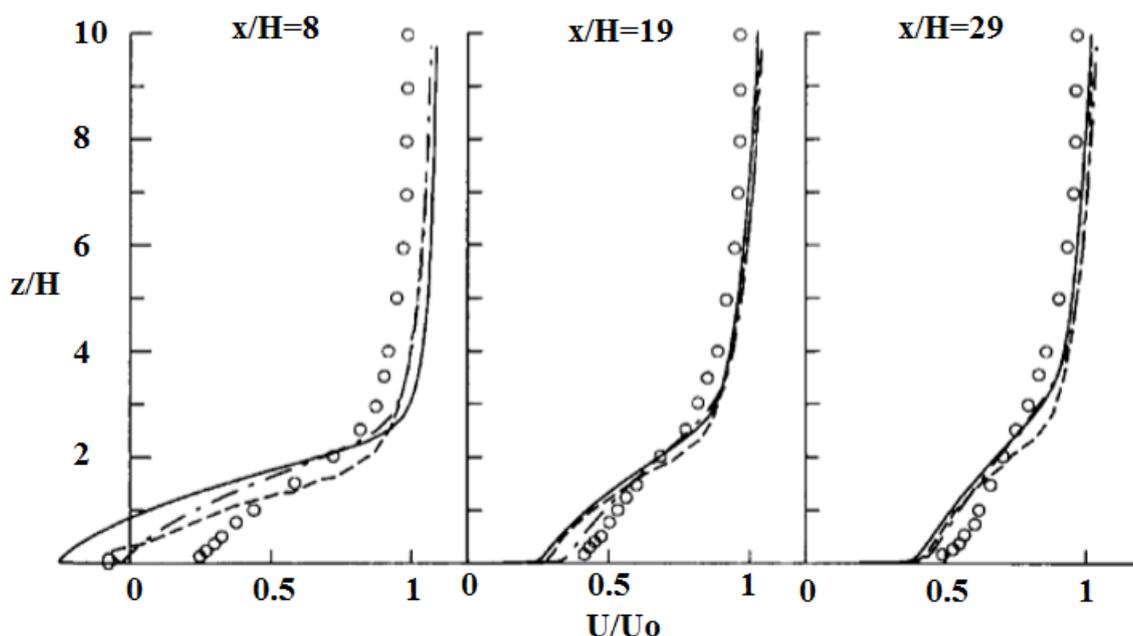


Рис. 3. Сравнение профилей продольной скорости.

Обтекания холма треугольной формы с препятствием. Высота холма равна $H=15\text{см}$, основание холма имела длину $B=19.25\text{см}$. Препятствие, высотой $h=20\text{см}$, располагалось на расстоянии $G=32\text{см}$ вверх по потоку от центра треугольного холма (см. рис 4). В расчетах использована $k - \varepsilon$ – RNG модель турбулентности. Пористость

препятствия была равна 50%. На рис. 5 показаны линии тока для случаев отсутствия (рис. 5а) и присутствия (рис. 5б) препятствия.

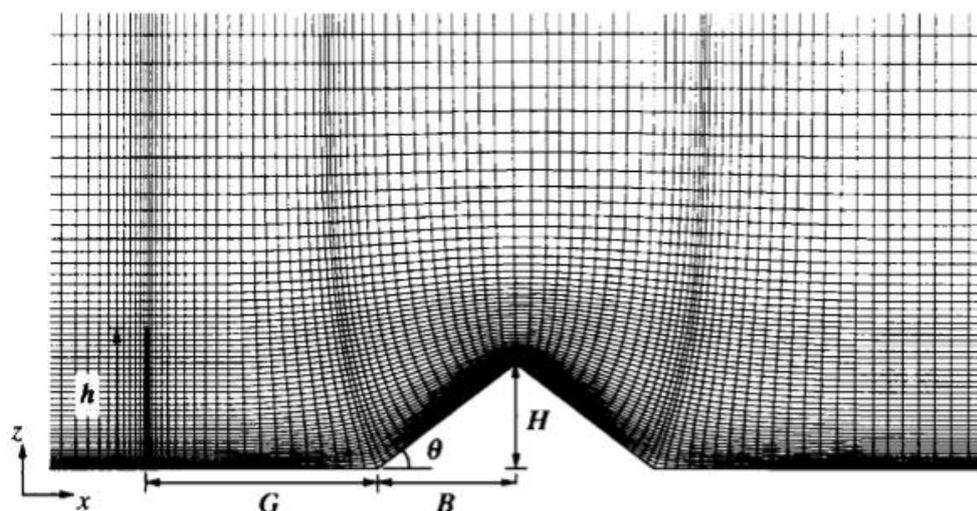


Рис. 4. Неравномерная сетка для обтекания холма треугольной формы.

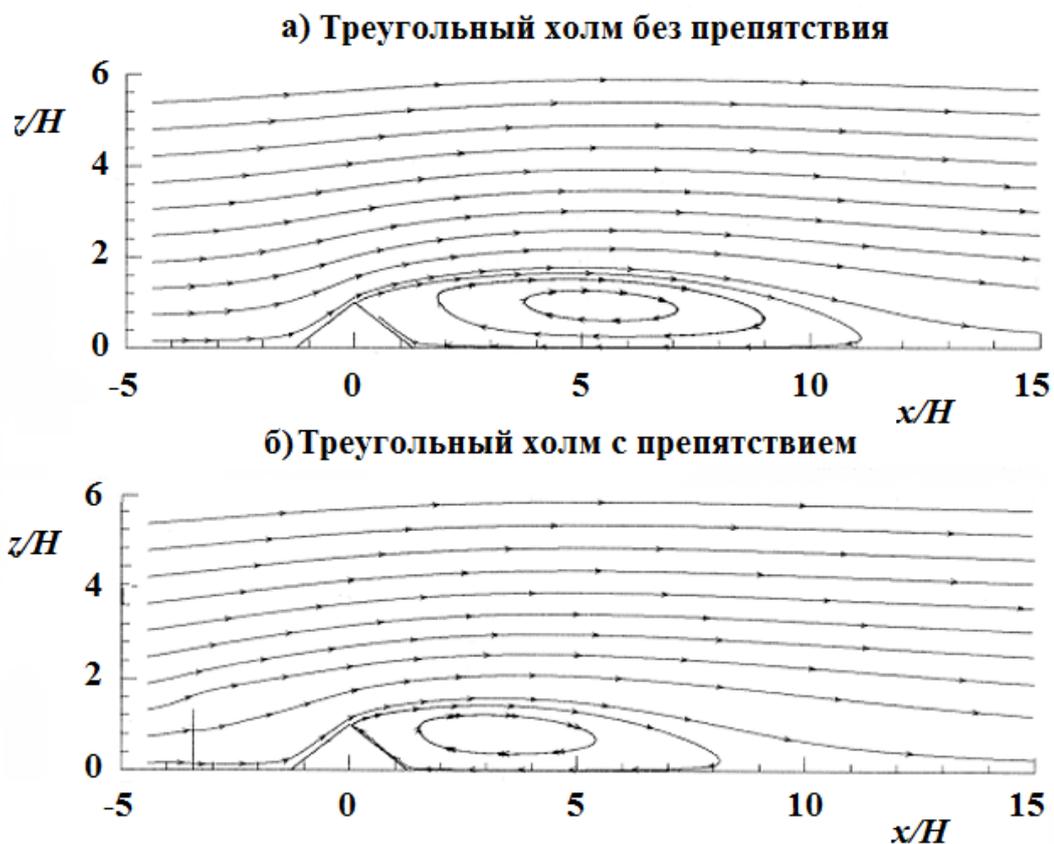


Рис. 5. Линии тока для случаев отсутствия (рис. 5а) и присутствия (рис. 5б) препятствия.

Из рис. 5аб видно, что координаты точки обратного присоединения потока при отсутствии и присутствия пористой преграды удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными работы [12] 11Н и 8Н. Видно, что наличие преграды приводит к уменьшению размеров зоны рециркуляции из-за торможения потока препятствием.

Выводы. В работе проведено исследование возможностей двухпараметрических моделей турбулентности при моделировании обтекания плоской пластины и двумерной модели местности. Математическую основу моделирования составляют осреднённые по Рейнольдсу стационарные уравнения Навье-Стокса. Численное решение основных уравнений проведено при помощи пакета OpenFOAM. Сравнение результатов численных расчетов с соответствующими экспериментальными данными позволяет сделать вывод о том, лучшее согласие по профилям скорости и размеру зоны обратных токов соответствует имплементированной в пакет OpenFoam k- ϵ - RNG модели турбулентности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hunt, J.C.R., Tampieri, F., Weng, W.S., Carruthers, D.J. Air flow and turbulence over complex terrain: a colloquium and a computational workshop, J. Fluid Mechanics 227, 1991, pp. 667-688, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112091000290>.
2. OpenFOAM v7 User Guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v7/> . (accessed 05.08.2021).
3. Курбаналиев А.Ы., Ойчуева Б.Р., Калмурзаева А.Т., Жайнаков А.Ж., Култаев Т.Ч. Критическое сравнение различных версий пакета OpenFOAM на задаче моделирования водослива // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26. № 2. С. 44-57.

4. A. I. Kurbanaliev, A. R. Maksutov, G. S. Obodoeva and B. R. Oichueva. Using OpenFOAM Multiphase Solver interFoam for Large Scale Modeling. Proceeding of The World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, USA, 22-24 October, 2019. Available at: <http://www.iaeng.org/publication/WCECS2019/>. (accessed 01.08.2021).
5. Курбаналиев А.И., Жайнаков А.Ж. Верификация открытого пакета OpenFOAM на задачах прорыва дамб. Теплофизика и аэромеханика / Институт теплофизики СО РАН, - Новосибирск, 2013. Т. 20, №4, с. 461-472.
6. Ferziger J. H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer Verlag, 2002, 423 p.
7. H. K. Versteeg, W. Malalasekera. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2nd edition, Pearson education Limited, England, 2007, 517p.
8. Brost, R. and Wyngaard, J. C. A Model Study of the Stably Stratified Planetary Boundary Layer, J. Atmos. Sciences, 1978, 36, pp. 1821–182.
9. Arya, S. and Shipman, M. An Experimental Investigation of Flow and Diffusion in the Disturbed Boundary Layer over a Ridge – I. Mean Flow and Turbulence Structure, Atmos. Environ, 1981, 15, pp. 1173–1184.
10. Mouzakis, F. N., Bergeles, G. C. Numerical Prediction of Turbulent Flow over a TwoDimensional Ridge, Int'l J. Numer. Meth. Fluids, 1991, 12, pp. 297–296
11. Jung, S. J. Application of the E– ϵ Turbulence Numerical Model to a Flow and Dispersion Around Triangular Ridge (I)', J. Korea Air Pollution Res. Assoc. 1994, 10, pp. 116–123.
12. Lee, S. J. and Park, C. W. Surface Pressure Variations on a Triangular Prism by Porous Fences in a Simulated Atmospheric Boundary Layer. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 1997, 73, pp. 45–58.