

Курбаналиев Абдыкерим Ырысбаевич - д.ф.-м.н., профессор,
Осконбаев Маралбек Чотоевич - к.ф.-м.н., доцент,
Турганбаева Акпари Балтабаевна – аспирант,
Ошский государственный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ МЕСТНОСТИ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ В ПАКЕТЕ OPENFOAM

В данной работе приведены некоторые результаты моделирования несжимаемого вязкого течения над одиночным холмом при помощи открытого пакета OpenFOAM. Проведено сравнение численных значений продольной скорости в восьми вертикальных сечениях, полученных при использовании модели Спаларта-Аллмараса с соответствующими экспериментальными данными и получено хорошее совпадение между ними.

Ключевые слова: метод контрольных объемов, рециркуляционное течение, модели турбулентности, Open FOAM.

Kurbanaliev Abdykerim Ырысбаевич
doctor of physical and mathematical sciences, professor,
Oskonbaev Maralbek Chotovich - Ph.D., Associate Professor,
Turganbaeva Akpari Baltabaevna - graduate student,
Osh State University

MODELLING OF THE FLOW OVER THE REGION WITH COMPLICATED RELIEF IN THE FRAME OF OPENFOAM

The paper presents some results modelling of the incompressible viscous high Reynolds number flow over a single hill by means of the open code OpenFOAM. We compared the numerical velocity distributions in eight vertical sections using Spalart-Allmaras model with the corresponding data from experiments and we obtained a good agreement.

Key words: control volume method, recirculation flow, turbulence models, Open FOAM.

Введение. Достаточно широкое количество процессов, протекающих в химических и других технологических процессах, большинство явлений, встречающихся в метеорологии, океанологии, гидродинамике и гидравлике, из-за малых характерных скоростей течений можно описать в рамках системы уравнений Навье-Стокса для несжимаемой вязкой жидкости.

Наличие термически и орографически 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. В некоторых случаях возникает опасность необратимых изменений: уничтожения ряда видов животных и растительности, ухудшения генофонда населения и увеличения заболеваемости и смертности.

Также без помощи математических моделей крайне сложно прогнозировать распространение загрязняющих веществ в случае аварийных выбросов. Физическое моделирование стоит достаточно дорого и перенос результатов, полученных на модели,

в реальные условия во многих случаях нетривиален. При анализе вариантов расположения и допустимой интенсивности источников выбросов на работающих и проектируемых предприятиях или в жилых микрорайонах дешевле сначала провести серию расчётов и лишь в особенно сложных и важных случаях дополнительно использовать физическую модель.

Обтекание кузова автотранспорта, лопаток ветрогенератора и крыльев самолетов являются некоторыми примерами того, где, отрыв потока может иметь важное значение для эффективной работы технических систем. Другой важной и актуальной проблемой является обеспечение долговечности материалов и конструкции линий электропередач в горных местностях Кыргызской Республики. Известно, что для защиты ЛЭП высоких напряжений от пылевидных частиц, приводящих к нежелательному загрязнению изоляции ЛЭП, обычно сооружаются защитные экраны или используются естественные особенности рельефа.

Типичным примером внешних задач вычислительной гидродинамики является обтекание одиночного трёхмерного холма. Несмотря на простую форму (см. рис. 1) одиночного симметричного холма, с точки зрения вычислительной гидродинамики является сложной задачей и эксперименты показывают, что на поверхности холма происходит, отрыв потока, образовавшиеся зоны рециркуляции являются сложными и зачастую сильно зависят от времени, т.е. являются нестационарными.

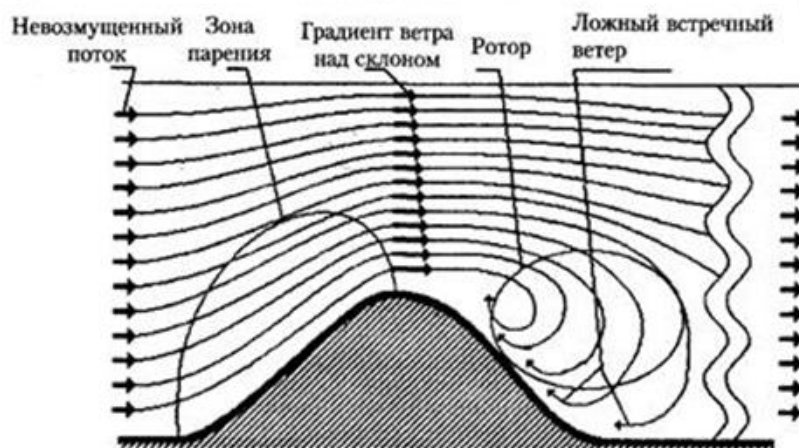


Рис. 1. Характерные особенности течения вокруг холма.

Приближаясь к наветренной стороне холма воздух поднимается и скорость его возрастает, достигая максимального значения над вершиной холма. А с подветренной стороны поток воздуха идет вниз, опускается, образуется закрученный вихрь, который называется подгорным ротором.

В этой работе приведены результаты моделирования процесса обтекания гладкого симметричного идеализированного холма при помощи открытого пакета OpenFOAM [1]. В качестве модели турбулентности использовалась модель Спарларта-Аллмараса. Опыт использования модели Спарларта-Аллмараса показал, что ее реальные возможности значительно шире, чем предполагалось при ее создании. Более того, после введения в нее поправок на кривизну линий тока и вращение, границы применимости модели заметно расширились. Модель является удовлетворительной для многих инженерных приложений. В особенности она применима для расчета обтекания самолета, автомобиля, профилей, крыльев, лопаток турбины и т.д., для которых она была калибрована. Кроме этого ее часто применяют в гибридных моделях наряду с LES.

Целью этой задачи является оценка имплементированных в OpenFOAM RANS модели турбулентности для прогнозирования течений при обтекании симметричного

гладкого холма. Полученные численные результаты сравниваются с данными классической базы данных Европейского сообщества исследований течений, турбулентности и горения ERCOFTAC[2, testcase 18].

Постановка задачи. Рассматривается течение несжимаемой турбулентной вязкой среды в канале с симметричными плавными выступами на поверхности [2, case 18]. Высота канала 170мм, ширина канала 200мм, расстояние от входа в канал до центра выступа – 300мм, от центра выступа до выхода из канала – 500мм. Максимальная высота выступа $h=28$ мм, длина – 108мм (см. рис. 2.).



Рис. 2. Расчетная область и система координат

Средняя осевая скорость на входе $U_0 = 2,147 \text{ м/с}$, кинематическая вязкость воды $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, вычисленное по этим характеристикам число Рейнольдса было равно $Re = \frac{U_0 \cdot h}{\nu} = 6 \cdot 10^4$.

Математическая модель. Законы сохранения массы и импульса для несжимаемой вязкой изотермической жидкости, при отсутствии массовых и поверхностных сил, приводят к следующим, осредненным по Рейнольдсу нестационарным уравнениям Навье-Стокса [3, с. 293]:

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

где \bar{u}_i – i -ая компонента средней скорости в направлении координаты x_i , ρ – плотность, \bar{p} – среднее давление, $\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ – средний тензор вязких напряжений, μ – молекулярная динамическая вязкость, $\rho \overline{u'_i u'_j}$ – напряжения Рейнольдса, требующие моделирования. Осреднение производится по времени, а штрих означает флуктуационную часть. При наличии массовых и других сил необходимо уравнение (1) дополнить соответствующими членами. Учет влияния турбулентных пульсаций базируются на модели турбулентности Спалларта-Алмараса [4, с. 89-90]. При использовании этой модели решается только одно уравнение для турбулентной вязкости:

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} = \overline{u_j} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = c_{b1} \tilde{S} \tilde{\nu} - c_{\omega 1} f_{\omega} \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \right] + \frac{c_{b2}}{\sigma} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k}$$

Коэффициенты замыкания и вспомогательные соотношения имеют вид:

$$c_{b1} = 0.1355, \quad c_{b2} = 0.622, \quad c_{v1} = 7.1, \quad \sigma = 2/3$$

$$c_{\omega1} = \frac{c_{b1}}{\kappa^2} + \frac{1+c_{b2}}{\sigma}; \quad c_{\omega2} = 0.3, \quad c_{\omega3} = 2.0, \quad \kappa = 0.41$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi = \frac{\tilde{v}}{\nu}; f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}; f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}; f_{\omega} = \left[\frac{1 + c_{\omega3}^6}{g^6 + c_{\omega3}^6} \right]^{1/6}; \\ g = r + c_{\omega2}(r^6 - r); r = \frac{\tilde{v}}{\tilde{S}\kappa^2 d^2}; \tilde{S} = S + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}; S = 2\sqrt{\Omega_{ij}\Omega_{ij}}; \end{array} \right.$$

где d – расстояние до ближайшей стенки, Ω_{ij} – тензор вращения.

Уравнение для кинематической турбулентной вязкости определяется $\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}$.

Численная модель. Дискретизация расчетной области (см. рис. 1.) произведена при помощи метода контрольных объемов, обеспечивающий достаточно строгое соблюдение законов сохранения, и основные понятия метода напрямую соответствуют физическим таким величинам, как массовый расход, поток ит.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. Общее число контрольных объемов – ячеек после процесса сгущения около стенок холма было равно 524 704. Часть расчетной сетки около холма показан на рис. 2.

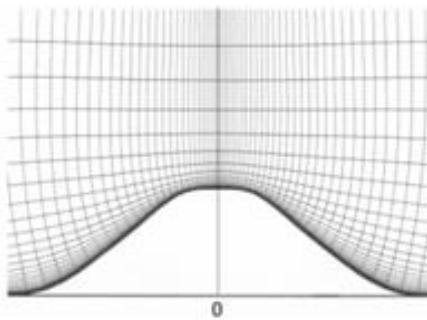


Рис. 2. Расчетная сетка

Далее, каждое 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 давления заданы величины $u=0$ м/с и $p=0$ 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.

Для задания входных граничных условий использовались экспериментально измеренные профили скорости и интенсивности турбулентности. Профиль кинетической энергии турбулентности определяется через экспериментально измеренную интенсивности турбулентности с использованием предположения об изотропности турбулентности на входе в канал. Скорость диссипации вычисляется по соотношению $\varepsilon = C_D^{0.75} k^{3/2} / L$. Здесь L – характерный линейный размер канал, которая предполагается равной 10% от входной ширины расчетной области.

На выходе из канала 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 [3, с. 283, 4, с. 275].

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[3, с. 176, 4, с. 190, 5, с. 84]. Для повышения устойчивости итерационного метода решения взаимосвязанных и нелинейных алгебраических уравнений, использовались следующие коэффициенты нижней релаксации 0,7 для u , k , ϵ , R и 0,3 для p . Относительная ошибка сходимости итераций для всех рассматриваемых переменных была равной $\epsilon = 10^{-4}$.

Результаты моделирования и обсуждение. Сравнение результатов численной продольной составляющей скорости u в различных восьми вертикальных сечениях оси Ox соответствующими экспериментальными данными представлены на рис. 3а. Здесь скорость представлена в единицах средней осевой скорости $U_0 = 2,147 \text{ м/с}$, а вертикальная координата y – в единицах максимальной высоты выступа $h=28 \text{ мм}$. В целом совпадение между экспериментальными и численными данными следует считать достаточно хорошим.

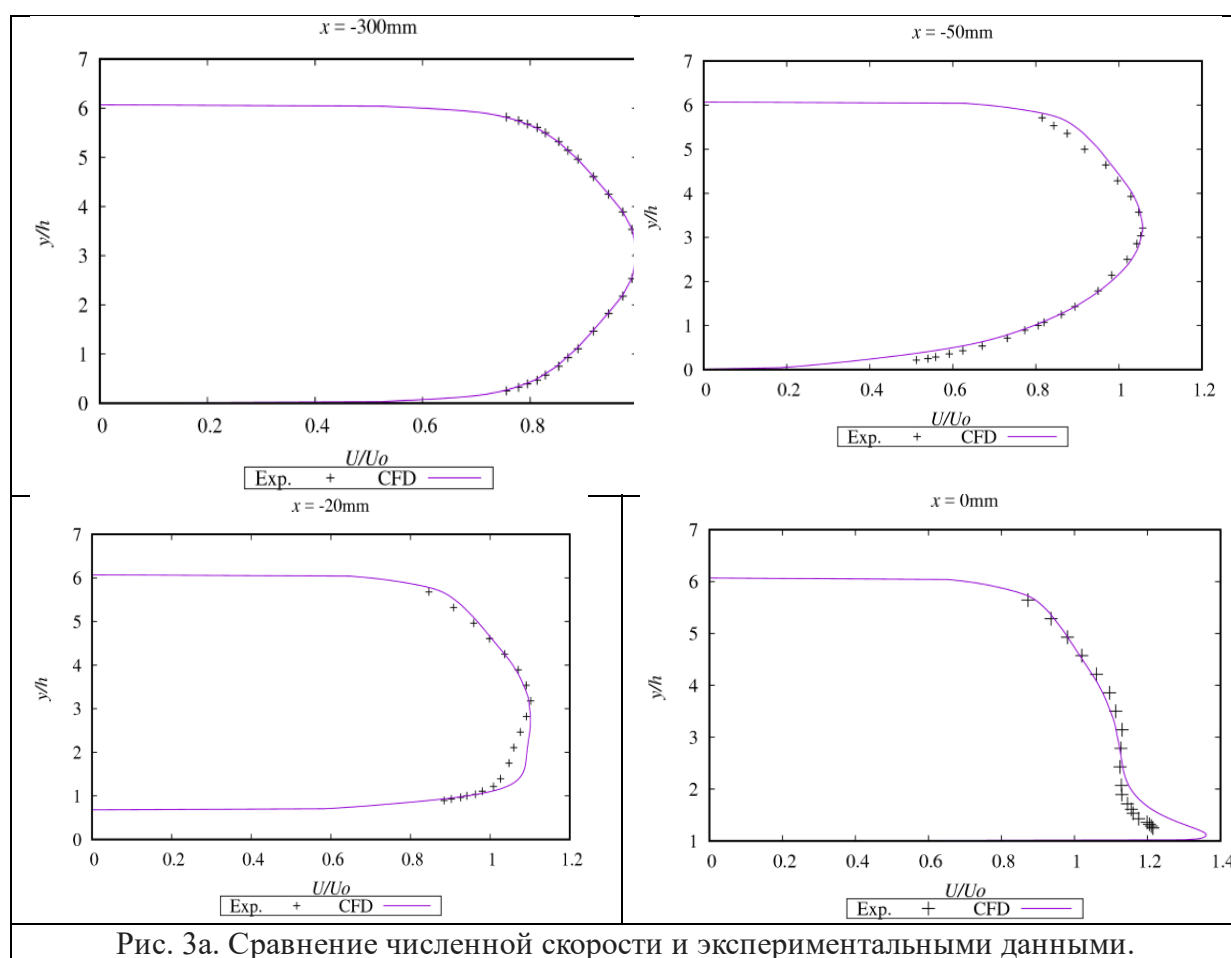


Рис. 3а. Сравнение численной скорости и экспериментальными данными.

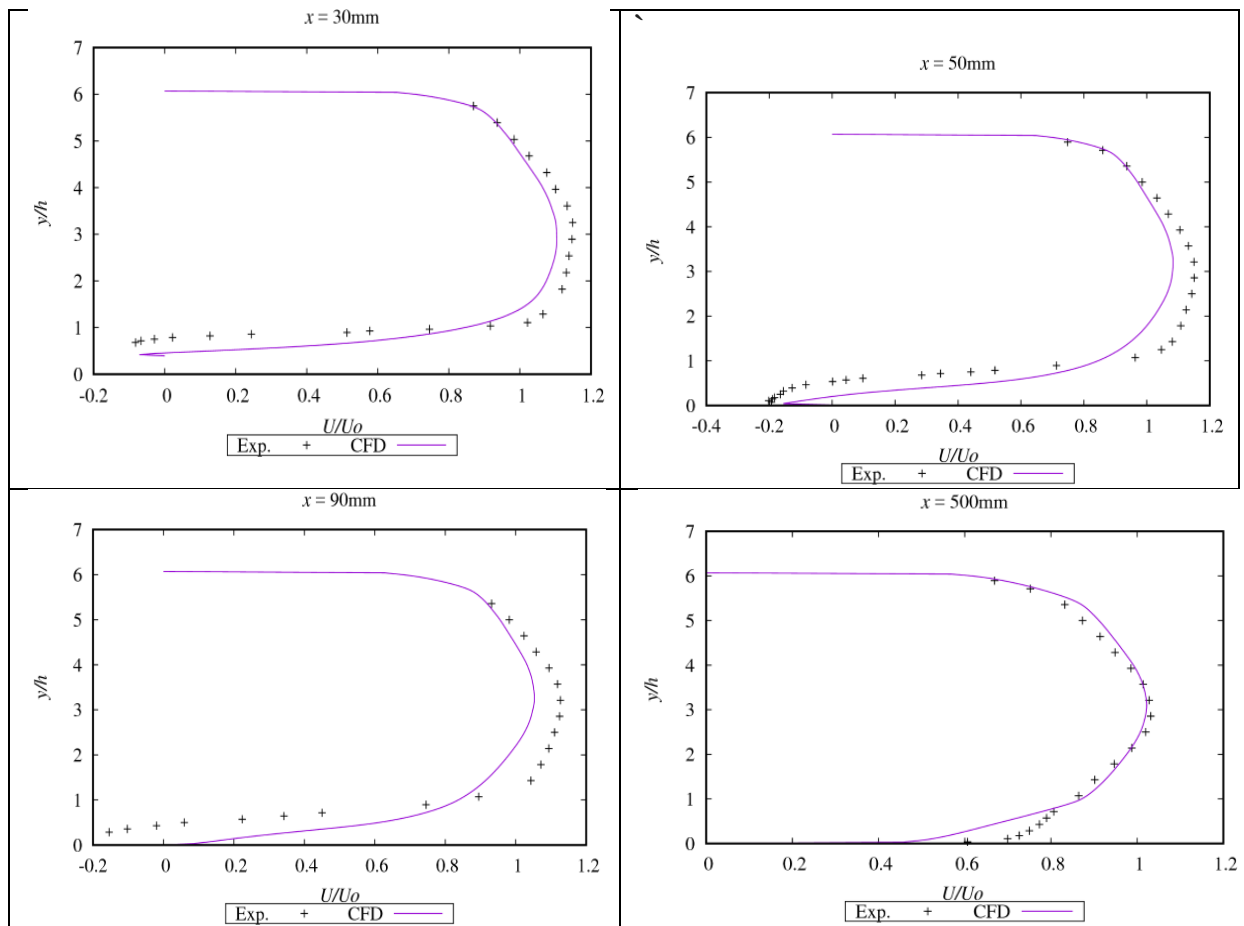


Рис. 3б. Сравнение численной скорости и экспериментальными данными.

Выводы. В этой работе приведены результаты моделирования процесса обтекания гладкого симметричного идеализированного холма при помощи открытого пакета OpenFOAM. 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. Учет влияния турбулентных пульсаций базируются на модели турбулентности Спаларта-Аллмараса. Проведено сравнение численных значений продольной скорости в восьми вертикальных сечениях, полученных при использовании модели Спаларта-Аллмараса с соответствующими экспериментальными данными и получено хорошее совпадение между ними.

Литература:

1. **Versteeg, Н. К.** An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Edinburg: [Text] / W. Malalasekera // Pearson Education Limited. –2007. –517p.
2. **Патанкар, С.В.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: [Текст] Пер. с. англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.
3. **Ferziger, J. H.** Computational Methods for Fluid Dynamics [Text] M Peric.// Springer Verlag, 2002.
4. <http://www.openfoam.org>. OpenFOAM 5 User Guide.
5. <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/>