

Д.О. КОРТЯЕВА
М.Н. НИКИТИН

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

NUMERICAL STUDY OF NATURAL CONVECTION IN ENCLOSED VOLUME

Проведено численное исследование естественной конвекции в программном комплексе Code Saturne. Разработана численная модель на базе комбинированной модели турбулентности. Получены результаты моделирования естественной конвекции в замкнутом объеме воздуха по двум вариантам указания граничных условий третьего рода: по тепловому потоку и по коэффициенту теплоотдачи. Задача решена в нестационарной постановке с использованием типового алгоритма сопряжения давления и скорости. Дана оценка адекватности примененной модели по профилю температур в центральном сечении расчетной области. Сделаны предположения относительно деструктивных факторов, снижающих точность решения. Предположения частично подтверждаются результатами сравнительного анализа интенсивности конвективного перемешивания, выполненного на основании полученных профилей скоростей восходящих потоков нагретого воздуха.

Ключевые слова: численное моделирование, естественная конвекция, Code Saturne, OpenFOAM, модель турбулентности

Введение

Основным средством отопления жилых и административных помещений в зимний период являются отопительные приборы конвекторного типа. В 2013 г. профессор Т.А. Дацюк [1] методом численного эксперимента доказал эффективность использования конвекторов. Стандарты регламентируют точки размещения отопительных приборов, а также их мощность в соответствии с типовыми проектами [2–4]. Однако типовые проекты часто требуют адаптации под фактические условия эксплуатации и требования интерьерных решений. Подобная адаптация легко реализуется с использованием полуэмпирических зависимостей [3, 4], а также специализированных программных продуктов (Valtec, Herz и др).

A numerical study of natural convection was conducted with Code Saturne soft ware package. A numerical model based on combined $k-\omega$ SST turbulence model was developed. The results of simulation of natural convection in enclosed volume of air were obtained in two variants of boundary conditions specification: by heat flux and by heat transfer coefficient. The problem was solved in a non-stationary formulation using a pressure-velocity coupling algorithm PISO. This simulation model adequacy is evaluated. Experimental data on the temperature profile in the central section is used as a benchmark criteria. Assumptions about the destructive factors reducing the accuracy of the solution, are partly supported by the results of comparative analysis of the intensity of convective mixing. Assumptions partially confirmed by the results of comparative analysis of the intensity of convective mixing, performed on the basis of upward velocity profiles for the heated air.

Keywords: numerical simulation, natural convection, Code Saturne, OpenFOAM, turbulence model $k-\omega$ SST

В условиях сложных интерьерных решений (декорированные студии, многоуровневые помещения), а также при повышенных требованиях к микроклимату (серверные, оранжереи) укрупненных расчетов, как правило, недостаточно. В этих случаях может быть использовано численное моделирование движения воздуха в проектируемом помещении с учетом всех его особенностей.

Естественная конвекция при незначительных перепадах температур успешно описывается в приближении Буссинеска [5–9]. Данный метод подразумевает линейную зависимость плотности от температуры в условиях несжимаемой среды, что существенно упрощает решение [10, 11].

Цель проведенного исследования – определение оптимальных граничных условий для моделирования естественной конвекции воздуха в помещении. Объектом исследования являлся профиль температур в замкнутом объеме в заданный момент времени. В настоящей работе использована полученная ранее зависимость профилей скоростей и температур в условиях естественной конвекции от абсолютных габаритов рассматриваемой области [12].

Экспериментальное исследование

В основу разработанной численной модели были положены экспериментальные данные, полученные профессором М.А. Шереметом [13]. Экспериментальная установка (рис. 1) представляла собой закрытый контейнер (0,4х0,56х0,4 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.

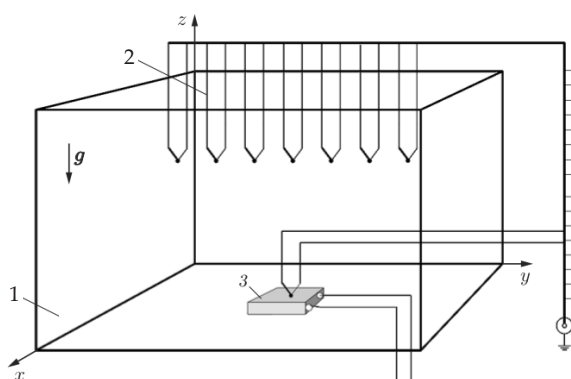


Рис. 1. Схема экспериментальной установки [13]:
1 – замкнутый объем; 2 – термодатчики;
3 – нагревательный элемент

На дне контейнера располагался электрический нагревательный элемент (0,08 х 0,16 х 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 τ :

$$T(\tau) = 291.12 + 0.16\tau - 7.36 \cdot 10^{-5}\tau^2. \quad (1)$$

Численное исследование

Задача решалась в трехмерной постановке. Расчетная область была ограничена внутренним пространством контейнера. Расчетная сетка (рис. 2)

с локальным измельчением вблизи нагревательного элемента (до 0,0001 м) состояла из ~70 тыс. тетраэдров (0,001 – 0,05 м). Измельчение сетки вблизи стенок контейнера не производилось ввиду отсутствия значительных градиентов в пристеночных зонах. Расчетная сетка была построена на платформе Salome [14, 15].

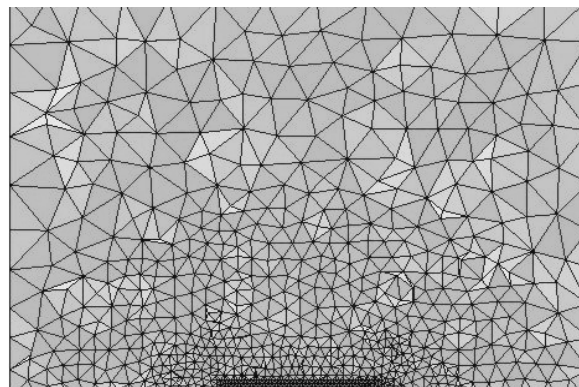


Рис. 2. Дискретизация расчетной области

Задача решалась в двух постановках граничных условий на стенках контейнера. В первом случае теплопотери учитывались через коэффициент теплоотдачи ($\alpha = 5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$) и температуру внешней среды ($T_e = 291 \text{ К}$) [13]. Во втором случае был задан тепловой поток ($q = 7 \text{ Вт/м}^2$). Заданный тепловой поток является эквивалентом принятому в первом случае коэффициенту теплоотдачи и был введен для оценки степени применимости данных граничных условий.

Сравнительный анализ граничных условий третьего рода был построен на комбинированной модели турбулентности $k-\omega$ SST [11, 16, 17]. В отсутствие призматических слоев вдоль стенок контейнера и нагревательного элемента была использована пристеночная функция [11, 16]. Она позволила получить решение в пристеночном вязком слое и в буферной зоне. Решение проводилось в программном пакете Code Saturne [15].

Максимальная точность решателя была ограничена на уровне 10^{-6} для скорости и 10^{-5} для давления. Базовая точность решателя не превышала 10^{-5} при максимальном количестве итераций 10000. Стабилизация решателя достигалась релаксацией шаговых отклонений на уровне 0,7 [16]. Уравнение неразрывности было связано с уравнением момента по алгоритму PISO [11], который обеспечивает быструю сходимость решения для такого рода задач.

Результаты моделирования

Адекватность использованной модели оценивалась по профилю температур в центральном

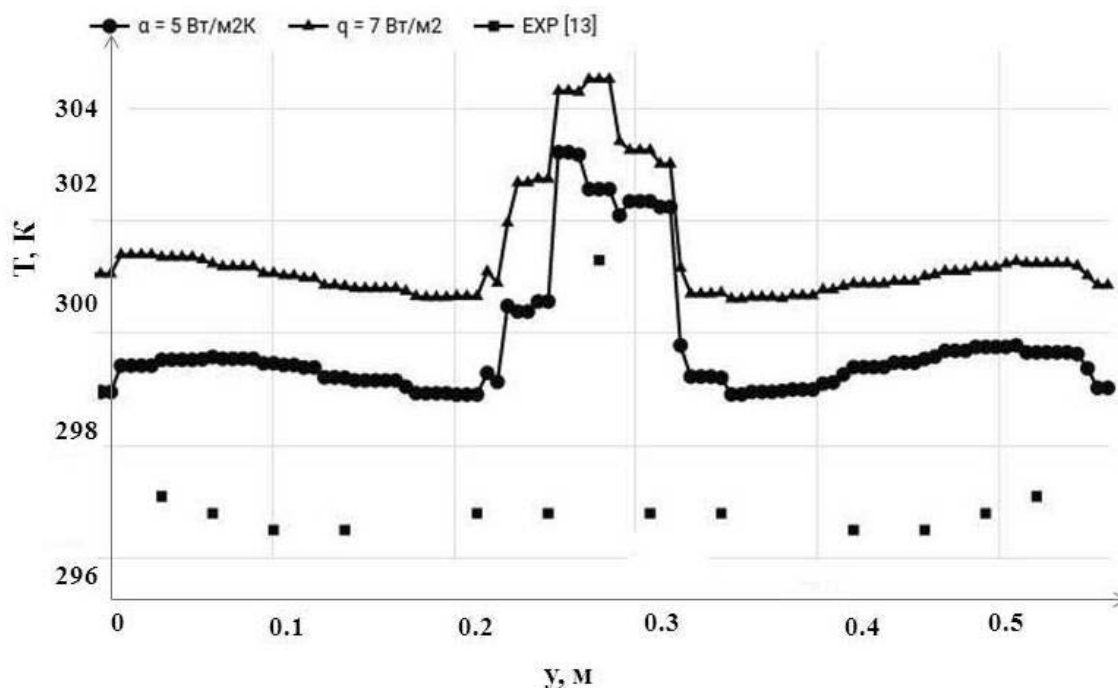


Рис. 3. Распределение температур в центральном сечении ($z = 0,3$ м, $x = 0,2$ м)

сечении контейнера в момент времени $\tau = 600$ с. Полученные значения распределения температурных полей (рис. 3) можно считать адекватными с позиции качественного воспроизведения результатов эксперимента. Об этом свидетельствует наличие

ярко выраженного градиента температур («факела») над поверхностью нагревательного элемента.

Температурный градиент «факела» в момент времени $\tau = 600$ с составил порядка 4°C [10]. Рассматриваемая модель полностью воспроизводит темпе-

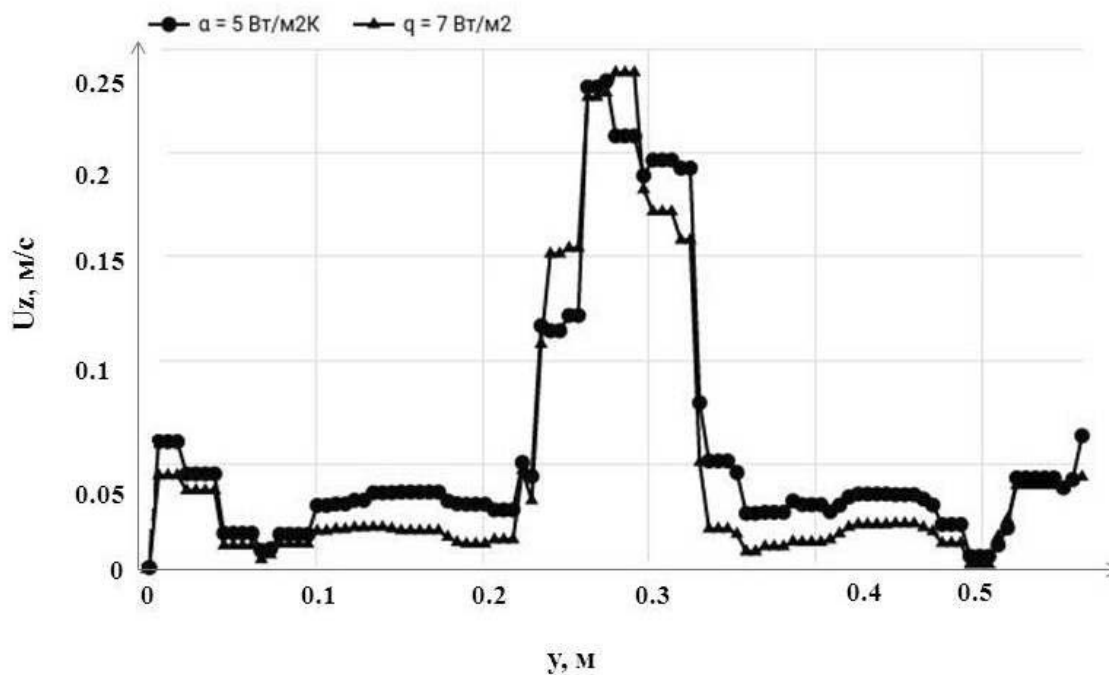


Рис. 4. Скоростные поля в центральном сечении ($z = 0,3$ м, $x = 0,2$ м)

ратурный градиент 4°C при указании теплопотерь через коэффициент теплоотдачи (см. рис. 3). Удельный тепловой поток в качестве граничного условия на теплоотводящей стенке менее эффективен и обеспечивает градиент порядка $3,6^{\circ}\text{C}$.

В то же время рассчитанные абсолютные значения температур в рассматриваемом сечении значительно завышены относительно экспериментальных данных (см. рис. 3). Превышение абсолютных температур достигает 3°C при $a = 5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ и 4°C при $q = 7 \text{ Вт/м}^2$. Это свидетельствует о недостаточном теплоотводе через границы расчетной области.

Профили скоростей восходящих потоков в центральном сечении (рис. 4) находятся в согласовании для всех рассмотренных случаев, что свидетельствует об отсутствии заметного влияния эффективности теплоотвода на интенсивность конвективного перемешивания в приближении Буссинеска. Однако отсутствие опытных данных по распределению скоростей в расчетной области не позволяет проводить оценку адекватности примененной модели по скоростному критерию.

Выводы. Полученные результаты моделирования естественной конвекции в замкнутом объеме показали корректное воспроизведение характера изменения температурного профиля над нагревательным элементом. При этом расчетные температурные поля находятся в заметном согласовании с опытными данными по абсолютным значениям температур. Поскольку распределение температур в значительной степени зависит от теплопотерь через границы расчетной области, можно сделать заключение о некорректной интерпретации принятых граничных условий. Заимствованное у авторов экспериментального исследования значение коэффициента теплоотдачи не обеспечило достаточную интенсивность теплоотвода в рамках реализации рассмотренной расчетной модели.

Между тем расчетные профили температур имеют градиенты, которые находятся в хорошем соответствии с опытными данными. Кроме того, скоростные поля свидетельствуют о согласовании двух вариантов решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дацюк Т.А., Ивлев Ю.П., Пухкал В.А. Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 6. С. 12–21.
2. Карташова А.О., Кортяева Д.О., Кулясова К.Е., Цынаева А.А. Исследование работы сплит-системы

в режиме подогрева (тепловой насос) // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. № 1(18). С. 90–99. DOI:10.17763/Vestnik.2015.01.14.

3. АВОВ 8-2005. Руководство по расчету теплопотребления эксплуатируемых жилых зданий. М.: Изд-во НП «АВОК», 2005. 45 с.

4. СП 54.13330.2010. Здания жилые многоквартирные. Введ. 1.10.2003. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.

5. Никитин М.Н. Исследование теплообмена с жидкой фазой в кольцевом канале охлаждающего корпуса смесительного теплогенератора // Тепловые процессы в технике. 2013. № 5(9). С. 404–410.

6. 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.

7. Valencia L. Turbulent Rayleigh–Benard convection of water in cubical cavities: A numerical and experimental study // Int. J. Heat Mass Transfer. 2007. № 50. Pp. 3203–3215.

8. Цынаева А.А. Численное исследование температурной стратификации // Автоматизация процессов управления. 2014. №2. С. 62–66.

9. Никитин М.Н. Адаптация геометрии ошпированных поверхностей для создания расчетной сетки // Порядковый анализ и смежные вопросы математического моделирования: Тез. докл. XII Междунар. науч. конф. Владикавказ: ЮМИ ВНЦ РАН, 2015. С. 209–210.

10. Никитин М.Н., Цынаева А.А. Численное исследование теплообмена для поверхностей с особенностями // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Тез. докл. XX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук. ак. РАН А.И. Леонтьева. Звенигород: Изд-во МЭИ, 2015. С. 283–284.

11. Nikitin M.N., Tsinaeva A.A. Numerical study of temperature stratification and isothermal gas pressure regulator on its basis // Proceedings of XIV European Conference on Turbulence. France, Lyon, 2013.

12. Tsinaeva A.A., Tsynaeva E. A. The Technology of Isothermal Pressure Regulation of Natural Gas Based on Temperature Stratification // Procedia Engineering. 2015. Pp. 783–788.

13. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Естественная конвекция в замкнутом параллелепипеде при наличии локального источника энергии // Прикладная механика и техническая физика. 2013. № 4. С. 86–95.

14. SALOME Platform. URL: <http://salome-platform.org> (дата обращения: 25.12.2015).

15. Code_Saturne. URL: <http://code-saturne.org/cms> (дата обращения: 25.12.2015).

16. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. Los Angeles: DCW Industries, 2006. 522 p.

17. Цынаева А.А., Цынаева Е.А. Моделирование задач теплообмена и гидрогазодинамики с помощью свободного программного обеспечения // Вестник УлГТУ. 2014. № 68. С. 42–45.

Об авторах:

КОРТЯЕВА Дарья Олеговна

магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
Самарский государственный архитектурно-строитель-
ный университет
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: kor-ti@yandex.ru

НИКИТИН Максим Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазос-
набжения и вентиляции
Самарский государственный архитектурно-строитель-
ный университет
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: nikitin-pro@mail.ru

KORTYAEVA Darya O.

Master's Degree Student of the Heat and Gas Supply and
Ventilation Chair
Samara State University of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: kor-ti@yandex.ru

NIKITIN Maxim 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 str., 194
E-mail: nikitin-pro@mail.ru

Для цитирования: *Кортяева Д.О., Никитин М.Н.* Численное исследование естественной конвекции в замкнутом объеме // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. №3(24). С. 146-150. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.24.
For citation: *Kortyaeva D.O., Nikitin M.N.* Numerical study of natural convection in inclosed volume // Vestnik SGASU. Town Plan-
ning and Architecture. 2016. №3(24). Pp. 146-150. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.24.