

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРЕКТНОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КРАТКОВРЕМЕННОГО ВОЗДУХООБМЕНА МЕЖДУ ПОМЕЩЕНИЕМ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ**

Заковоротный А.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины  
г. Киев, Украина

**АННОТАЦИЯ:** У даній роботі проведена верифікація двопараметричних моделей турбулентності для моделювання вільної конвекції як в малих замкнутих об'ємах повітря, так і при природній вентиляції в приміщеннях. Показано, що модель Ментера ( $k-\omega$  SST) превалює над  $k-\epsilon$  і  $k-\omega$  моделями і з достатньою точністю описує вільну конвекцію в обох випадках.

**АННОТАЦИЯ:** В данной работе проведена верификация двопараметрических моделей турбулентности для моделирования свободной конвекции как в малых замкнутых объемах воздуха, так и при естественной вентиляции в помещениях. Показано, что модель Ментера ( $k-\omega$  SST) превалирует над  $k-\epsilon$  и  $k-\omega$  моделями и с достаточной точностью описывает свободную конвекцию в обоих случаях.

**ABSTRACT:** In this paper two-parameter turbulence models are verified for simulation of free convection in closed cavity natural ventilation in buildings. It is shown that the Menter model ( $k-\omega$  SST) prevails over the  $k-\epsilon$  model and  $k-\omega$ , and with sufficient accuracy describes free convection in both problems.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** моделирование, конвекция, вентиляция, модели турбулентности, верификация.

## **ВВЕДЕНИЕ**

На комфортные условия пребывания человека в помещении оказывают влияние температура и влажность воздуха, скорость воздуха, интенсивность освещения и т.д. При выборе систем отопления и вентиляции в помещении необходимо обеспечить, чтобы данные параметры принадлежали регламентированным диапазонам соответственно [1] для конкретно выбранного типа здания.

Для определения перечисленных параметров проводят как экспериментальные исследования, так и численное моделирование тепловых и гидравлических процессов протекающих в выбранном помещении с конкретными системами отопления и вентиляции. Экспериментальные исследования на натурных образцах являются достаточно затратными. Численное моделирование указанных процессов не является трудо- и ресурсоемким, а полученная в ходе решения модель может быть легко

адаптирована под любой тип системы вентиляции и отопления. Корректность результатов численного моделирования в общем случае зависит от принятой математической модели. В работах [2, 3] проведены экспериментальные исследования свободной конвекции в малых объемах (менее  $10^{-2} \text{ м}^3$ ) и на основании полученных результатов была проведена верификация математической модели. Однако, полученные результаты справедливы для случаев свободной конвекции, обусловленной только разностью температур потока воздуха и ограждающих конструкций. В случае естественной вентиляции помещения, в нем могут возникать значительные градиенты температур между входными и выходными воздушными потоками, и, как следствие, свободная конвекция вблизи стены будет играть меньшую роль. Следовательно, задача верификации математической модели естественно-вентилируемого помещения является актуальной.

**Целью** данной работы является определение корректной математической модели как для замкнутых объемов воздуха, так и для помещений с естественной вентиляцией. Для этого будут использованы результаты экспериментальных исследований в работах [3,4].

## **ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ**

Свободная конвекция в замкнутом объеме воздуха; кратковременная природная вентиляция в помещении с габаритами 4,1x3,2x2,7 м, размещенном в термостатирующей камере. Исследования будут проводиться путем численного моделирования объекта исследования в программном пакете Ansys Fluent и сравнения полученных данных с экспериментальными исследованиями.

## **ОСОБЕННОСТИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА В МАЛОМ ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРВОГО РОДА**

Рассматривается замкнутый объем воздуха размером 20x20x20 мм. Свободная конвекция в объеме является следствием наличия разности температур между противоположными вертикальными поверхностями рассматриваемого куба  $T_1 = 69^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 41^\circ\text{C}$  согласно постановке эксперимента в работе [3].

Другие поверхности находятся при адиабатных условиях. Процесс стационарный. При численном моделировании поставленной задачи принимались следующие допущения:

- воздух рассматривался как идеальный несжимаемый газ, то есть как газ, плотность которого изменяется за формулой:

$$\rho_{\text{возд}} = \frac{P_0}{R_{\text{возд}} \cdot T}, \quad (1)$$

где  $P_0$  - атмосферное давление воздуха в исследуемом объеме:  $P_0 = 101325 \text{ Па}$ ,

$R_{\text{возд}}$  - универсальная газовая постоянная,

$R_{\text{возд}} = 287 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ ,

$T$  - температура воздуха, К.

- теплофизические свойства воздуха были заданы постоянными: теплопроводность воздуха -  $0,0242 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , кинематическая вязкость -  $17,89 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , теплоемкость воздуха -  $1006 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

В данной работе будут рассмотрены двопараметрические модели турбулентности: стандартная k-ε модель (модель Лаундера-Сполдинга) [5], k-ω модель (модель Вилкокса) [6], SST модель (модель Ментера) [7].

Рассматривались два варианта конечно-разностных сеток:

1 - гексаэдрическая сетка, размеры элементов которой одинаковы между собой во всех направлениях, количество расчетных ячеек 64000;

2 - гексаэдрическая сетка, размеры элементов которой уменьшаются при приближении к границе расчетной области, количество расчетных ячеек 64000;

Максимальная амплитуда векторов скоростей для расчетной сетки варианта 1 не превышает значение в 0,3 м/с, для расчетной сетки варианта 2 - 0,12 м/с. Амплитуда векторов скоростей в соответствии с экспериментальными исследованиями [3] не превышает 0,11 м/с, а общие результаты эксперимента хорошо коррелируются с расчетом для варианта сетки 2. При этом полученные результаты для второго варианта сетки не зависят от выбранной модели турбулентности. безразмерная координата вблизи стенки равна  $y^+=0,7$ . Критерий Нуссельта рассчитанный для охлаждаемой поверхностью с температурой  $T_f=49$  °С для проведенного расчета составляет 17,5 с относительной погрешностью 8 % по сравнению с [3]. Таким образом, можно сделать вывод, что для получения корректных результатов при моделировании свободной конвекции необходимо выполнить уменьшение размеров расчетной сетки к границам исследуемого объема воздуха, таким образом чтобы безразмерный параметр  $y^+ \leq 1$ .

Необходимо заметить, что полученные результаты противоречат результатам работы [2], где наиболее корректной была признана модель k- $\omega$ .

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПРИРОДНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ПОМЕЩЕНИИ

Рассматривается помещение с внутренним объемом 35,5 м<sup>3</sup>. Геометрические характеристики помещения изображены на рисунке 1. Ограждающие конструкции помещения теплоизолированы. Помещение имеет проем площадью 0,64 м<sup>2</sup> (рис/ 1), который соединяет внутренний объем воздуха с объемом термостатирующей камеры.

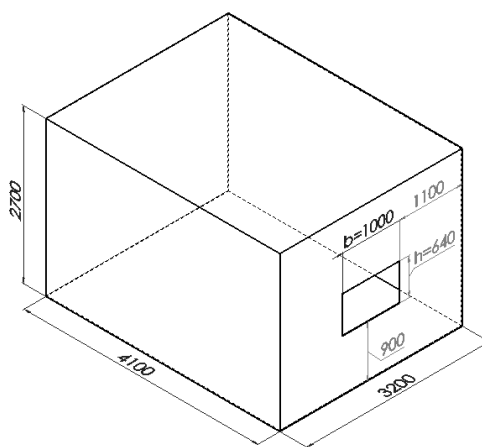
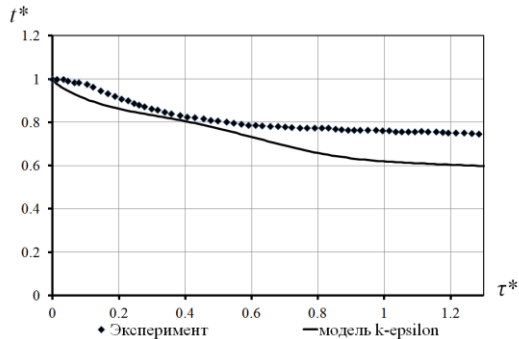


Рис. 1. Геометрические характеристики объекта исследования

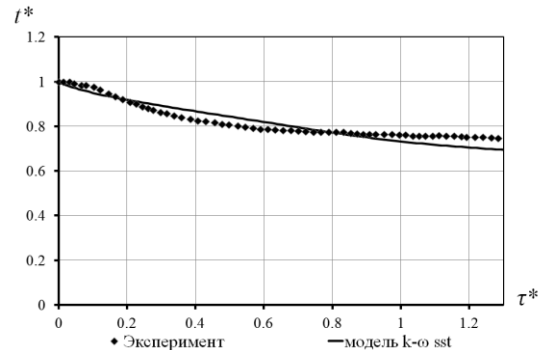
До начала эксперимента соединительный проем закрыт, разность температур между температурой воздуха в помещении и в объеме термостатирующей камеры составляет 10 °С. В момент старта эксперимента соединительный проем открывается и холодный воздух начинает поступать из термостатирующей камеры в исследуемый объект, а горячий воздух - из рассматриваемого объема в термостатирующую камеру. При этом измеряются среднеобъемная температура воздуха в помещении, а так же массообмен воздуха между помещением и термостатирующей камерой [4].

Расчетная область состоит из объема воздуха и окружающих его ограждающих конструкций толщиной 7 мм. Теплофизические свойства воздуха заданы аналогичными, что и для предыдущей задачи. Теплофизические свойства ограждающих конструкций были также заданными постоянными: плотность - 1800 кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость - 1000 Дж/(кг·К), теплопроводность - 1,2 Вт/(м·К). Рассматриваются те же модели турбулентности, что и для задачи свободной конвекции в малом замкнутом объеме воздуха. Начальное условие: равномерное распределение температурного поля по всей расчетной области, величиной в 10 °С. Граничные условия: на внешних поверхностях ограждающих конструкций задано ГУ II-ого рода  $q=0$ ; температура воздуха, поступающего из термостатирующей камеры  $t_{тс}=0$  °С, распределение статического давления описывается законом:  $P = -\rho_{возд}gh$ .

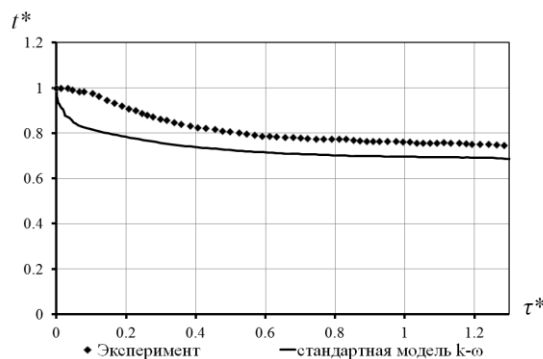
Конечно-разностная сетка была построена на основании результатов моделирования свободной конвекции в малом замкнутом объеме воздуха, рассмотренных выше. Сетка выполнена таким образом, что размеры элементов уменьшаются к внешним границам области воздуха. Количество элементов в сетке 1278900. Для сравнения результатов используются следующие приведенные величины: - нормированное время -  $\tau^* = \frac{\tau n_0}{3600}$ , где  $\tau$  - прошедшее время от начала эксперимента, с;  $n_0$  - номинальная кратность воздухообмена в момент начала эксперимента; - нормированная среднеобъемная температура воздушной среды:  $t^* = \frac{t-t_{тс}}{t_0-t_{тс}}$ , где  $t$  - среднеобъемная температура воздуха в исследуемой области в конкретный момент эксперимента,  $t_{тс}$  - температура в термостатирующей камере,  $t_0$  - среднеобъемная температура воздуха в начальный момент времени. Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований представлены на рис. 2.



а) сравнение k-ε модели с экспериментом



б) сравнение SST модели с экспериментом



в) сравнение k-ω модели с экспериментом

Рис. 2. Сравнения результатов численного моделирования и экспериментальных исследований [4]

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что наименьшее среднеквадратичное отклонение результатов моделирования от результатов экспериментальных исследований дает модель SST. Это можно объяснить, тем что модель SST правильно учитывает как отрыв пограничного слоя во внешнем течении, так и течение в пограничном слое, т.е. объединяет модели турбулентности  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$ .

## ВЫВОДЫ

В данной работе проведена верификация двопараметрических моделей турбулентности для моделирования свободной конвекции как в малом замкнутом объеме воздуха, так и естественной вентиляции в помещениях. В результате исследований конвекции в малом объеме было определено, что модели турбулентности  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$ , SST являются равнозначными и приемлемы для данного типа задач. При моделировании свободной конвекции в помещениях с естественной вентиляцией было показано, что использование моделей  $k-\omega$  и  $k-\varepsilon$  дает большую погрешность в сравнении с натурным экспериментом. Модель SST с достаточной точностью описывает свободную конвекцию как в замкнутых разомкнутых объемах воздуха, так и при естественной вентиляции помещений. Следовательно, ее применение является наиболее предпочтительным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2006. - [Чинний від 2006-09-09]. - Мінбуд України. – Київ, 2006.
2. Simulation of steady-state natural convection using cfd / [Tobias Zitzmann, Malcolm Cook, Peter Pfrommer, Simon Rees, Ljiljana Marjanovic] // Ninth International IBPSA Conference. - 2005. - P. - 1449-1456.
3. N. Alpay KUREKÇİ. An experimental and numerical study of laminar natural convection in a differentially-heated cubical enclosure / N. Alpay KUREKÇİ, Oktay OZCAN // Thermal Science and Technology, 2012.
4. Heiselberg P. Short-term airing by natural ventilation - implication on IAQ and thermal comfort / P. Heiselberg, M. Perino // Indoor Air. - 2009. - №9.
5. Launder B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence// B.E. Launder, D.B. Spalding // Academic Press. - London, England, 1972.
6. Wilcox D. Turbulence Modeling for CFD / Wilcox D. - 3rd edition // DCW Industries, Inc., La Canada CA, 2006. - 460 p.
7. Menter F.L. Improved Two-Equation  $k-\omega$  Trubulence Models for Aerodynamic Flows/ Menter F.L. // National Aeronautics and Space Administration, 1992. - 34 p.

## REFERENCES

1. Construction of buildings and structures. Thermal insulation of buildings: DBN B.2.6-31:2006. – [Valid from 2006-09-09]. - The Ministry of construction of Ukraine, Kyiv, 2006.
2. Simulation of steady-state natural convection using cfd / [Tobias Zitzmann, Malcolm Cook, Peter Pfrommer, Simon Rees, Ljiljana Marjanovic] // Ninth International IBPSA Conference. - 2005. - P. - 1449-1456.
3. N. Alpay KUREKÇİ. An experimental and numerical study of laminar natural convection in a differentially-heated cubical enclosure / N. Alpay KUREKÇİ, Oktay OZCAN // Thermal Science and Technology, 2012.
4. Heiselberg P. Short-term airing by natural ventilation - implication on IAQ and thermal comfort / P. Heiselberg, M. Perino // Indoor Air. - 2009. - №9.
5. Launder B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence// B.E. Launder, D.B. Spalding // Academic Press. - London, England, 1972.
6. Wilcox D. Turbulence Modeling for CFD / Wilcox D. - 3rd edition // DCW Industries, Inc., La Canada CA, 2006. - 460 p.
7. Menter F.L. Improved Two-Equation  $k-\omega$  Trubulence Models for Aerodynamic Flows/ Menter F.L. // National Aeronautics and Space Administration, 1992. - 34 p.

Статья поступила в редакцию 07.04.2014 г.