

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПАКЕТЕ OPENFOAM

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

*Институт горного дела и горных технологий им. У. И. Асаналиева  
Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова,  
Бишкек, Кыргызстан, jainakov-41@mail.ru*

*Кызыл-Кийский гуманитарно-педагогический институт Баткенского государственного  
университета, г. Кызыл-Кия, Кыргызстан, kurbanaliev@rambler.ru*

*Кызыл-Кийский гуманитарно-педагогический институт Баткенского государственного  
университета, г. Кызыл-Кия, Кыргызстан, Kaleeva79@mail.ru*

Во многих инженерных и практических задачах (обтекание автомобиля, движение турбины или крыла самолета) отрыв турбулентного потока играет существенную роль. Для моделирования такого класса течений в инженерных целях обычно применяются методы, основанные на усредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса. В данной работе рассматриваются 5 классических RANS-моделей турбулентности.

**Цель работы и постановка задачи.** Целью данной работы является оценка различных RANS-моделей турбулентности, основанные на линейной и нелинейной вихревой вязкости и имплементированных в пакет OpenFOAM[1]. В качестве тестовых задач выбраны две задачи. Первой задачей является стационарное турбулентного течения в трехмерном канале с внезапным расширением и небольшим конфузорным выходом, геометрия которого соответствует работе [2]. Вторая задача взята из надежных и информативных экспериментальных данных классической базы Европейского сообщества исследований течений, турбулентности и горения ERCOFTAC[3] и соответствует экспериментальной работе[4].

**Математическая модель.** В качестве исходных уравнений для описания стационарных турбулентных течений использовалась система осредненных по Рейнольдса уравнений Навье-Стокса, которая для несжимаемого течения при отсутствии массовых сил имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0; \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \rho \overline{u'_i u'_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

где  $\bar{u}_i$  – компоненты средней скорости,  $\rho$  – 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, связанный с молекулярной вязкостью  $\mu$ , а  $\overline{u'_i u'_j}$  – напряжения Рейнольдса, требующие моделирования. 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[5, 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.[6, 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 давлению заданы величины  $u=0$  м/с  $p=0$  Па. Как известно, для стационарного течения нет необходимости задания начальных условий. Однако определение начальных полей скорости и давления в пакете OpenFOAM является обязательным[1]. Кинетическая энергия турбулентности и скорость её диссипации имеют некоторые малые значения, которые обеспечивают хорошую сходимость численного решения на первых шагах интегрирования.

Считается, 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.

Граничные условия для  $\omega$  вычисляется по формуле:  $\omega = \varepsilon / k$ .

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[5, с. 276].

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  $\varepsilon = 10^{-4}$ .

#### Верификация пакета OpenFOAM

**Турбулентное течение в трехмерном канале с внезапным расширением и конфузурным выходом.** В качестве первой тестовой задачи рассматривается турбулентное течение в канале с внезапным расширением и конфузурным выходом, геометрия и принятая система координат которого показаны на рис. 1.

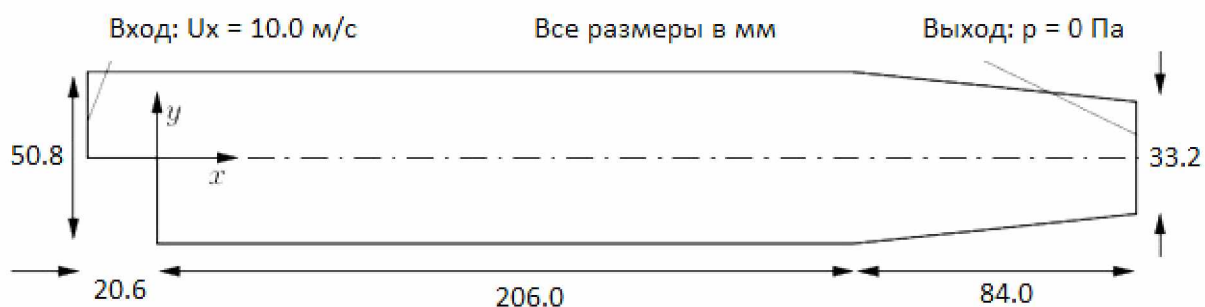


Рис. 1. Геометрия расчетной области

Приложение blockMesh пакета OpenFOAM использовано для создания расчетной сетки с соответствующим сгущением сетки около внезапного расширения и ближе к выходу из канала. Вся расчетная область разделена на 12225 гексаэдров. 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[6, с. 84].

В работе использовались три расчетные сетки с общим числом контрольных объемов 12225, 48900 и 195600. Методические расчеты, проведенные на трех различных сетках показывают слабую зависимость результатов от числа узлов. Ниже представленные результаты соответствуют третьей расчетной сетке

Список использованных RANS – моделей турбулентности приведен в табл. 1.

Таблица 1. Используемые RANS-модели турбулентности.

№	Модель турбулентности	Число итераций
1.	Классическая $k - \varepsilon$ - модель	4972
2.	$k - \omega$ - модель	3207
3.	$k - \omega - SST$ - модель	1210
4.	Нелинейная $k - \varepsilon$ - модель Shih	6744
5.	Realizable $k - \varepsilon$ - модель	8037
6.	$RNG$ - модель	2874

Результаты численных расчетов представлены на рис. 2. На этих рисунках хорошо видны характерные особенности рассматриваемого класса течений, а именно, образование рециркуляционной возвратной зоны за внезапным расширением и сужение потока ближе к выходу из канала. Все использованные модели турбулентности в той или иной мере воспроизводит зону обратных токов.

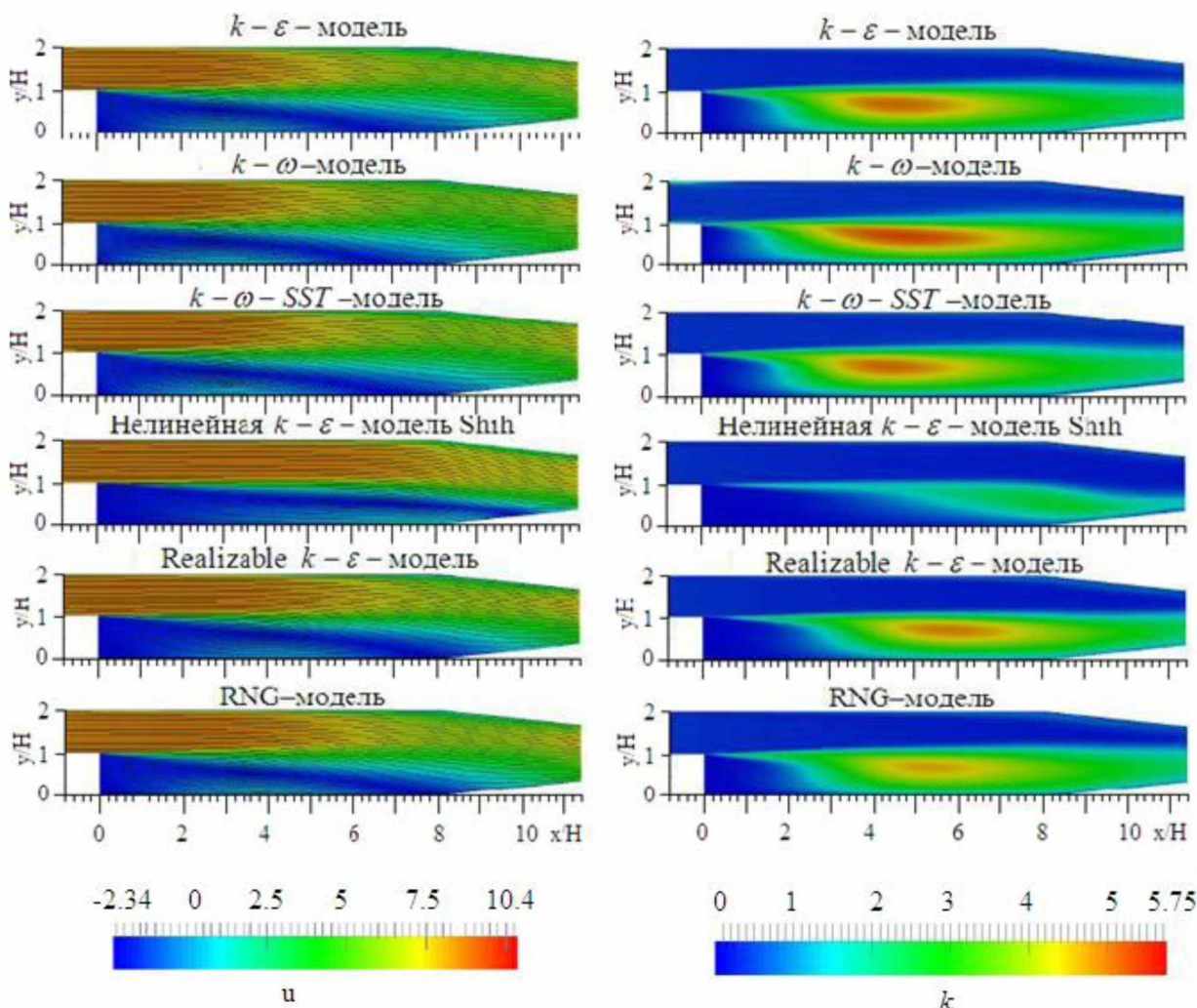


Рис. 2. Линии тока и изоповерхности продольной скорости  $u$  (слева) и изоповерхность  $k$  (справа)

Численные результаты по определению центра рециркуляционной зоны можно объединить в три группы. Как и следовало ожидать центр рециркуляционной зоны для первых трех моделей ( $k - \varepsilon$  - модель,  $k - \omega$  - модель,  $k - \omega - SST$  - модель) составляет примерно одинаковую величину. А для  $RNG$  и Realizable  $k - \varepsilon$  - моделей центр рециркуляционной зоны расположен в сечении  $x/H \approx 3,5 - 3,9$ . Самый низкий вниз по течению центр зоны соответствует нелинейной  $k - \varepsilon$  - модели Shih (см. табл. 2).

Таблица 2. Результаты численных расчетов

№	Модель турбулентности	Центр зоны		Длина присоединения $x/H$	$\max k/u_0^2$
		$x/H$	$y/H$		
1.	Классическая $k-\varepsilon$ – модель	$\approx 2,9$	$\approx 0,55$	$\approx 6,7$	0,0575
2.	$k-\omega$ – модель	$\approx 2,7$	$\approx 0,55$	$\approx 7,2$	0,1140
3.	$k-\omega-SST$ – модель	$\approx 2,9$	$\approx 0,55$	$\approx 7,9$	0,0496
4.	Нелинейная $k-\varepsilon$ – модель Shih	$\approx 6,8$	$\approx 0,57$	$\approx 9,5$	0,0277
5.	Realizable $k-\varepsilon$ – модель	$\approx 3,9$	$\approx 0,58$	$\approx 8,3$	0,0482
6.	$RNG$ – модель	$\approx 3,5$	$\approx 0,55$	$\approx 7,3$	0,0558

Моделирование течения вязкой жидкости в канале с обращенным назад наклонным уступом. Конфигурация следующей тестовой задачи соответствует экспериментальным данным работы [4] и без сохранения геометрической пропорции приведена на рис. 3.

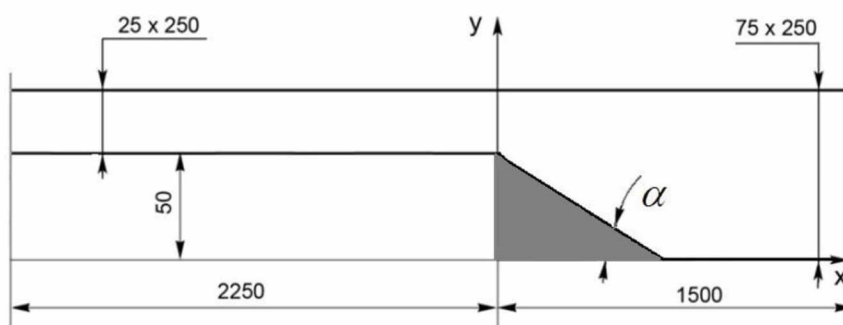


Рис.3. Канал с наклонным уступом. Все размеры указаны в мм.

Стационарный турбулентный поток несжимаемой жидкости поступает слева в прямоугольную входную часть канала с поперечным сечением 25x250мм и длиной 2250мм. Высота уступа была равна  $H=50$ мм, а степень расширения канала  $Er=5$ . В расчетах наклон уступа изменялся от 150 до 900. Большое отношение ширины входной части к её высоте обеспечивает двухмерность течения в центральной части канала с приемлемой точностью, а длина входной части является достаточной для получения развитого турбулентного течения в плоскости начала наклонного уступа. Число Рейнольдса  $Re$ , рассчитанное через высоту уступа равнялось величине 73000.

На рис. 4 и рис. 5 представлены поперечные профили вектора скорости и продольной интенсивности турбулентности в различных сечениях вниз по потоку. Скорость разделена на величину  $U_0=22,85$  м/с, а продольная координата  $y$  представлена в единицах  $H$ . Сплошная линия соответствует численным результатам данной работы и маркер представляют экспериментальные данные работы [4].

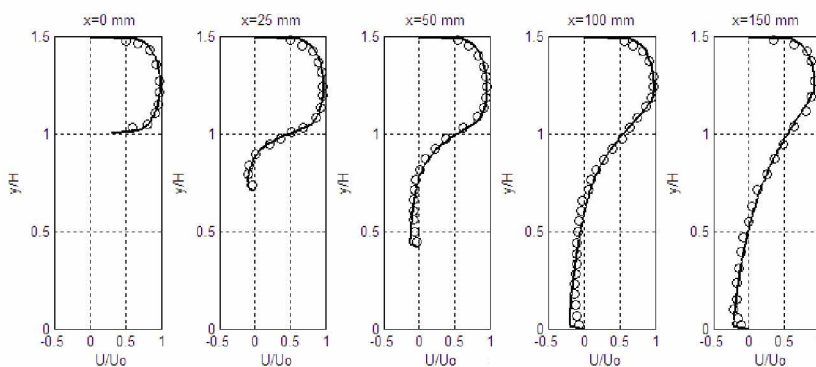


Рис. 4. Изменение безразмерной продольной скорости в различных сечениях

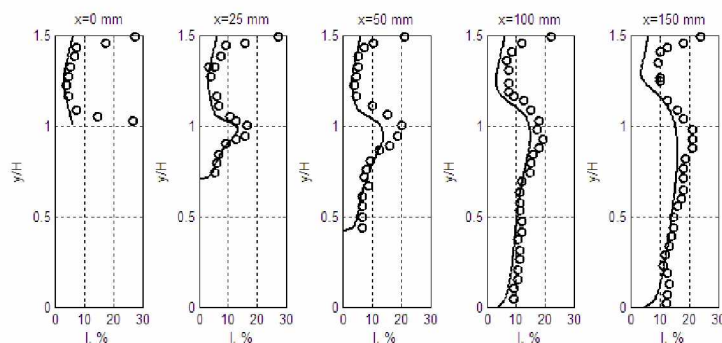


Рис. 5. Изменение интенсивности турбулентности в различных сечениях

В целом соответствие между численными результатами и опытными данными по профилям средней скорости вполне удовлетворительное. Имеет место незначительное отличие между ними около нижней стенки в сечениях  $x = 100$  мм и  $x = 150$  мм от плоскости уступа. Максимум продольной интенсивности турбулентности расположен во внешнем слое рециркуляционной зоны, на расстоянии порядка  $y/H \approx 1$ .

В итоге, по результатам проведенных численных результатов использованные RANS-модели турбулентности разделены на три группы. Эти три группы дают существенные разные результаты по определению центра зоны обратных токов и длины присоединения турбулентного потока.

#### Литература

1. <http://www.openfoam.org/docs/>. OpenFOAM 2.3. User Guide.
2. Pitz, R.W., Daily, J.W. Combustion in a turbulent mixing layer formed at a rearward-facing step. AIAA Journal, v. 21(11), – 1983, pp. 1565–1570.
3. <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/index.html>.
4. Ruck B., Makiola B. The Flow over the Inclined Step, Notes on Numerical Fluid Mechanics, (Hrsg. Gersten), Vieweg-Verlag, v. 40, – 1993. – pp. 47–55. Available at [http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/science/aerodyn/bilder\\_organale/papers/Ruck\\_Makiola\\_1993.pdf](http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/science/aerodyn/bilder_organale/papers/Ruck_Makiola_1993.pdf).
5. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Edinburg: Pearson Education Limited. –2007. –517p.
6. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с. англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.

УДК 004.94:519.119

#### ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

*Р.А. Молдошев, Ч.Э. Абдылдаев, А. Мукамбедшаева, Э.К. Абдылдаев*

#### APPLIED BUSINESS SIMULATION

*R.A. Moldoshev, CH.E. Abdylдав A. Mukambedshaeva, E.K. Abdylдав*

*В работе рассматриваются некоторые вопросы построения моделей и дискретизации области массива на МКЭ*

*This paper discusses some issues of building models and field sampling array FEM*

На современном этапе при решении прикладных задач информационная технология является наиболее важной составляющей процесса использования информационных систем и ресурсов общества. К настоящему времени она прошла несколько эволюционных этапов, смена которых определялась главным образом развитием научно-технического прогресса, появлением новых технических средств переработки информации. Следует отметить, что информационная технология тесно связана с информационными системами, которые являются для нее основной средой. Информационная технология является процессом, состоящим из четко регламентированных правил выполнения операций, действий, этапов разной степени сложности над данными, хранящимися в компьютерах. Основная цель информационной технологии - в результате целенаправленных действий по переработке первичной информации получить необходимую для пользователя информацию. Информационная система является средой, составляющими элементами которой являются компьютеры, компьютерные сети, программные продукты, базы данных, люди, различного рода технические и

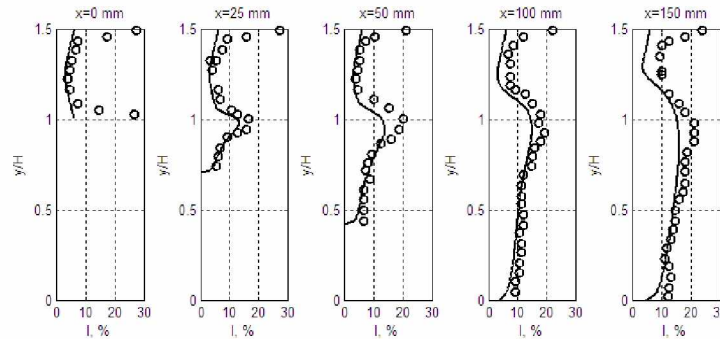


Рис. 5. Изменение интенсивности турбулентности в различных сечениях

В целом соответствие между численными результатами и опытными данными по профилям средней скорости вполне удовлетворительное. Имеет место незначительное отличие между ними около нижней стенки в сечениях  $x = 100$  мм и  $x = 150$  мм от плоскости уступа. Максимум продольной интенсивности турбулентности расположен во внешнем слое рециркуляционной зоны, на расстоянии порядка  $y/H \approx 1$ .

В итоге, по результатам проведенных численных результатов использованные RANS-модели турбулентности разделены на три группы. Эти три группы дают существенные разные результаты по определению центра зоны обратных токов и длины присоединения турбулентного потока.

### Литература

1. <http://www.openfoam.org/docs/>. OpenFOAM 2.3. User Guide.
2. Pitz, R.W., Daily, J.W. Combustion in a turbulent mixing layer formed at a rearward-facing step. AIAA Journal, v. 21(11), – 1983, pp. 1565–1570.
3. <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercofac/index.html>.
4. Ruck B., Makiola B. The Flow over the Inclined Step, Notes on Numerical Fluid Mechanics, (Hrsg. Gersten), Vieweg-Verlag, v. 40, – 1993. – pp. 47–55. Available at [http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/science/aerodyn/bilder\\_organale/papers/Ruck\\_Makiola\\_1993.pdf](http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/science/aerodyn/bilder_organale/papers/Ruck_Makiola_1993.pdf).
5. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Edinburg: Pearson Education Limited. –2007. –517p.
6. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с. англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.