

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ

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

*Институт горного дела и горных технологий им. У. И. Асаналиева Кыргызского государственного  
технического университета им. И. Разакова, Бишкек, Кыргызстан,  
Кызыл-Кийский гуманитарно-педагогический институт Баткенского государственного университета, г.  
Кызыл-Кыя, Кыргызстан*

*В работе рассматриваются возможности RANSмоделей турбулентности для моделирования отрывных течений при обтекании тел различных форм. Результаты численных расчетов, проведенные с помощью пакета OpenFOAM, сравниваются с доступными в открытой литературе экспериментальными данными.*

*In this paper we consider the possibility of RANSmodel turbulence for modeling separated flows around bodies with different shapes. The results of numerical calculations performed using the package OpenFOAM, compared with the available in the open literature experimental data.*

**Введение.** Множество явлений природы, а также проблемы гидравлики, акустики, физиологии кровообращения, организации химико-технологических процессов в силу малости характерных скоростей можно моделировать на базе модели несжимаемой вязкой жидкости, описываемой уравнениями Навье-Стокса. Отрывные течения - одно из самых значимых явлений, наблюдаемых при вязком обтекании тел различных форм. Из-за имеющейся в среде вязкости кинетическая энергия потока около тела частично рассеивается так, что частицы жидкости не могут больше полностью противостоять существующему положительному градиенту давления и поток отрывается в поперечном направлении. Следовательно, в случае молекулярной природы механизма отрыва, отрыв потока происходит под действием положительного градиента давления и под влиянием ламинарных или турбулентных вязких напряжений. Таким образом, наличие вязкого

трения приводит как к появлению сопротивления трения около обтекаемого тела, так и к возникновению локальных вращений в поле течения. Изменение пространственной структуры течения оказывает обратное действие на сам отрыв, которое проявляется в изменении подъемной силы и сопротивления тела. Поэтому исследование отрывных течений, с одной стороны, имеет большое практическое значение, а, с другой стороны, важно для понимания основных проблем физики течения. При обтекании реальных пространственных тел, как правило, возникают трехмерные и нестационарные формы отрыва, изучение которых и представляет существенный интерес. Учитывая высокую стоимость лабораторных экспериментов, множество дополнительных осложняющих исследование факторов, влияющих на конфигурацию течения (неоднородность набегающего потока, шероховатость поверхности и т. д.), а также продолжающиеся положительные

тенденции в развитии многопроцессорной вычислительной техники (повышение производительности и увеличение памяти) позволяют надеяться на расширение и углубление наших знаний об отрывных течениях получаемых путем численного моделирования на основе полных уравнений гидродинамики.

В данной работе приведены результаты численного моделирования некоторых задач вычислительной гидродинамики с помощью открытого пакета OpenFOAM 2.3[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 методом контрольного объема.

Для учета влияния турбулентных пульсаций используются RANS модели турбулентности со своими известными ограничениями. В данное время, конечно, существуют более совершенные модели турбулентности, например LES, DES или DNS, но они требуют значительных вычислительных затрат. Поэтому использование двухпараметрических RANS моделей является наиболее предпочтительным. Численное моделирование основано на стационарных трехмерных усредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса. Проведено сравнение численных результатов с имеющимися надежными экспериментальными данными классической базы Европейского сообщества исследований течений, турбулентности и горения ERCOFTAC[2] и CEDVAL[3] университета Гамбург, Германия.

**Математическая модель.** Стационарное турбулентное течение несжимаемой жидкости описывается следующими усредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0,$$

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right). \text{ Здесь } u_i$$

и  $u_i'$  – средняя и флуктуационная скорости в направлении оси  $x_i$  соответственно,  $p$  – кинематическое давление,  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, 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[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. Дифференциальные уравнения 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 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. На выходе из канала продольные градиенты всех искомых 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[4, 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  $\varepsilon = 10^{-4}$ .

**Первой тестовой задачей** является моделирование обтекания куба, расположенного в

центре трехмерного канала[2, case 41, 3, case A1-4].

Численное моделирование аэродинамических характеристик различных зданий и сооружений является достаточно трудоемкой задачей из-за сложной геометрической формы, а также из-за сложного нестационарного течения, образующегося в результате их обтекания. Наличие розы ветров предполагает выполнение не единичного, а целого ряда расчетов. Интерференция же спектра различных вихревых структур и масштабов между различными объектами еще более усложняет поставленную задачу. Поэтому точное моделирование предполагает использование эффективного, хорошо апробированного и

верифицированного математического аппарата с использованием вычислительных машин.

Модель здания является куб, смонтированный в центр нижней стенки канала с размером  $390 \times 60 \times 5$  см. Куб с линейным размером  $H = 2,5$  см расположен на расстоянии  $52H$  от входа канала, что обеспечивает развитое турбулентное течение в сечении  $x = -5H$  вверх по потоку от препятствия. Число Рейнольдса, рассчитанное через высоту куба равно  $8 \cdot 10^4$ . Принятая система координат и граничные условия показаны на рис. 1. Начало координат расположено в центре нижней грани подветренной стороны куба.

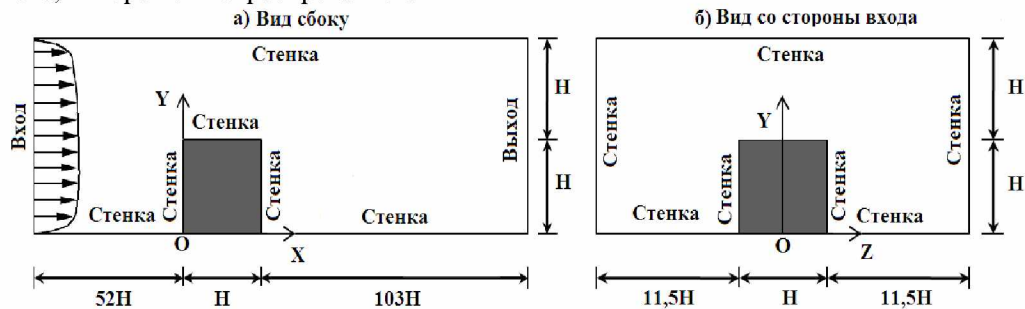


Рис. 1. Геометрия задачи и граничные условия.

Сравнение результатов численных данных с соответствующими экспериментальными данными в сечении  $x/H = 2$  приведено на рис. 2, где маркеры соответствуют экспериментальным данным ERCOFTAC[2, case 41], а сплошная линия представляет численные данные этой работы. Величины продольной (рис. 2а) и поперечной (рис. 2б) представлены в единицах средней входной скорости  $u_0$ . Соответствие между

расчетом и экспериментом следует признать удовлетворительным.

На рис. 3 приведены линии тока. Видно, что численный расчет с приемлемой точностью воспроизводит три основные зоны обратных токов – перед кубом, за ним и над ним. Однако имеются некоторые отличия между численными и экспериментальными данными по длине рециркуляционных зон: размер зоны перед кубом занижен, а за кубом наоборот завышен.

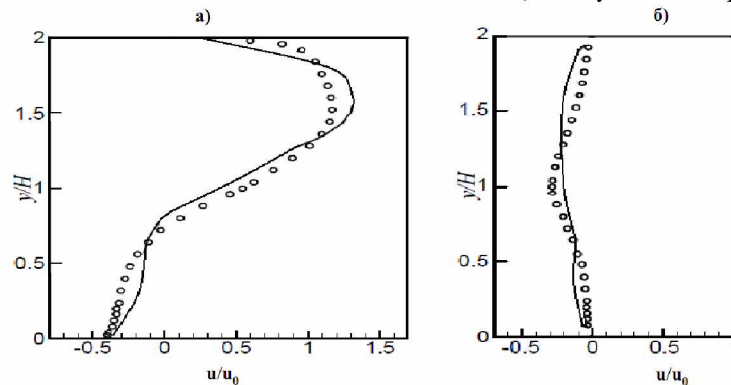


Рис. 2. Поперечные профили скорости.

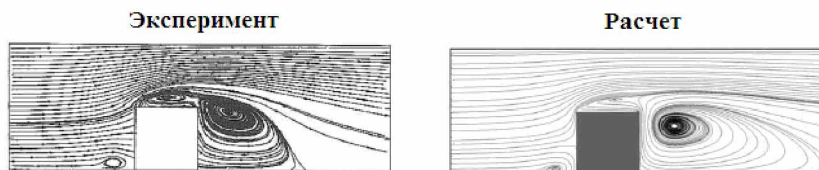


Рис. 3. Линии тока продольной скорости.

Следующей задачей является обтекание симметричного

выступа ERCOFTAC[2, case 42, 7]. Наличие термической неоднородной подстилающей

поверхности приводит к появлению ряда особенностей движения воздуха и распространения загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. Скорость ветра вблизи поверхности Земли в некоторых случаях становится чрезвычайно большой, что может

привести к нарушению хозяйственной деятельности. Возникают области, в которых концентрация загрязняющих веществ гораздо больше, чем над горизонтальной, термически однородной подстилающей поверхностью.

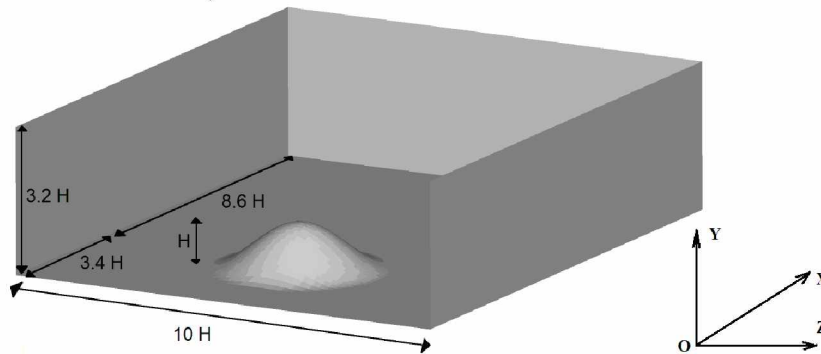


Рис. 4. Конфигурация холма и система координат.

Модель рассматриваемого холма представлена на рис. 4. Начало систем координат расположено в наивысшей точке холма. Высота холма была равна  $H=0,078\text{ м}$ , а максимальная скорость набегающего потока составляла величину  $u_0 = 27,5 \text{ м/с}$ . Целью этой задачи является тестирование различных RANS-моделей

турбулентности при моделировании обтекания модели реальной местности со сложной топографией. На рис. 5 представлено сравнение численных данных с работой [7]. Характер изменения численных данных в целом совпадает с характером изменения экспериментальных данных.

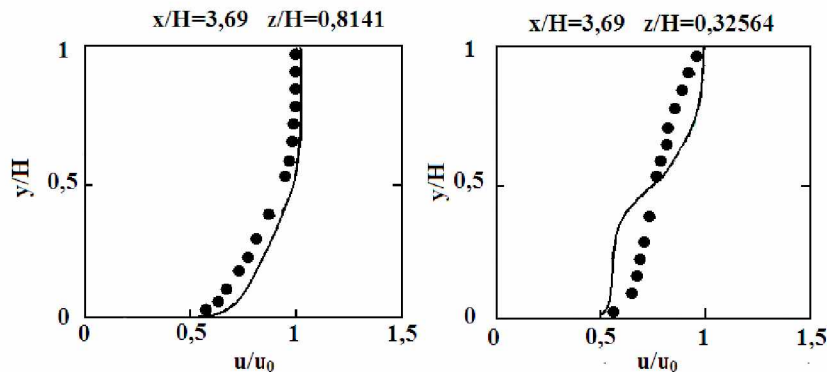


Рис. 5. Профили продольной скорости. Маркеры – эксперимент [7], сплошная линия – расчет.

**Заключение.** Таким образом, при решении задач моделирования трехмерных отрывных течений с успехом может быть использован открытый пакет программ OpenFOAM, распространяемый на условиях лицензии GNU GPL. Данный пакет позволяет проводить эффективные расчеты рассмотренных задач вычислительной гидродинамики с приемлемой точностью за разумное время.

#### Литература:

1. <http://www.openfoam.org/OpenFOAM> 2.3. UserGuide.
2. <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/>

3. <http://www.mi.uni-hamburg.de/Data-Sets.432.0.html>

4. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics // Edinburg: Pearson Education Limited, 2007. 517p.

5. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с. англ. –М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.

6. Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics // Springer Verlag, 2002. 423 p.

7. Byun G., Simpson R. L. Structures of three-dimensional separated flow on an axisymmetric bump. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 23, 2005. Paper No.2005-0113.