

**АБДИМУТАЛИПОВА З. К.**¹Ошский государственный университет, Ош, Кыргызская Республика**ABDIMUTALIPOVA Z. K.**¹Osh State University, Osh, Kyrgyz Republic
1986zeinura@gmail.com**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ****NUMTRICAL MODELLING OF THE JET FLOW**

Бул иште тегиз турбуленттүү струя үч өлчөмдүү эсептөө моделин колдонуу менен сандык түрдө моделдештирилет. Моделдештирилген струя эркин бетинин жана катуу чектердин струяга тийгизген таасири жокко чыгарылат. Турбуленттик схемалардын тууралыгы орточо ылдамдыктын ажыроосун, струянын өсүү ылдамдыгын, узунунан жана вертикалдуу ылдамдыктарынын профилдеринин окшоштугун анализдөө менен бааланат. Турбуленттик струянын эки схемасынын жыйынтыктары алардын тууралыгын аныктоо үчүн эксперименттик жана теориялык изилдөөлөр менен салыштырылат.

Өзөк сөздөр: компьютердик моделдөө, турбуленттик струя, $k-\epsilon$ турбуленттик схемалар, Навье-Стокс теңдемелери, OpenFOAM.

В данной работе плоские турбулентные струи моделируются численно с использованием трехмерной вычислительной модели. Моделируемые струи влияние свободной поверхности и твердых границ на струи исключено. Точность турбулентных схем оценивается путем анализа спада средней скорости, скорости роста струи, сходства профилей продольной и вертикальной скорости. Результаты двух схем турбулентного закрытия сравниваются с экспериментальными и теоретическими исследованиями для определения их точности.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, турбулентные струи, $k-\epsilon$ турбулентные схемы, уравнения Навье-Стокса, OpenFOAM.

In this work, plane turbulent jets are simulated numerically using a three-dimensional computational model. The simulated jets exclude the influence of the free surface and solid boundaries on the jets. The accuracy of turbulent schemes is assessed by analyzing the decay of the average velocity, the rate of growth of the jet, and the similarity of the profiles of the longitudinal and vertical velocities. The results of the two turbulent closure schemes are compared with experimental and theoretical studies to determine their accuracy.

Key words: computer modeling, turbulent jets, $k-\epsilon$ turbulent schemes, Navier-Stokes equations, OpenFOAM.

Введение. В настоящее время в связи с ростом возможностей вычислительной техники для решения различных задач вычислительной гидродинамики широко используются пакеты вычислительных программ. Это обусловлено, с одной стороны, развитием вычислительных методов и моделей, позволяющих достаточно точно и правдоподобно предсказывать реальные течения.

Также за последнее десятилетие можно было наблюдать скачок в развитии вычислительной техники, что сейчас позволяет получить доступ к суперкомпьютерам довольно большой мощности. Таким образом, новым более дешевым,

рациональным и эффективным инструментом для исследования турбулентных течений. решением задач авиационной промышленности становится метод математического моделирования. Для расчетов турбулентных течений в инженерных приложениях чаще всего используется метод осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) с замыканием с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности.

Численное моделирование проводилось путем решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с использованием OpenFOAM. В данной работе для решения задач выбран пакет OpenFOAM [1], в силу того, что он работает под открытой операционной системы Linux. Существуют ряд работ по применению этого пакета программ [2-4].

Турбулентные струи являются основным средством, с помощью которого отходы выбрасываются в окружающую среду. Характеристики струи в этих условиях зависят от геометрии отверстия, характеристик выпускаемой и окружающей жидкости, а также от физической среды, в которую выпускается струя. В большинстве случаев струя взаимодействует с твердыми границами и / или свободной поверхностью, для которых аналитические или эмпирические решения могут быть недоступны. В таких случаях используются исследования либо физической модели, либо численной модели. В последние годы, численные модели все чаще используются для изучения сложных видов течения.

Целью исследования является оценка точности схем турбулентного закрытия, используемых в трехмерных моделях. В частности, оцениваются стандартные $k-\varepsilon$ и ренормализованные групповые и ренормализованные групповые схемы со стандартными коэффициентами. Получение новых экспериментальных данных по турбулентной структуре плоские струи с помощью OpenFOAM

Физическая модель. Геометрия рассматриваемой задачи приведена на рис.1.

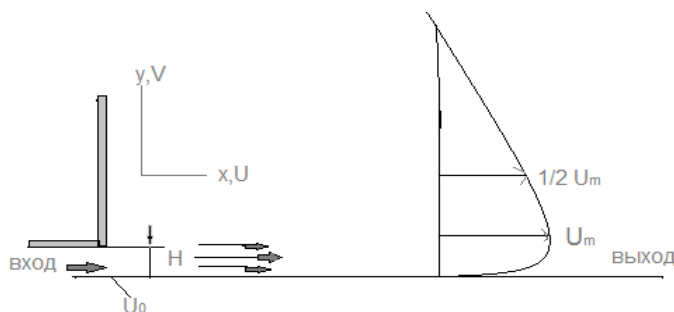


Рис.1. Схематическое изображение свободных турбулентных струй

Для плоской турбулентной струи $2b_0$ представляет собой ширину сопла; d - диаметр сопла для круговой турбулентной струи. Начальная равномерная скорость струи, выходящей из сопла, равна U_0 . Эта скорость определяется как

$$U_0 = \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

где Δh - разница в высоте между входными и выходными свободными поверхностями. Используя воду приблизительно комнатной температуры, можно получить номинальное число Рейнольдса Re_0 на входе.

$$Re_0 = \frac{U_0 H}{\nu} \approx 9.6 \cdot 10^3 \quad (2)$$

Средняя скорость расстояние вдоль струй определяется как U_m . Скорость изменяется от значения средней линии U_m до нуля на краю струи.

Однородная скорость 200 см/с была приложена к соплу для двух струй. На границах резервуара нормальная и тангенциальная составляющие скорости были обнулены.



На участке истечения было применено непрерывное граничное условие, которое обнуляло нормальные производные всех переменных на границе. У стены предполагалась гладкая граница, задавая нулевую высоту шероховатости.

Однако сетки для круговой турбулентной и плоской турбулентной струи различались, чтобы надлежащим образом улавливать геометрию сопла. Результатами вычислений в центре каждой ячейки были компоненты скорости в направлениях x , y и z , давление, турбулентная кинетическая энергия на единицу массы и скорость турбулентной диссипации.

Математическая модель. Обычно для определения математической модели турбулентной пристенной струи используются осреднённые уравнения Навье-Стокса, который в тензорных обозначениях принимают следующий вид [2-5]:

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \rho \overline{u'_i u'_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

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

где $\bar{u}_i$ – составляющие средней скорости, ρ – плотность, $\bar{p}$ – среднее давление, $\bar{\tau}_{ij}$ – тензор вязких напряжений, μ – молекулярная вязкости, $\overline{u'_i u'_j}$ – неизвестные напряжения Рейнольдса.

Модель k - ε состоит из следующих двух уравнений для определения k и ε :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

Граничные условия. На неподвижных твёрдых стенках расчётной области задано условие прилипания, что определяет равенство нулю всех компонентов вектора скорости. Расчет производится в прямоугольной области, размером $L_x = L = 5$ м и $L_y = 1$ м (Рис. 1). На входной границе задается однородный профиль скорости $U_0 = 10$ м/с, $U = 0$ м/с и значения характеристик турбулентности, соответствующие отношению турбулентной и молекулярной вязкости $\nu_t/\nu = 0.2$ и интенсивности турбулентности $Tu = 1\%$. На стенке (нижняя граница) задается условие прилипания, а на свободной верхней границе – условие симметрии. Наконец, на выходной границе задается постоянный уровень относительного давления (редуцированного) $p = 0$.

Дискретизация расчётной области выполняется методом контрольных объёмов [5, 10]. Основная идея этого метода состоит в том, что вся расчётная область разбивается на ячейки гексаэдральной формы с последующей заменой дифференциальных уравнений алгебраическими, представляющими собой интегральные балансовые соотношения для каждой ячейки.

Для вычисления интегралов по контрольному объёму использовался метод Гаусса, а соответствующие значения величин на гранях контрольного объёма вычислялись из



значений в центрах соседних ячеек путём применения тех или иных интерполяционных схем

Результаты и обсуждение. Для плоской струи скорость роста, затухание продольной скорости осевой линии, продольный и вертикальный профили скорости поперек струи сравниваются с экспериментальными данными и принятыми эмпирическими уравнениями.

Для визуализации результатов численного моделирования использовался пакет Paraview 5.6, входящий в состав OpenFOAM 7.0. Ниже на рис.2 представлены результаты измерений поле вектора скорости U в разные моменты времени t .

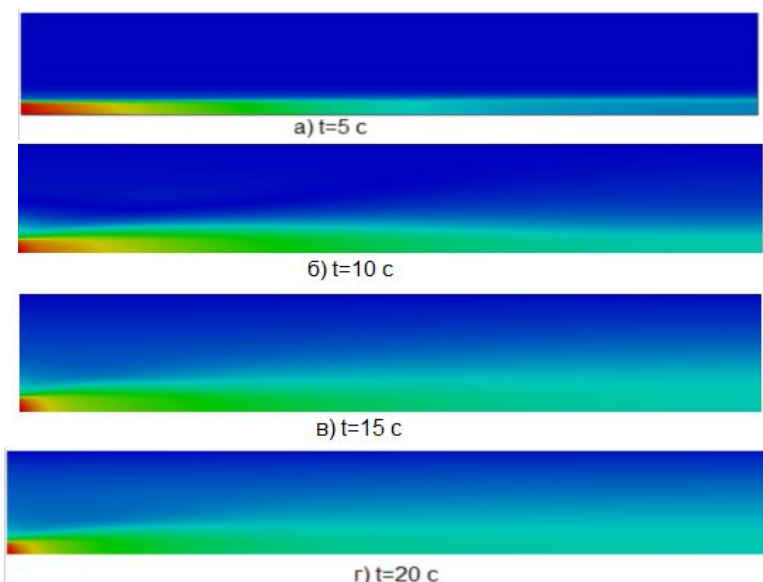


Рис. 2. Поле вектора скорости в разные моменты времени

Закключение. Дискретизация расчетной области и систем уравнений Навье-Стокса в OpenFOAM проводится методом контрольных объемов. Рассмотрены некоторые задачи моделирования в рамках открытого пакета OpenFOAM.

В частности, скорость роста, уменьшение продольной скорости осевой линии, сходство профилей продольной и вертикальной скорости в разных точках вдоль струи сравниваются с имеющимися экспериментальными данными и теоретическим анализом. Из результатов моделирования идеальных плоских турбулентных струй ясно, что схема турбулентного замыкания k- ϵ стандартными коэффициентами, хотя и проще, может использоваться для эффективного прогнозирования характеристик плоских турбулентных струй.

Расчетная модель со схемой k- ϵ применяется для расчета геометрии выхода ливневого стока на мелководье. Считается, что различные типы водосбросных сооружений минимизируют зону высокой скорости, которая считается вредной для рекреационного плавания, и наиболее практичной альтернативой считается коробчатая водопропускная труба.

Список литературы

1. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v7/>. OpenFOAM 7.0 User's Guide. Access data 05.05.2021.
2. Курбаналиев А.Ы. Критическое сравнение различных версий пакета OpenFOAM на задаче моделирования водослива [Текст] / А.Ы. Курбаналиев, Б.Р.Ойчуева, А.Т.Калмурзаева, А.Ж.Жайнаков, Т.Ч.Култаев // Вычислительные технологии. - 2021. - Т. 26. - № 2. - С. 44-57.



3. A. I. Kurbanaliev, A. R. Maksutov, G. S. Obodoeva and B. R. Oichueva. Use of 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).

4. Курбаналиев А.И. Верификация открытого пакета OpenFOAM на задачах прорыва дамб [Текст] / А.И.Курбаналиев, А.Ж. Жайнаков // Теплофизика и аэромеханика / Институт теплофизики СО РАН. – Новосибирск: 2013. - Т. 20. - №4. - с. 461-472.

5. Ferziger J. H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer Verlag, 2002. –423p.

6. Абрамович Г.Н. *Теория турбулентных струй* [Текст] / Г.Н. Абрамович. - М.: Наука, 1984. – 716 с.

7. Rodriguez JF, Bombardelli FA, Garcia MH, Frothingham KM, Thoads BL, Abad JD (2003). High-resolution Numerical Simulation of Flow Through a Highly Sinuous River Reach. *Water Resources Management* 18:177–199.

8. Ландау Л. Д. Гидродинамика [Текст] / Л.Д.Ландау, Е.М. Лифшиц. - М.: Наука, 1986. – 736 с.

9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г.Лойцянский. - М.: Дрофа, 840 с.

10. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст]: Пер. с. англ. / С.В.Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.