

УДК 532.517

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА OPENFOAM

Абдимуталипова З.К., Курбаналиев А.Ы.

Ошский государственный университет

Проведены результаты численного моделирования турбулентного течения воздушного потока в помещении с использованием подхода вычислительной гидродинамики для решения осредненной по Рейнольдса уравнения Навье - Стокса для жидкости. Представлены и сравнены безразмерные скорости для различных моделей турбулентности: стандартный $k - \varepsilon$, стандартный $k - \omega$, RNG $k - \varepsilon$, $k - \omega$ SST. Результаты объясняют, что все модели турбулентности дают почти одинаковые результаты.

Ключевые слова: плоская струя, модели турбулентности, RNG $k - \varepsilon$, $k - \omega$ SST, вентиляция.

OPENFOAM ПАКЕТИН КОЛДОНУУ АРКЫЛУУ БӨЛМӨДӨГҮ ТУРБУЛЕНТТҮҮ АБА АГЫМЫН САНДЫК МОДЕЛДӨӨ

Абдимуталипова З.К., Курбаналиев А.Ы.

Ош мамлекеттик университети

Бөлмөдөгү турбуленттүү аба агымын сандык моделдөөнүн натыйжалары суюктук үчүн Рейнольдс-орточолонгон Навье-Стокс теңдемесин чечүү үчүн суюктуктун эсептөө динамикасынын ыкмасын колдонуу менен ишке ашырылат.

Өлчөмсүз ылдамдыктар ар кандай турбуленттик моделдер үчүн берилген жана салыштырылган: стандарттуу $k - \varepsilon$, стандарттык $k - \omega$, RNG $k - \varepsilon$, $k - \omega$ SST. Натыйжалар бардык турбуленттик моделдер дээрлик бирдей натыйжаларды берерин түшүндүрөт.

Баштапкы сөздөр: тегиз струя, турбуленттүү моделдер, RNG $k - \varepsilon$, $k - \omega$ SST, желдетүү.

NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT AIR FLOW IN A ROOM USING THE OPENFOAM PACKAGE

Abdimutalipova Z.K., Kurbanaliev A.Y.
Osh State University

A numerical simulation of the air flow in a room was carried out using the CFD approach to solve the Reynolds-averaged Navier-Stokes equation for a liquid. Dimensionless velocities are presented and compared for various turbulence models: standard $k-\varepsilon$, standard $k-\omega$, RNG $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST. The results explain that all turbulence models give almost the same results.

Keywords: plain jet, turbulence models, RNG $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST, ventilation.

Введение. Движение воздуха и явление его переноса являются очень важными характеристиками теплового комфорта человека. Скорость связана с распределением температуры, а также с уровнями турбулентности. Таким образом, распределение скорости воздуха играет жизненно важную роль в проектировании внутреннего состояния помещения. Данная работа посвящена изучению модели воздушного потока с точки зрения распределения скоростей в различных местах для сравнения результатов различных моделей турбулентности. Численное моделирование проводилось для 2D и 2D моделей.

В последние годы при проектировании вентиляционных систем все чаще используются методы вычислительной гидродинамики, позволяющие проводить трехмерное моделирование турбулентных струйных течений. В инженерной практике стали широко применяться подходы, дающие оценку параметров течения на основе численного решения осредненных по Рейнольдсу стационарных или нестационарных уравнений Навье – Стокса. Численное моделирование проводилось путем решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с использованием OpenFOAM.

В настоящей работе представляются результаты численного моделирования турбулентного течения воздуха в замкнутом помещении с помощью OpenFOAM.

Постановка задачи. Рассматривается течение воздуха в помещении с размерами 3 м и 1 м соответственно. Геометрия и расчетная сетка были созданы с помощью утилиты blockMesh в OpenFOAM. Для моделирования использовался решатель pisoFoam, а постобработка выполнялась в Paraview. Использовались следующие модели турбулентности: Standard $k - \varepsilon$, Standard $k-\omega$, RNG $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST. Для этого моделирования использовалась 2D модель комнаты. На передней стенке у потолка имеется щель естественной вентиляции с высотой щели $h = 0.056H$, а на задней стенке у земли имеется открытый выход высотой $h = 0.16H$. Число $Re = 5000$ и зависит от высоты входного отверстия, скорости входного отверстия и условий окружающего воздуха, поэтому ожидается, что поток будет иметь турбулентные характеристики. Усредненные по времени результаты подтверждены экспериментальными результатами [1]. Связь давления и скорости решалась алгоритмом PISO [2]. Временные и турбулентные члены были дискретизированы с использованием эйлеровой и ограниченной линейной схем соответственно [2]. На рисунке 1. и 2. показано числовые области.

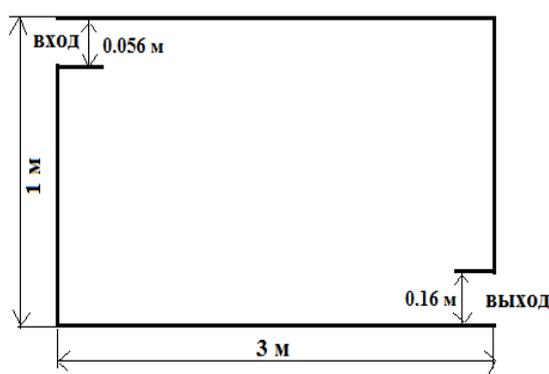


Рис. 1-Геометрия 2D модели

Начальные и граничные условия. Рассматривается изотермическое движение воздуха, описываемого моделью несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами: плотность $\rho = 1.23 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\mu = 1.79 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

На вход в помещение подается воздух со скоростью 0.455 м/с и создается циркуляцию воздуха внутри помещения.

На выходной границе задавались мягкие граничные условия. Остальные границы расчетной области – твердые стенки, на которых задавались условия прилипания. Для нашей задачи граничные условия определяются нулевым градиентом давления по нормали к стенке – zeroGradient. На всех границах расчетной области необходимо задать граничные условия для основных переменных (см. табл. 1).

Таблица 1 – Используемые граничные условия.

Переменная	Скорость, м/с	Давление, Па	k , м ² /с ²	ω , 1/с	ε , м ² /с ³
Граница					
Вход	fixedValue; uniform (1.3 0 0);	zeroGradient	fixedValue; uniform 0.00630828 4;	fixedValue; \$internalField ;	fixedValue; uniform 0.020031953;
выход	zeroGradient;	fixedValue; uniform 0;	zeroGradient	zeroGradient ;	zeroGradient;
стенка	noSlip;	zeroGradient	kqRWallFunction; uniform 0.00630828 4;	omegaWallFunction; \$internalField ;	epsilonWallFunction; uniform 0.020031953;
Передняя и задняя	empty	empty	empty	empty	empty

Дискретизация расчетной области производится методом контрольных объемов. Эти данные нужно указать в файлах fvSchemes и fvSolution находящиеся в папке system. В файле fvSchemes необходимо указать выбранные схемы дискретизации всех членов уравнения(1), а также описать интерполяционные схемы для вычисления потоков через грани контрольных объемов (см. табл. 2).

В данном случае для решения СЛАУ применяется алгоритм PISO, в котором нужно указать число внутренних коррекций для полей скорости и давления (см. табл. 3).

Таблица 2 – Использованные схемы дискретизации

Слагаемое	Схема аппроксимации в пакете OpenFOAM	Порядок точности схемы
Градиент	cellLimitedGausslinear 1	Второй
Дивергенция	bounded Gauss limitedLinear 1;	Второй
Лапласиан	Gauss linear corrected;	Второй
Интерполяция	linear	Первый

Таблица 3 – Решатели уравнений для основных переменных

Переменная	Решатель	Точность
Давления	GAMG решатель с использованием сглаживателя GaussSeidel	1e-6
U, k, ε, omega	Smooth Solver решатель с использованием сглаживателя symGaussSeidel	1e-5

Использовались параметры вычислительного алгоритма, обеспечивающие дискретизацию по пространству и времени со вторым порядком точности.

Модели турбулентности.

1. **$k - \varepsilon$ модель.** Наиболее популярной моделью с двумя дифференциальными уравнениями является $k - \varepsilon$ модель, предложенная Чоу (1945) [3] и получившая дальнейшее развитие в исследованиях Лаундера –Джонса (1972) [4].

Уравнение для кинетической энергии турбулентности:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

Уравнение для удельной скорости диссипации:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

Динамическая вихревая вязкость

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

Турбулентные напряжения Рейнольдса

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \rho \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

Модельные константы:

$$c_{\varepsilon 1} = 1.44; \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92; \quad C_\mu = 0.09; \quad \sigma_k = 1.0; \quad \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

2. $k - \omega$ – модель. Ниже представлена базовая двухслойная модель

Ментера(1993) [5]:

Уравнение для кинетической энергии турбулентности:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

Уравнение для удельной скорости диссипации:

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$= \gamma \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

$$+ 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

Динамическая вихревая вязкость

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (7)$$

Турбулентные напряжения Рейнольдса

$$(8)$$

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$\beta^* = 0.09; \quad \beta_1 = 0.075; \quad \sigma_{k1} = 0.5; \quad \sigma_{\omega 1} = 0.5;$$

3. **$k - \omega$ SST - модель.** Подводя итог модельным уравнениям модели $k - \omega$ SST, таковы:

Кинетическая энергия турбулентности:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (9)$$

Удельная скорость рассеяния:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = & \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 \\ & - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (10)$$

Кинематическая вихревая вязкость:

$$v_T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, S F_2)} \quad (11)$$

Коэффициенты замыкания и вспомогательные соотношения:

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (12)$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right) \quad (13)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (14)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (15)$$

$$\alpha_1 = \frac{5}{9}, \quad \alpha_2 = 0.44 \quad \beta_1 = \frac{3}{40}, \quad \beta_2 = 0.0828 \quad (17)$$

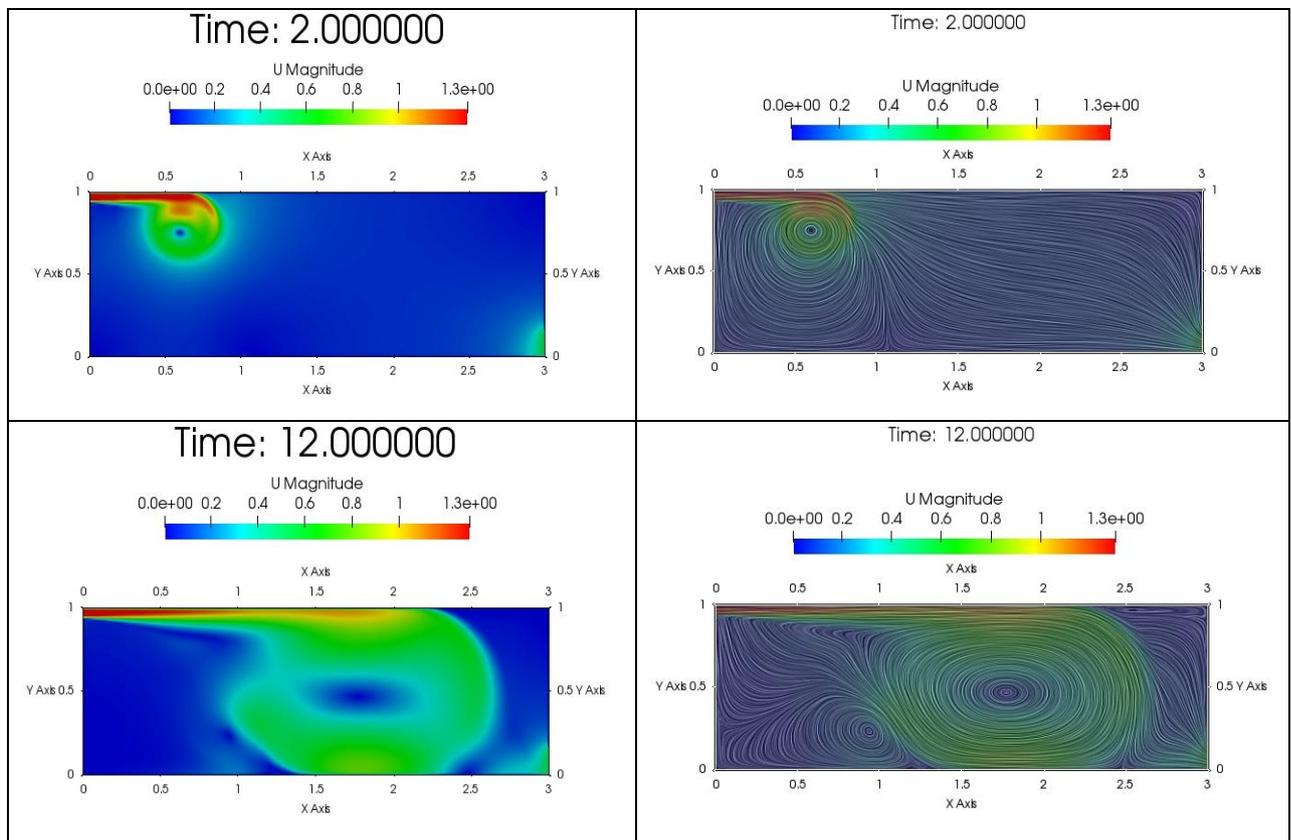
$$\beta^* = \frac{9}{100}, \quad \sigma_{k1} = 0.85 \quad \sigma_{k2} = 1 \quad \sigma_{\omega 1} = 0.5 \quad \sigma_{\omega 2} = 0.856$$

4. **RNG $k - \varepsilon$ – модель.** Более современная версия $k - \varepsilon$ – модели турбулентности предложена в работах [4-5] . Эта модель использует те же уравнения (1–2) что и стандартная $k - \varepsilon$ – модель турбулентности, но с другими коэффициентами:

$$C_\mu = 0.085; \quad C_{\varepsilon 1} = 1.42; \quad \widetilde{C}_{\varepsilon 2} = 1.68; \quad \sigma_k = 0.72; \quad \sigma_\varepsilon = 0.72. \quad (18)$$

$$C_{\varepsilon 2} = \widetilde{C}_{\varepsilon 2} + \frac{C_\mu \lambda^3 (1 - \frac{\lambda}{\lambda_0})}{1 + \beta \lambda^3}; \quad \lambda = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2S_{ij}S_{ji}}; \quad \beta = 0.012; \quad \lambda_0 = 4.38 \quad (19)$$

Результаты и обсуждения. Структура течения в помещении показано на рисунке 3, на котором в нескольких сечениях помещения приведены поля модуля скорости. Как показано входной поток всасывается в палату и изгибается к земле. В ходе расчетов был определен профиль продольной скорости (u) вдоль вертикальной оси в двух точках $x = 1H$ и $2H$, а предыдущее вычислительное исследование также было выполнено Zuo и Chen [6].



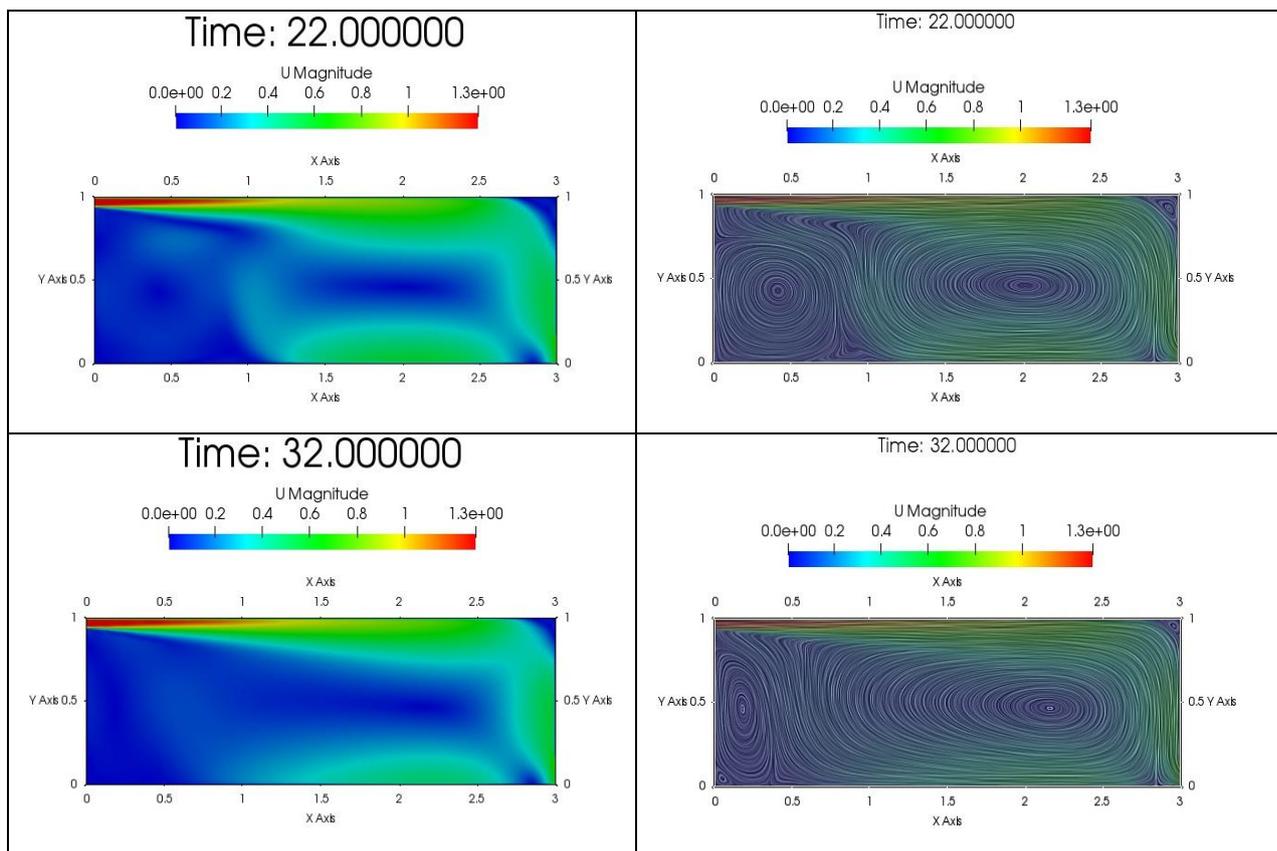


Рис. 3- Профиль продольной скорости (u) вдоль вертикальной оси

Вблизи потолка развивается пристенная турбулентная струя воздуха, которая практически симметрична относительно срединного сечения помещения. По мере распространения струи от входного отверстия до противоположной стенки значения скорости уменьшается примерно в два раза. После столкновения с противоположной стенкой, струя разворачивается и нижней части помещения формируется вторичное течение со скоростью менее 0.1 м/с.

В вентиляции вход и выход находятся в противоположных боковых стенках. Вход расположен в верхнем левом углу на боковой стенке на $z = 6$ м. Выходное отверстие в правом нижнем углу. Загрязненный воздух откачивается из выходного отверстия с равномерной скоростью 1 м/с.

Как показано на рисунке 3 все модели турбулентности дают очень близкие результаты к экспериментальным данным в 2D модели. В рамках

этих выходных данных стандартные результаты $k-\omega$ и SST незначительно отличаются от других результатов.

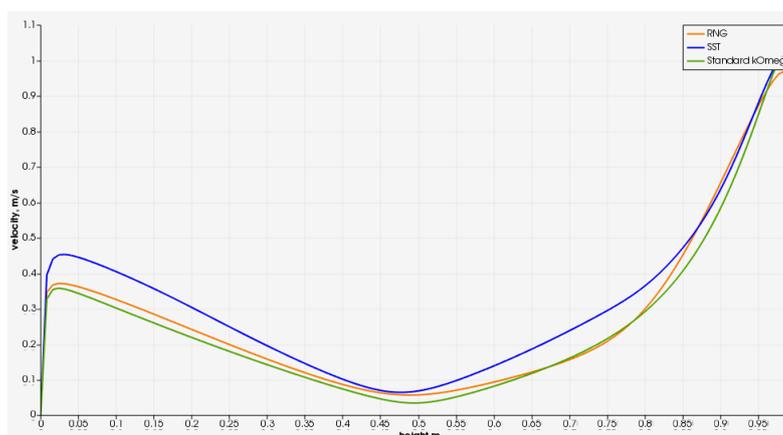


Рис. 3 – Безразмерное распределение скоростей

Выводы. Было проведено численное моделирование турбулентное течения воздуха в помещении с помощью пакета OpenFOAM и представленные результаты хорошо согласуются с доступными экспериментальными измерениями. Сравнены безразмерные скорости для различных моделей турбулентности: Стандартный $k - \varepsilon$, стандартный $k - \omega$, RNG $k - \varepsilon$, $k - \omega$ SST. Результаты объясняют, что все модели турбулентности дают почти одинаковые результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Horikiri K., Yao Y., Yao J., Numerical Simulation of Convective Airflow in an Empty Room, International Journal of Energy and Environment, vol. 5, issue 4, 2011
2. OpenFOAM User Guide version 6.0 (2018)
3. Chou P.Y. On the Velocity Correlations and the Solution of the Equations of Turbulent Fluctuation. Quart. Appl. Math. , Vol. 3, p. 38.

4. Jones W.P. The prediction of laminarization with a two equation model of turbulence. Jones W.P., Launder B.E. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15:301-314,1972.
5. Menter F R 1993 Zonal two Equation $k - \omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows *A/AA* 93-2906
6. W. Zuo and Q. Chen, "Real-time or faster-than-real time simulation of airflow in buildings," *Indoor air*,19(1), 2009, pp. 33-44.