

М.Н. НИКИТИН

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТАХ ANSYS FLUENT, CODE SATURNE, OPENFOAM

COMPARATIVE ANALYSIS OF NUMERICAL SIMULATION OF NATURAL CONVECTION  
IN SOFTWARE PACKAGE

*Рассмотрены условия численного моделирования с использованием программных пакетов ANSYS Fluent, Code Saturne и OpenFOAM на примере задачи естественной конвекции в замкнутом объеме воздуха в присутствии нагревательного элемента. Проведен сравнительный анализ пакетов на основании трех моделей турбулентности ( $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  SST и LES), дана оценка адекватности получаемых результатов. В качестве контрольного показателя использованы экспериментальные данные о профиле температур в центральном сечении. Сделаны предположения относительно деструктивных факторов, снижающих точность решения, частично подтверждаемые результатами сравнительного анализа интенсивности конвективного перемешивания. Комбинированная модель турбулентности  $k-\omega$  SST использована для определения эффективности реализации пристеночной функции в пакетах Code Saturne и OpenFOAM для расчетной сетки с переменным безразмерным расстоянием в диапазонах  $1 < y^+ < 5$  и  $10 < y^+ < 50$ .*

**Ключевые слова:** численное моделирование, естественная конвекция, ANSYS Fluent, Code Saturne, OpenFOAM, модели турбулентности

*It is studied numerical simulation conditions using software ANSYS Fluent, Code Saturne and OpenFOAM using the example of the problem of natural convection of air in the closed volume in the presence of the heating element. A comparative analysis of packets on the basis of three turbulence models ( $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  SST and LES) is given, an assessment of the adequacy of the results is shown. As a benchmark experimental data on the temperature profile in the central section are used. Assumptions about the destructive factors that reduce the accuracy of the decision, partly confirms the results of a comparative analysis of the convective mixing intensity, are made. Combined turbulence model  $k-\omega$  SST is used to determine the effectiveness of the implementation of the wall functions in packages Code Saturne and OpenFOAM to the computational grid with a variable dimensionless distance in the range of  $1 < y^+ < 5$  and  $10 < y^+ < 50$ .*

**Keywords:** numerical simulation, natural convection, ANSYS Fluent, Code Saturne, OpenFOAM, turbulence model

#### Введение

В настоящее время широкое применение находят численные эксперименты, позволяющие получать результаты высокой точности. Для расчета гидродинамики сплошных сред с учетом теплопереноса в последнее время используются специализированные программные пакеты: ANSYS Fluent [1], OpenFOAM [2, 3], Flow Vision [4] и Code Saturne [5, 6]. При этом существует ряд программных продуктов,

позволяющих проводить оценочные расчеты в инженерных целях: Autodesk Simulation CFD [7], SimSolid [8], SolidWorks Simulation [9] и др. Однако в научных исследованиях эти продукты используются редко и в данной работе не освещаются.

Целью выполненного исследования было выявление особенностей численного моделирования нестационарного процесса естественной конвекции в замкнутом объеме и границ его применимости при использовании программных пакетов ANSYS Fluent,

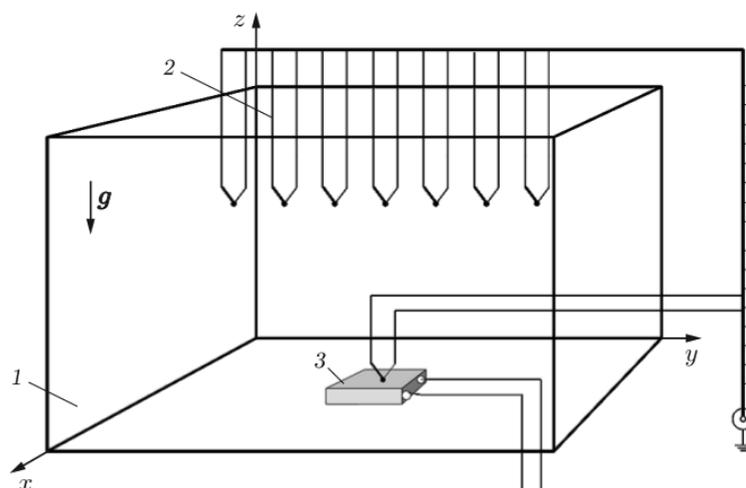


Рис. 1. Схема экспериментальной установки [10]: 1 – замкнутый объем; 2 – термопары; 3 – нагревательный элемент

OpenFOAM и Code Saturne. Объектом сравнительного анализа принят профиль температур в замкнутом объеме в заданный момент времени.

### Экспериментальное исследование

В исследовании разработаны численные модели с целью воспроизведения полученных ранее экспериментальных данных [10]. Экспериментальная установка (рис. 1) представляла собой закрытый контейнер (0,4 x 0,56 x 0,4 м) прямоугольного сечения, расположенный в помещении с температурой 18 °С. Температура воздуха в контейнере контролировалась в семи точках, равномерно распределенных по центральному продольному сечению на высоте 0,3 м, и в начальный момент времени составила 19 °С.

На дне контейнера располагался электрический нагревательный элемент (0,08 x 0,16 x 0,02 м), температура которого контролировалась в процессе эксперимента. В течение экспериментального исследования (600 с) температура поверхности нагревательного элемента находилась в следующей зависимости от времени  $\tau$ :

$$T(\tau) = 291,12 + 0,16\tau - 7,36 \cdot 10^{-8}\tau^2. \quad (1)$$

### Численное исследование

Задача решалась в трехмерной постановке. Расчетная область была ограничена внутренним пространством контейнера. Расчетная сетка (рис. 2) с локальным измельчением вблизи нагревательного элемента состояла из ~70 тыс. тетраэдров (0,001–0,01 м). Измельчение сетки вблизи стенок контейнера не производилось ввиду отсутствия значительных градиентов в пристеночных зонах. Расчетная сетка была построена на платформе Salome [11].

На стенках нагревательного элемента были заданы граничные условия первого рода на основании аппроксимации экспериментальных данных по выражению (1). Теплопотери через внешние стенки контейнера были учтены через граничные условия третьего рода (коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , температура внешней среды  $T_g = 291 \text{ К}$ ).

Моделирование проводилось с использованием усредненных по Рейнольдсу моделей турбулентности ( $k-\varepsilon$  и  $k-\omega \text{ SST}$ ) [12, 13], а также вихревого метода ( $LES$ ) [14]. Естественная конвекция описывалась в приближении Буссинеска [15, 16].

Локальное измельчение расчетной сетки вблизи нагревательного элемента позволяет снизить температурный градиент в прилежащих ячейках, что в свою очередь стабилизирует решение переноса теплоты. Между тем в области нагревательного элемента существенно сокращается безразмерное расстояние ( $1 < y^+ < 5$ ). При этом вблизи внешних стенок контейнера имеем  $10 < y^+ < 50$ .

Широкий диапазон безразмерных расстояний в расчетной области требует использования пристеночных функций не только для модели  $k-\varepsilon$ , но для комбинированной модели сдвигового переноса ( $k-\omega \text{ SST}$ ) [17]. При расчете вихревым методом использовалась модель с одним уравнением для кинетической энергии турбулентности  $k$  [18]:

$$v_i = l_v \sqrt{k} = \frac{C_D k^2}{\varepsilon},$$

где  $l_v$  – масштаб затухания турбулентной энергии;  $C_D = 0,08$  – динамический коэффициент [19, 20];  $\varepsilon$  – скорость диссипации кинетической энергии.

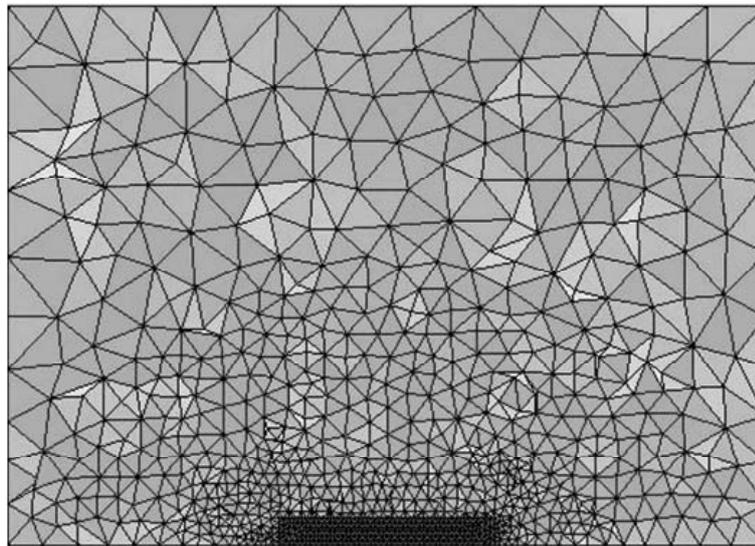


Рис. 2. Дискретизация расчетной области

Безразмерная скорость  $u^+$ , являющаяся относительной мерой поперечного переноса тепла перпендикулярно стенкам, также находится в широком диапазоне значений, что оказывает влияние на предсказание градиентов используемыми моделями турбулентности.

**Результаты моделирования**

Адекватность использованных моделей в рассматриваемых программных пакетах оценивалась по профилю температур в центральном сечении контейнера в момент времени  $\tau = 600$  с. Получен-

ные значения распределения температурных полей (рис. 3) свидетельствуют о наличии ярко выраженного «факела» над поверхностью нагревательного элемента. Температурный градиент «факела» в момент времени  $\tau = 600$  с составил порядка  $4^\circ\text{C}$  [10].

Использованная в пакете Fuent модель предназначена для развитого турбулентного течения и высоких чисел Рейнольдса. Слабая зависимость структуры восходящего потока от вязкости ограничивает локальный рост температурного профиля в зоне нагрева. Это проявляется в малом температурном градиенте ( $\Delta T = 3,5^\circ\text{C}$ ), воспроизводимом моделью

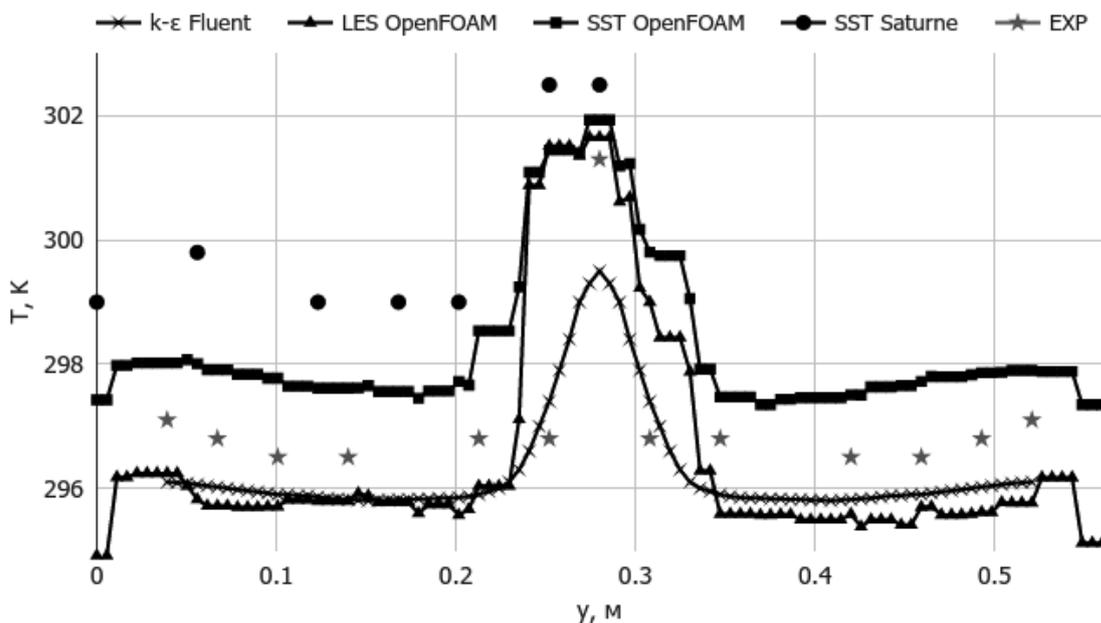
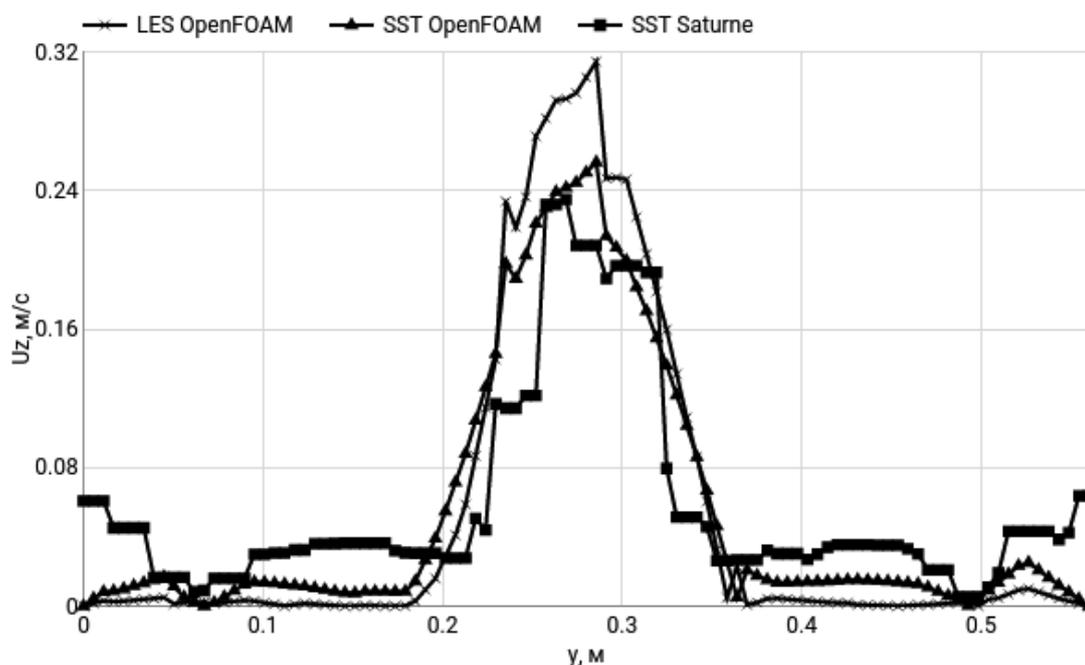


Рис. 3. Распределение температур в центральном сечении ( $z = 0,3$  м,  $x = 0,2$  м)

Рис. 4. Скоростные поля в центральном сечении ( $z = 0,3$  м,  $x = 0,2$  м)

турбулентности  $k-\epsilon$ . Общее занижение профиля температур ( $\delta T = 1,1$  °C) вызвано избыточными теплопотерями через внешние стенки, что, вероятно, стало причиной неудовлетворительной работы алгоритма пристеночной функции в условиях неоднородности распределения безразмерных величин ( $y^+$ ,  $u^+$ ).

В программном пакете OpenFOAM задача естественной конвекции в замкнутом воздушном объеме была решена по двум моделям. Вихревой метод (*LES*) показал хорошее совпадение в наивысшей точке температурного профиля при завышенном температурном градиенте ( $\Delta T = 4,5$  °C). Занижение профиля температур за пределами нагревательного элемента ( $\delta T = 1,2$  °C) вызвано упрощенной реализацией пристеночной функции в данной модели.

Комбинированная модель  $k-\omega$  SST в пакете OpenFOAM адекватно воспроизводит температурный градиент ( $\Delta T = 4$  °C) и наивысшую точку температурного профиля при общем завышении профиля температур ( $\delta T = 0,9$  °C). Характер отклонения расчетного температурного профиля от фактического позволяет рассматривать модель как адекватную, но требует детального исследования в различных условиях реализации величин  $y^+$ .

Узкоспециализированный программный пакет Code Saturne при использовании масштабируемой пристеночной функции в рамках комбинированной модели  $k-\omega$  SST дает существенное

отклонение от опытных данных. Общее завышение профиля температур ( $\delta T = 2,1$  °C) при сравнительно небольшом температурном градиенте «факела» ( $\Delta T = 3,7$  °C) свидетельствует о слабом теплоотводе через внешние стенки и медленном конвективном перемешивании.

Анализ восходящей компоненты скорости конвективного перемешивания над нагревательным элементом подтверждает гипотезу о неудовлетворительном разрешении теплопередачи вблизи внешних стенок в пакете Code Saturne. Сопоставимые профили скоростных полей моделей  $k-\omega$  SST в пакетах OpenFOAM и Code Saturne свидетельствуют об этом (рис. 4).

**Выводы.** Анализ результатов моделирования естественной конвекции в замкнутом объеме в различных прикладных программных пакетах показал существенные различия в решении пристеночного слоя, что повлияло на рассматриваемый центральный профиль температур. Несмотря на применение одинаковых моделей, пакет Code Saturne в первом приближении показал неадекватное решение в рассматриваемом сечении в противоположность пакету OpenFOAM. Таким образом, можно сделать вывод о малой эффективности масштабируемых пристеночных функций при решении в пакете Code Saturne, который дает хорошую сходимость только при равномерном распределении безразмерных параметров расчетной сетки по объему расчетной области.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. HP Workstations and ANSYS: Business White Paper. HP Development company, 2014.
2. OpenFOAM. URL: <http://www.openfoam.com> (дата обращения: 25.12.2015).
3. Robertson E. et al. Validation of OpenFOAM numerical methods and turbulence models for incompressible bluff body flows. *Computers & Fluids*. 2015. № 123. Pp. 122–145.
4. FlowVision. URL: <http://flowvision.ru> (дата обращения: 25.12.2015).
5. Code\_Saturne. URL: <http://code-saturne.org/cms> (дата обращения: 25.12.2015).
6. Code\_Saturne 2.0 // Code\_Saturne User Meeting, 2009. URL: [http://cfd.mace.manchester.ac.uk/twiki/pub/Aster/WebHome/Monfort\\_-\\_Code\\_Saturne\\_2.0.pdf](http://cfd.mace.manchester.ac.uk/twiki/pub/Aster/WebHome/Monfort_-_Code_Saturne_2.0.pdf) (дата обращения: 25.12.2015).
7. Autodesk Simulation CFD. URL: <http://autodesk.ru/simulationcfd> (дата обращения: 25.12.2015).
8. SimSolid. URL: <http://simsolid.com> (дата обращения: 25.12.2015).
9. SolidWorks Simulation. URL: <http://solidworks.com/sw/products/simulation/simulation.htm> (дата обращения: 25.12.2015).
10. Кузнецов Г.В. и др. Естественная конвекция в замкнутом параллелепипеде при наличии локального источника энергии // *Прикладная механика и техническая физика*. 2013. № 4. С. 86–95.
11. SALOME Platform. URL: <http://salome-platform.org> (дата обращения: 25.12.2015).
12. Кузьминов А.В. и др. Метод расчета турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе двухслойной  $k-\epsilon$  модели // *Вычислительные технологии*. 2001. №5. С. 73–86.
13. Чжен К.Ю. Расчет течений в каналах и пограничных слоях на основе модели турбулентности, применимой при низких числах Рейнольдса // *Ракетная техника и космонавтика*. 1982. № 2. С. 30–37.
14. Abkar M., Porte-Agel F. A new boundary condition for large-eddy simulation of boundary-layer flow over surface roughness transitions // *Journal of Turbulence*, 2012. № 23. pp. 165–173.
15. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Физматлит, 1994. 436 с.
16. Цынаева А.А. Моделирование задач теплообмена и гидрогазодинамики с помощью свободного программного обеспечения // *Вестник УлГТУ*. 2014. № 68. С. 42–45.
17. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. О возможности регулирования тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры с локальным источником тепла за счет естественной конвекции // *Микроэлектроника*. 2010. № 6. С. 452–467.
18. Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. Los Angeles: DCW Industries, 2006. 522 p.
19. Emmons H. W. The laminar-turbulent transition in a boundary layer // *Journal of Aero Science*. 1951. №18. Pp. 490–498.
20. Глушко Г.С. Турбулентный пограничный слой на плоской пластине в несжимаемой жидкости // *Изв. АН СССР. Механика*. 1965. №4. С. 56–71.

Об авторе:

**НИКИТИН Максим Николаевич**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции  
Самарский государственный архитектурно-строительный университет  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194,  
тел. 8(846)337-80-89  
E-mail: [nikitin-pro@mail.ru](mailto:nikitin-pro@mail.ru)

**NIKITIN Maksim N.**

PhD in Engineering Science, Associate Professor  
of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair  
Samara State University of Architecture and Civil Engineering  
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 194,  
tel. 8(846)337-80-89  
E-mail: [nikitin-pro@mail.ru](mailto:nikitin-pro@mail.ru)

Для цитирования: *Никитин М.Н.* Сравнительный анализ численного моделирования естественной конвекции в программных пакетах ANSYS Fluent, Code Saturne, OpenFOAM // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2016. №2(23). С. 124–128. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.02.22.

For citation: *Nikitin M.N.* Comparative analysis of numerical simulation of natural convection in software package // *Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture*. 2016. №2(23). Pp. 124–128. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.02.22.