

Урманбетов Р.Дж., Дыйканова А.Т., Турганбаева А.Б.

**ЦИЛИНДРДИ АЙЛАНЫП ӨТҮҮЧҮ ИЛЭЭШКЕН АГЫМДЫ
САНДЫК МОДЕЛДЕШТИРҮҮ**

Урманбетов Р.Дж., Дыйканова А.Т., Турганбаева А.Б.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА
ВЯЗКИМ ПОТОКОМ**

R.Zh. Urmanbetov, A.T. Dyikanova, A.B. Turganbaeva

NUMERICAL MODELING OF VISCOUS FLOW OVER A CYLINDER

УДК: 532.546

Бул иште цилиндр формасындагы нерсенин айлана-сыйндагы агымды математикалык моделдештирүүнүн жыйынтыктары берилген. Моделдештирүү Рейнольд ыкмасы менен ортолуктулган стационардык үч өлчөмдүү Навье-Стоксун теңдемелерине негизделген. Агымдын орточо мүнөздөмөлөрүнө турбуленттүүлүктүн тийгизген таасирин эске алуу үчүн турбуленттүүлүктүн RANS моделдери колдонулду. Сандык эсептөөлөр OpenFOAM ачык пакетинин жардамында жүргүзүлдү.

Негизги сөздөр: цилиндр, Навье-Стоксун теңдемелери, үч өлчөмдүү моделдештирүү, RANS моделдер, контролдук көлөмдөр ыкмасы, OpenFOAM.

В работе представлены результаты математического моделирования обтекания тела цилиндрической формы. Моделирование основано на усредненных по Рейнольдсу стационарных трехмерных уравнениях Навье-Стокса. Для учета влияния турбулентных пульсаций на средние характеристики поля течения использовались двухпараметрические RANS модели турбулентности. Численные расчеты проводились с использованием открытого пакета OpenFOAM.

Ключевые слова: цилиндр, трехмерное моделирование, уравнения Навье-Стокса, RANS модели, метод контрольных объемов, OpenFOAM

The results of numerical modeling of viscous flow over the cylinder were presents in this paper. The modeling was based on Reynolds averaged stationary three-dimensional Navier-Stocks equations. RANS models of turbulence were used for taking into account the influence of turbulent pulsations for mean flow characteristics. Calculations were carried out by using open package OpenFOAM.

Key words: cylinder, three dimensional modeling, Navier-Stocks equations, RANS models, control volume method, OpenFOAM.

Введение. Характерным явлением при обтекании пространственных тел разных форм является отрыв потока из-за наличия вязкости жидкости. Поэтому в силу вязкости потока вблизи тела частично происходит уменьшение кинетической энергии течения. При этом поток жидкости не может противостоять наличию положительного градиента давления, и имеет место отрыв потока в перпендикулярном направлении под действием ламинарных и турбулентных вязких напряжений. Следовательно, из-за вязкого трения вблизи обтекаемого тела возникает сопротивление трения, что в свою очередь приводит к вихрям поля течения. А это в свою очередь приводит к обратному действию на процесс отрыва, что, в

конечном счете, сводится к изменению подъемной силы и сопротивления тела. Следовательно, изучение пространственных течений с отрывом потока имеет большое значение с практической точки зрения и является важным элементом для понимания физической природы отрывных течений. При этом следует учитывать то обстоятельство, что обтекание трехмерных тел, сопровождается образованием трехмерных и нестационарных вихрей, изучение которых является актуальным. С учетом степени развития вычислительной техники, стоимость лабораторного эксперимента и сложности структуры течения можно существенно расширить наши знания об отрывных течениях с использованием методов математического моделирования трёхмерных отрывных на основе полных уравнений Навье-Стокса.

Математическое моделирование аэродинамических параметров разных зданий и строений является весьма емкой проблемой из-за сложной формы геометрии, наличия нестационарного режима обтекания. При этом сложность обтекания предполагает выполнение систематических расчетов. Интерференция же спектра разных вихревых структур и масштабов между разными зданиями способствует усложнению рассматриваемой проблемы. Вследствие этого, адекватный процесс моделирования подразумевает применение действенного, более детально разработанного и верифицированного математического аппарата вычислительной гидродинамики с использованием высокопроизводительной вычислительной техники.

В данной работе приведены результаты численного моделирования обтекания воздушным потоком одиночной призматической модели сооружения, а также тандем двух круглых цилиндров с помощью открытого пакета OpenFOAM [1], использующего метод контрольных объемов для дискретизации основных уравнений. Открытость исходного кода данного пакета предоставляет широкие возможности по изучению и проработке имплементированных в нем различных математических моделей, способов решения разностных уравнений при использовании метода контрольного объема.

Математическая модель. В случае отсутствия внешних сил стационарное турбулентное течение несжимаемой вязкой жидкости описывается следующими уравнениями Навье-Стокса [2, с. 293]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right). \text{ Здесь } u_i \text{ и } u_i' - \text{ средняя и пульсационная скорости в}$$

по оси x_i соответственно, ν и ρ – коэффициент кинематической вязкости и плотность жидкости соответственно, а $\overline{u_i' u_j'}$ – напряжения Рейнольдса, требующие моделирования, p – давление.

Большинство используемых на практике моделей турбулентности, используют понятие турбулентной вязкости. Согласно гипотезе Буссинеска коэффициент турбулентной вязкости можно записать через градиент скорости среднего течения в виде [2, с. 294]:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k, \quad \text{где } \mu_t - \text{ коэффициент турбулентной вязкости, а}$$

$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ – кинетическая энергия турбулентности. Влияние турбулентных флуктуаций на характеристики среднего течения учитывается при помощи классических RANS–моделей турбулентности [3, с. 66].

Численная модель. В данной работе метод контрольных объемов, обеспечивающий принцип строгого соблюдения фундаментальных законов сохранения, использован для дискретизации расчетной области [4, с. 24]. При этом расчетная область разделяется на некоторое конечное число непересекающихся контрольных объемов в форме параллелепипеда. При этом важным является тот факт, что в данном контрольном объеме содержится только один узел. Расчетная сетка (рис. 1) имела $60 \times 45 \times 39$ ячеек по направлениям осей x, y и z соответственно.

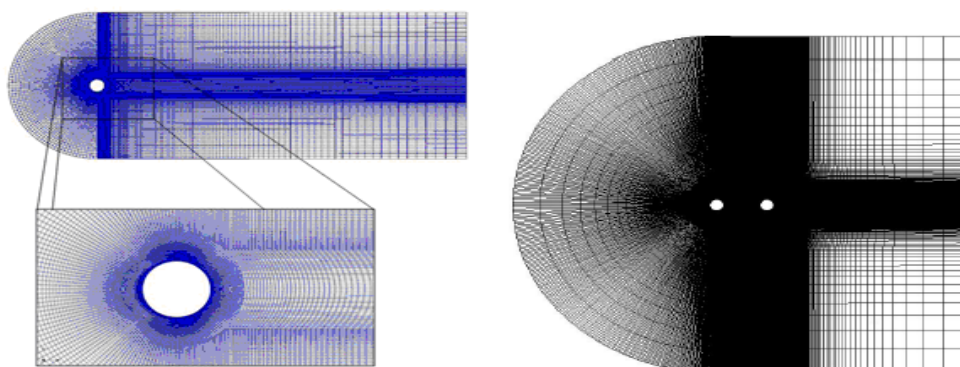


Рис. 1. Расчетная сетка.

Далее, для получения разностной формы дифференциального уравнения необходимо интегрирование каждого уравнения по каждому контрольному объему. При вычислении интеграла необходимо использовать подходящие профили, описывающие форму изменения переменной между соседними узловыми точками. Для дискретизации конвективного члена в уравнениях для трех компонент скорости, кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε использована схема QUICK.

В качестве начальных условий во внутренних узлах расчетной сетки поля скорости и давления задаются нулевыми $U=0$ м/с $p=0$ Па. Строго говоря, в случае стационарных режимов течений необязательно определение начальных данных. Тем менее задание значений начальных полей скорости и давления в OpenFOAM является необходимым [1]. Для того чтобы, в начале итерационного процесса иметь лучшую сходимость, необходимо придать малые значения для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации.

Входные граничные условия по возможности выбраны из экспериментальных данных. На выходе из канала градиенты по направлению оси Ox всех искомых величин полагались равными нулю. Аппарат пристеночных функций использован для задания граничных условий на твердых стенках канала [2, с. 298].

Численное решение систем нелинейных уравнений проведено с помощью утилиты simpleFoam пакета OpenFOAM, который моделирует стационарное турбулентное течение использованием SIMPLE алгоритма [4, с. 84]. В целях улучшения устойчивости итерационной процедуры решения взаимосвязанных нелинейных уравнений в данной работе использовался метод нижней релаксации с коэффициентами 0,7 для $U, k, \varepsilon, \omega$ и 0,3 для p . Относительная ошибка невязки для всех неизвестных была равной $\varepsilon = 10^{-4}$. Принятая система координат и граничные условия приведены на рисунке 2.

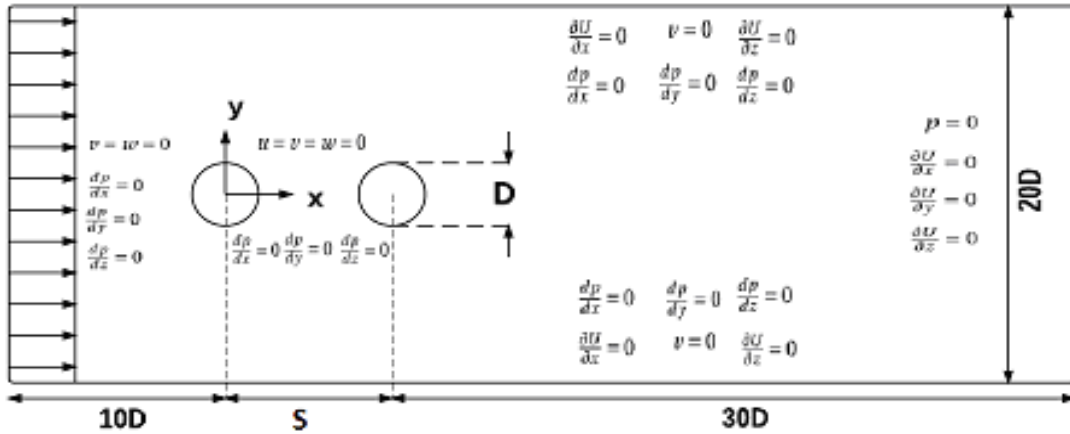


Рис. 2. Принятая система координат и граничные условия.

Результаты численных расчетов. На рисунке 3 приведены распределения вектора скорости (сверху) и линии тока (внизу) для случая одиночного цилиндра.

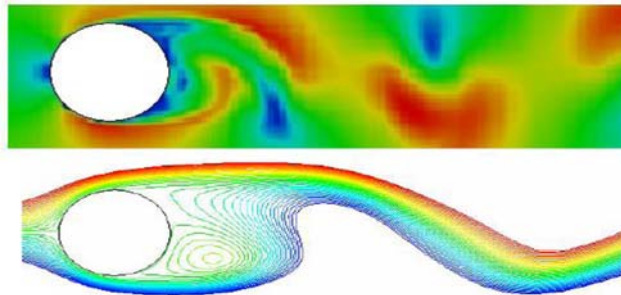


Рис. 3. Вектор скорости и линии тока.

Сравнение расчетных данных по продольной скорости с соответствующими экспериментальными данными приведен на рисунке 4.

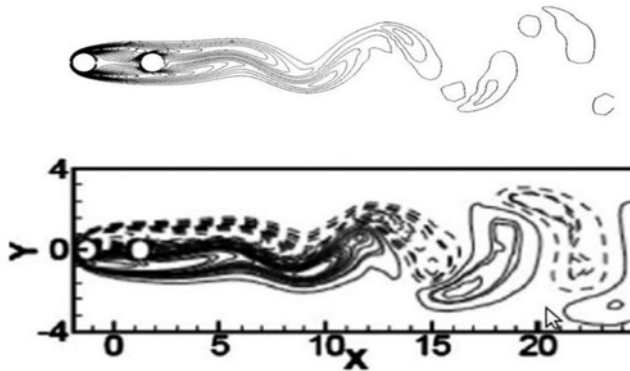


Рис. 4. Сравнение с экспериментом.

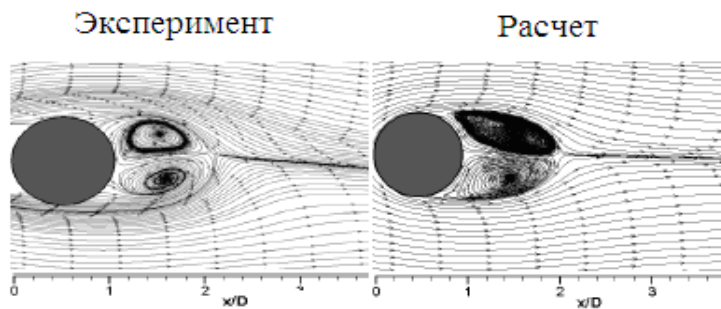


Рис. 5. Тандем цилиндров.

На рисунке 5 приведены линии тока скорости вдоль оси Ox для тандема цилиндров. Визуальное сравнение, приведенное на рисунках 4 и 5 показывают, что численный расчет с приемлемой точностью воспроизводит характерные особенности течения.

Заключение. В целом, точность предсказания поля скорости вблизи призматической модели одиночного здания является удовлетворительной. Численные расчеты, полученные при помощи различных моделей турбулентности с двумя уравнениями с небольшими отклонениями, адекватно описывают рассматриваемый класс течений.

Литература:

1. <http://www.openfoam.org>. OpenFOAM 2.3. User Guide.
2. Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics // Springer Verlag, 2002. - 423 p.
3. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics // Edinburg: Pearson Education Limited, 2007. 517p.
4. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Перевод с. англ. - М.: «Энергоатомиздат», 1984. - 152 с.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор Курманалиев А.Ы.
