

**ПРОЧИЕ ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ / OTHER QUESTIONS RELATED TO CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2017.08.3>

Никитин М.Н.<sup>1</sup>, Мазынская С.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-2535-6076, Кандидат технических наук, <sup>2</sup>студент, Самарский государственный технический университет

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ НА КАЧЕСТВО РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Аннотация*

*В данной работе представлены результаты численного моделирования замкнутого объема с приточно-вытяжной системой. Показана зависимость результатов от размеров расчетной сетки. Целью данного исследования было определение влияния параметров расчетной сетки на точность результатов численных исследований. В качестве расчетной области был выбран замкнутый объем с локальным источником тепла, моделирующим осветительный прибор. Задача решена в стационарной постановке с использованием модели турбулентности *k-omega SST*. Получены распределения температуры для пяти расчетных сеток различного размера. Статистическая обработка результатов моделирования производилась с помощью графиков нормального распределения.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, расчетная сетка, нормальное распределение, теплообмен.

Nikitin M.N.<sup>1</sup>, Mazynskaya S.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-2535-6076, PhD in Engineering, <sup>2</sup>Student, Samara State Technical University

**STATISTICAL EVALUATION OF INFLUENCE OF PARAMETERS OF COMPUTATION GRID ON QUALITY OF NUMERICAL MODELING RESULTS**

*Abstract*

*The results of numerical simulation of a closed volume with a supply and exhaust system are presented in this paper. The dependence of results on the size of the computation grid is shown as well. The purpose of this study is to determine the influence of grid parameters on the accuracy of the results of numerical studies. A closed volume with a local heat source simulating the lighting device was chosen as a design area. The problem is solved in a stationary formulation using the *k-omega SST* turbulence model. Temperature distributions were obtained for five computation grids of various sizes. The statistical processing of simulation results was performed using graphs of normal distribution.*

**Keywords:** numerical simulation, computation grid, normal distribution, heat exchange.

**Email авторов / Author email:** [mazynskayasofya@gmail.com](mailto:mazynskayasofya@gmail.com)

**В** представленной работе проводится исследование влияния качества сетки на точность измерений. Численное моделирование проводилось в замкнутом объеме (1x1x1 м), рабочее тело - воздух. В данном объеме имеется источник тепла, находящийся на верхней стенке расчетной области, размером 0.1 м x 0.4 м. Подача воздуха производится через отверстие 0,3x0,3 м в боковой стене. Удаление воздуха происходит через отверстие 0,15x0,15 м на противоположной стене (рис.1). Задание всех начальных условий и расчет производились в свободном программном комплексе Code Saturne [1].

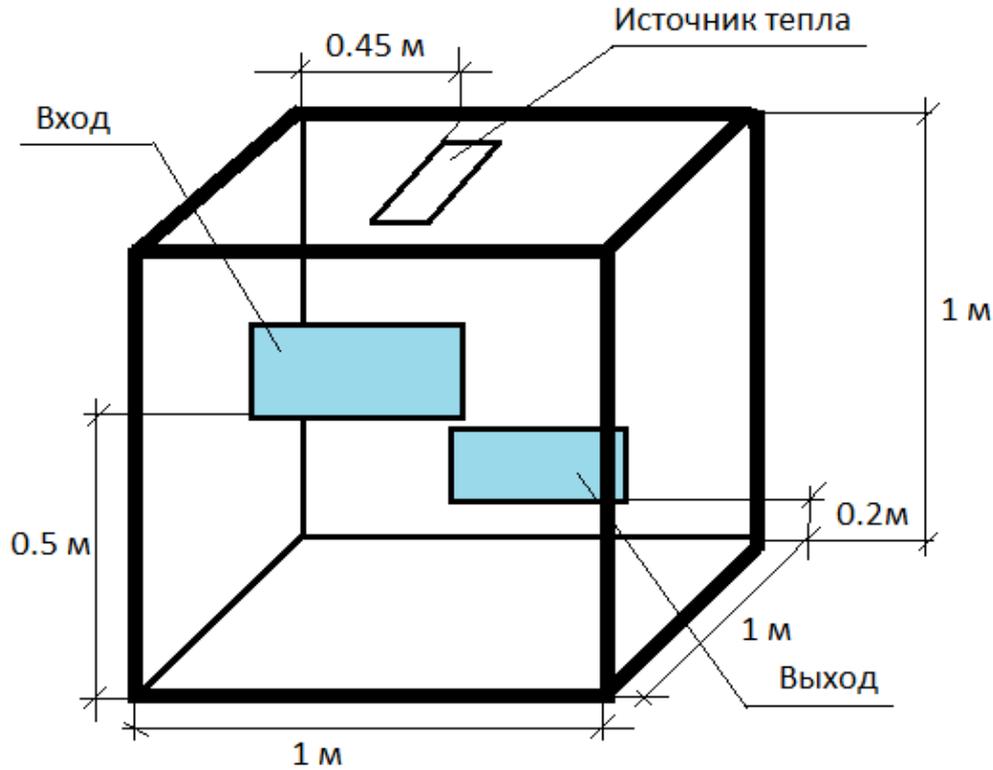


Рис. 1 - Схема расчетной области

Исходя из цели исследования для геометрии расчетного объема были созданы 5 структурированных сеток с переменным размером ячейки (рис.2). Сетки построены экструзионным методом в программном комплексе Salome[2].

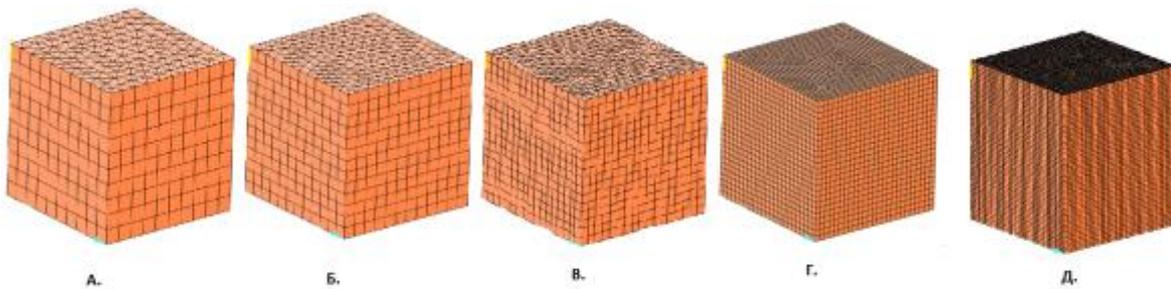


Рис. 2 - Расчетные сетки: а – 3233 ячейки ( $M_1$ ); б – 5902 ячейки ( $M_2$ ); в – 13254 ячейки ( $M_3$ ); г – 41626 ячеек ( $M_4$ ); д – 308144 ячейки ( $M_5$ )

Течение имеет турбулентный характер ( $Re=20000$ ) вблизи отверстия для подачи воздуха, численная модель решена в стационарном режиме с использованием модели турбулентности  $k$ - $\omega$  SST. Данная модель является промышленным стандартом численного моделирования и позволяет получать стабильное решение для всех случаев расчета [8]. Учитывая относительный размер ячеек расчетной сетки, вихревые модели (LES) не рассматривались.

В качестве начального условия была принята температура внутреннего воздуха ( $T=20^{\circ}C$ ). Скорость подаваемого воздуха 1 м/с. Граничные условия для поверхности нагрева заданы тепловым потоком – 500 Вт/м<sup>2</sup>. Ввиду отсутствия значительных градиентов температуры в рассматриваемом объеме, были заданы постоянные термодинамические свойства среды (воздуха) при начальной температуре ( $T_0 = 20^{\circ}C$ ). За исключением плотности, которая была задана в зависимости от температуры по закону идеального газа [11].

Учитывая удовлетворительное качество сетки, градиенты рассчитывались итерационным методом с учетом неортогональностей. Ввиду малой вероятности возникновения скачкообразных перепадов давления его корректировка путем комбинирования уравнений сохранения импульса и неразрывности не использовалась [9]. Для стабилизации решения был активирован алгоритм учета градиентов и дивергенции при решении уравнения сохранения импульса. Релаксация решателя по давлению не использовалась ( $R = 1$ ). Задача решалась в псевдо-стационарной постановке с использованием модифицированного полунявной метода решения уравнений Навье-Стокса (SIMPLEC) [4] с увеличенным предельного числа Куранта ( $Cr_{max} = 5$ ). Для снижения вычислительной нагрузки при решении линейных уравнений были введены пороговые значения точности ( $10^{-6}$ ) и количества субитераций (10000).

Уравнения движения и энергии решались методом дискретизации второго порядка (SOLU) без деградации [8]. Уравнения турбулентности ( $k$ ,  $\omega$ ) решались методом дискретизации первого порядка (Upwind) [8]. Поскольку в расчете была использована неортогональная сетка, проводилась корректировка баланса. Для стабилизации решения уравнения энергии был ограничен диапазон допустимых температур: 20...100 °С.

Продолжительность численного эксперимента была определена на основании кратности воздухообмена и составила  $\tau = 10$  с. Временной шаг задавался динамически из условия обеспечения максимумов чисел Куранта и Фурье ( $Ct < 5$ ,  $F < 1000$ ), однако динамическое уменьшение временного шага не потребовалось. Общее количество итераций составило 1000 для всех расчетных случаев.

При обработке данных были выделены линии по 100 точек в трех разных областях объема, показывающие распределение тепла от нагретого тела. Первая область располагается по всей длине объема в середине плоскости источника тепла, параллельно оси  $Y$ . Вторая серия данных выделена также, как и в первом варианте, но параллельно оси  $X$ . Третья область данных бралась по всей высоте объема, серия точек начинается от центра верхней части параллельно оси  $Z$ . В связи с установлением течения в объеме все линии данных были взяты на последнем шаге расчета.

Анализ качества полученных результатов проводился на основании статистического анализа. Оценивалась нормальность распределения ошибок решения для сеток  $M_1...M_4$ , при этом ошибки определялись как арифметические отклонения от эталонных значений  $u_0$ :  $R_i = u_i - u_0$ . Отклонения  $R$  для каждой сетки  $M_1...M_4$  были определены в трех сериях, вдоль линий, описанных выше. В качестве эталонных были приняты значения для наиболее мелкой сетки  $M_5$  в силу особенностей реализации метода конечных объемов [10].

Таким образом, было сформировано четыре пары расчетных сеток, которые сравнивались по трем сериям распределения температуры вдоль ортогональных прямых с разрешением 100 точек. В качестве инструмента качественной оценки нормальности распределения отклонений  $R$  был использован график нормального распределения квантиль-квантиль [6]. Суть данного метода оценки качества решения основывается на предположении о нормальности распределения ошибок вычисления в отсутствие зависимости от внешних факторов. Другими словами, полученные в результате моделирования ошибки должны соответствовать Гауссову распределению [7].

График нормального квантиль-квантиль [3] показывает распределение фактических отклонений относительно нормально распределенных значений. В идеализированном представлении график имеет вид биссектрисы, проходящей через начало координат. Реальные значения отклонений составляют искаженные распределения, которые удобно анализировать с помощью графиков нормального распределения (рис. 3-4).

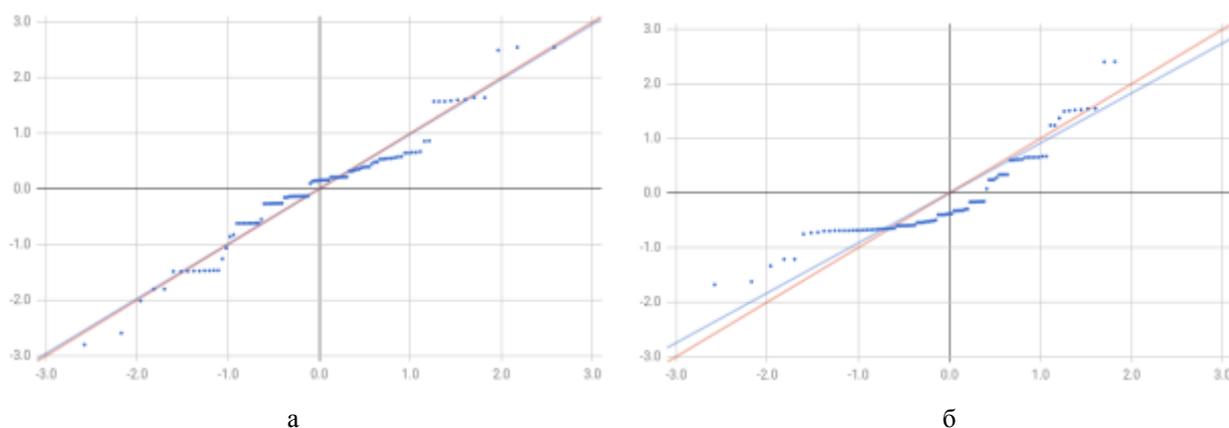


Рис. 3 - Графики нормального распределения для серии данных вдоль нагреваемой поверхности для сетки  $M_1$  (а), для сетки  $M_2$  (б)

Представленные на рис. 3 распределения показывают в целом нормальное распределение отклонений для расчетных сеток  $M_1$  (рис. 3а) и  $M_2$  (рис. 3б). Очевидно, что для сетки  $M_2$  характерно квадратичное искажение со сдвигом вправо, что свидетельствует о значительном разбросе температуры при использовании сетки  $M_2$ . При этом линейная аппроксимация соответствует нормальному распределению, т.е. средняя температура серии находится в пределах ожидания [7]. Графики нормального распределения для серии данных вдоль нагреваемой поверхности для сеток  $M_4$  и  $M_5$  показывают схожий характер распределения. Поэтому для серии данных вдоль нагреваемой поверхности справедливо утверждение о нормальности распределения полученных отклонений.

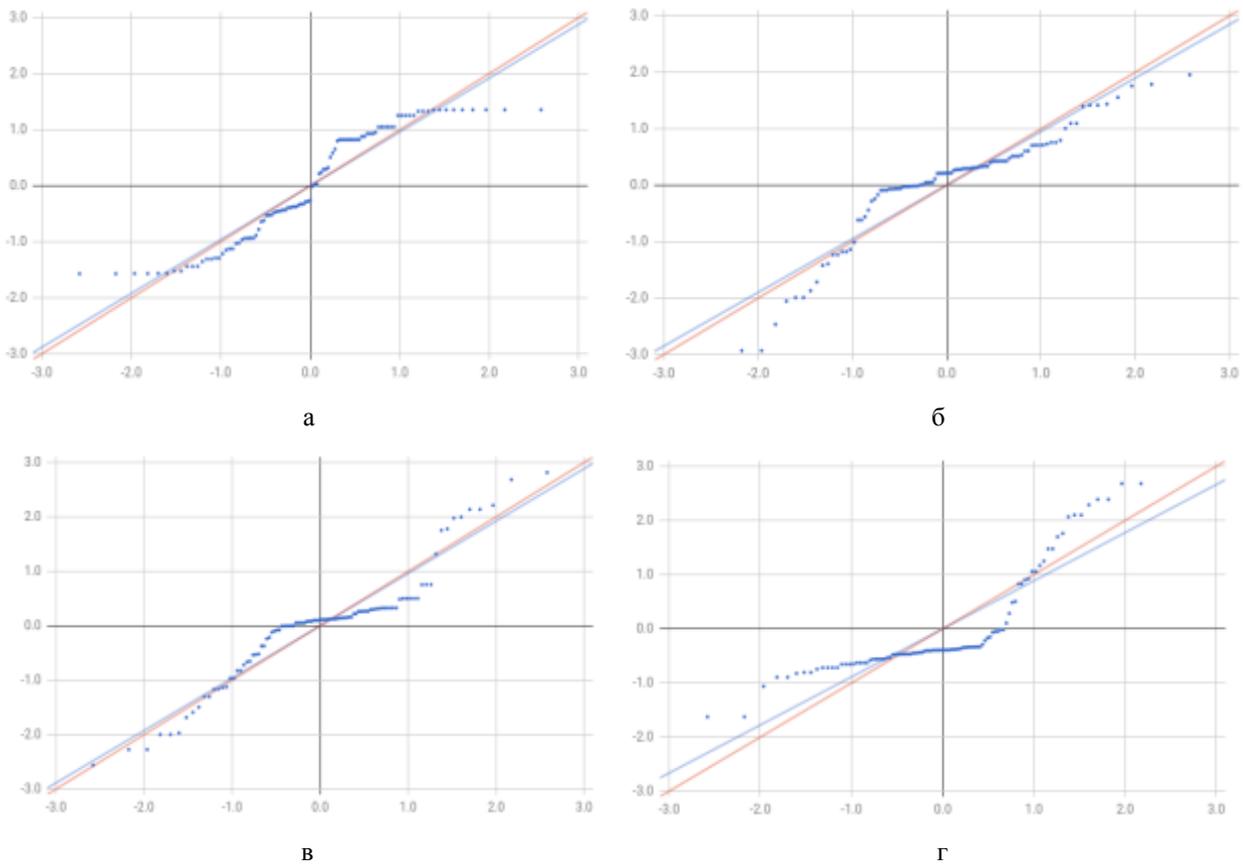


Рис. 4 - Графики нормального распределения для серии данных поперек нагреваемой поверхности для сетки  $M_1$  (а); для сетки  $M_2$  (б); для сетки  $M_3$  (в); для сетки  $M_4$  (г)

Характер зависимости нормальности распределения отклонений от размеров сетки для серии данных поперек нагреваемой поверхности (рис. 4) значительно отличается от рассмотренного выше. Наиболее стабильные результаты были получены для сеток  $M_2$  (рис. 4б) и  $M_3$  (рис. 4в). Наиболее грубая сетка  $M_1$  показала симметричные отклонения от нормальности (короткие “хвосты”), которые свидетельствуют об отсутствии значительных отклонений от эталонных результатов. Сетка  $M_4$  (рис. 4г) показывает несимметричное искажение, которое свидетельствует о значительных отклонениях температуры от эталонных значений, однако средняя температура серии находится в пределах ожидания.

Распределение вдоль вертикально ориентированной серии данных в значительной степени отличается от ожидаемого нормального, со значительным отклонением вправо.

Получены результаты численного моделирования относительно линий находящихся на потолке, все варианты сеток дают удовлетворительные результаты. При этом, распределение температуры по вертикали значительно отличается от эталонного значения для всех рассмотренных сеток. Результат моделирования конвективного перемешивания в значительной степени зависит от объема ячейки, что дало несоответствие данных взятых по вертикали.

#### Список литературы / References

1. Code\_Saturne. URL: <http://code-saturne.org> (дата обр. 22.07.2017 г.)
2. Cover Thomas M. Elements of Information Theory. — John Wiley and Sons, 2006. — P. 254.
3. Chambers, John, William Cleveland, Beat Kleiner, and Paul Tukey, (1983), Graphical Methods for Data Analysis, Wadsworth
4. Ferziger J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics. — Springer-Verlag, 2001.
5. SALOME. The open source integration platform for numerical simulation. URL: <http://www.salome-platform.org/> (дата обр. 22.07.2017 г.)
6. Thode, Henry C. (2002), Testing for normality, New York: Marcel Dekker
7. NIST Sematech. Engineering statistics. URL: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/normprpl.htm> (дата обр. 22.07.2017 г.)
8. Волков К., Емельянов В. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – Litres, 2017.
9. Никитин М. Н. Сравнительный анализ численного моделирования естественной конвекции в программных пакетах ANSYS Fluent, Code Saturne и OpenFOAM // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. Т. 2, № 23. С. 124--128.
10. Патанкар С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. М.: Издательство МЭИ, 2003. 312 с.

11. Стромберг А. Г., Семченко Д. П. Физическая химия. М.: Высшая школа, 2009. 527 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Code\_Saturne. URL: <http://code-saturne.org> (reference date — July 22, 2017)
  2. Cover of Thomas M. Elements of Information Theory. - John Wiley and Sons, 2006. - P. 254.
  3. Chambers, John, William Cleveland, Beat Kleiner, and Paul Tukey, (1983), Graphical Methods for Data Analysis, Wadsworth
  4. Ferziger J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics. - Springer-Verlag, 2001.
  5. SALOME. The open source integration platform for numerical simulation. URL: <http://www.salome-platform.org/> (date of July 22, 2017)
  6. Thode, Henry C. (2002), Testing for normality, New York: Marcel Dekker
  7. NIST Sematech. Engineering statistics. URL: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/normprpl.htm> (date of July 22, 2017)
  8. Volkov K., Emelyanov V. Modelirovaniye krupnykh vikhrey v raschetakh turbulentnykh techeniy [Modeling of Large Vortices in Calculations of Turbulent Flows] - Litres, 2017. [In Russian]
  9. Nikitin M.N. Sravnitelniy analiz chislennogo modelirovaniya estestvennoy konveksii v prgrammnykh paketakh ANSYS Fluent, Code Saturne и OpenFOAM [Comparative Analysis of Numerical Modeling of Natural Convection in Software Packages ANSYS Fluent, Code Saturne and OpenFOAM] // Bulletin of SASU. Urbanism and architecture. 2016. Vol. 2, No. 23. P. 124–128. [In Russian]
  10. Patankar S.V. Chislennoye resheniye zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh. [Numerical Solution of Problems of Heat Conduction and Convective Heat Transfer during Flow in Channels.] M.: Publishing house MPEI, 2003. 312 p. [In Russian]
  11. 11. Stromberg A.G., Semchenko D.P. Fizicheskaya khimiya [Physical Chemistry.] Moscow: Higher School, 2009. 527 p. [In Russian]
- 
-