

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ 2D И 3D МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ  
КОНВЕКЦИИ И ТЕПЛООВОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАМКНУТЫХ  
ОБЛАСТЯХ**

И.В. Мирошниченко

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. М.А. Шеремет

Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: [miroshnichenko@mail.tsu.ru](mailto:miroshnichenko@mail.tsu.ru)**COMPARATIVE ANALYSIS OF 2D AND 3D MODELS OF TURBULENT NATURAL  
CONVECTION AND THERMAL SURFACE RADIATION IN CLOSED AREAS**

I.V. Miroshnichenko

Scientific Supervisor: Prof., Dr. M.A. Sheremet

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: [miroshnichenko@mail.tsu.ru](mailto:miroshnichenko@mail.tsu.ru)

**Abstract.** *Turbulent natural convection with surface thermal radiation in air-filled enclosures has been investigated. The equations of conservation of mass, momentum and energy are solved using both finite difference and control volume methods. It should be noted that the working medium is Newtonian and heat conducting fluid, where the Boussinesq approximation is valid. The walls are supposed to be gray, diffuse emitters and reflectors of radiation. The left and right surfaces of the enclosure are isothermal walls, while other surfaces are adiabatic walls. The considered fluid flow is turbulent. The main aim of the present research is to compare the heat transfer process in 2D and 3D enclosures. Detailed results including flow profiles, temperature fields, and average Nusselt numbers have been presented.*

Исследования турбулентных режимов свободной конвекции и теплового поверхностного излучения в замкнутых областях активно развиваются в последнее время [1, 2]. Это обусловлено необходимостью изучения протекающих процессов переноса тепла и массы в различных инженерных приложениях, которые требуют передачи больших тепловых потоков в ограниченном объеме, например, в пассивных системах охлаждения электроники. Как правило, для получения наиболее точных, с физической точки зрения, результатов численный анализ необходимо проводить в трехмерной постановке. Это в свою очередь требует большого количества вычислительных ресурсов и времени для проведения расчетов. Поэтому естественным образом возникает желание использовать двумерную постановку, как наиболее эффективную с вычислительной точки зрения.

Цель данной работы заключается в сравнении результатов и численном анализе турбулентных режимов естественной конвекции и теплового поверхностного излучения в замкнутых 2D и 3D областях. Область решения представлена на рис.1. Внутри полости находится газ, который считается ньютоновской жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска. Внутренние поверхности твердых стенок являются диффузно-серыми. На внешней поверхности одной из вертикальных стенок  $x = 0$  поддерживается постоянная температура  $T_h$ , а на внешней поверхности противоположной

вертикальной стенки –  $T_c < T_h$ . На оставшихся стенках задано условие теплоизоляции. Теплообмен излучением моделируется на основе приближения поверхностного излучения. В качестве модели турбулентности используется стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель.

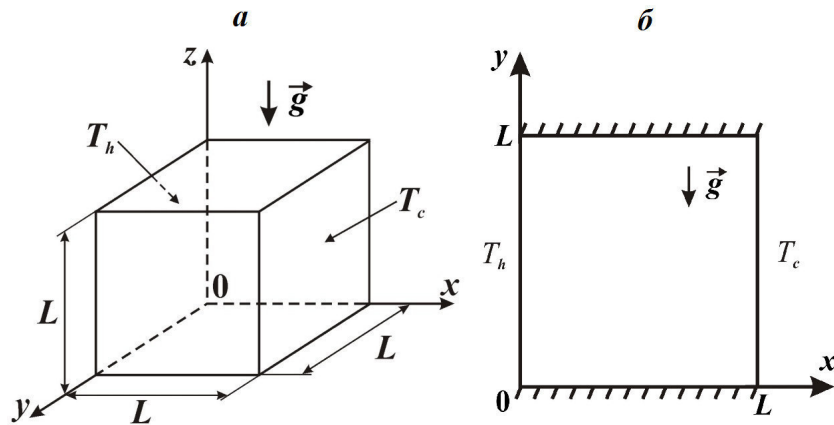


Рис.1. Трехмерная (а) и двумерная (б) области решения

В трехмерной постановке краевая задача решалась методом контрольного объема, в двумерной – методом конечных разностей. Для нахождения безразмерной плотности радиационного потока  $Q_{rad}$  применялся метод решения с использованием плотности потока эффективного излучения. Данный метод заключается в разрешении двух разностных дифференциальных уравнений (1) и (2) методом последовательной верхней релаксации.

$$Q_{rad,k} = R_k - \sum_{i=1}^N F_{k-i} R_i; \quad (1)$$

$$R_k = (1 - \tilde{\varepsilon}_k) \sum_{i=1}^N F_{k-i} R_i + \tilde{\varepsilon}_k (1 - \zeta)^4 \left( \Theta_k + 0.5 \frac{1 + \zeta}{1 - \zeta} \right)^4. \quad (2)$$

Здесь  $Q_{rad,k}$  – безразмерная плотность радиационного потока, подводимого к  $k$ -ой поверхности;  $R_k$  – безразмерная плотность эффективного излучения  $k$ -ой поверхности;  $F_{k-i}$  – угловой коэффициент между поверхностями “ $k$ ” и “ $i$ ”;  $\varepsilon$  – приведенная степень черноты ограждающих стенок;  $\varepsilon_k$  – приведенная степень черноты  $k$ -ой поверхности;  $\Theta_k$  – безразмерная температура  $k$ -ой поверхности;  $\xi = T_c/T_h$  – температурный параметр.

Угловой коэффициент  $F_{k-j}$  представляет собой отношение энергии излучения, испускаемого элементарной площадкой  $A_k$  и непосредственно достигающего элементарной площадки  $A_j$ , к энергии излучения, испускаемого площадкой  $A_k$  в пределах полусферического телесного угла. Угловые коэффициенты  $F_{k-j}$  вычислялись с использованием метода Хоттеля [3,4] и по определению путем интегрирования по соответствующим поверхностям [3,5].

Процесс переноса импульса, массы и энергии для данной задачи описывается системой нестационарных уравнений Навье-Стокса. Дифференциальные уравнения с соответствующими граничными условиями для двумерной и трехмерной постановок детально описаны в [4-6].

При решении краевой задачи в естественных переменных методом контрольного объема для аппроксимации конвективных слагаемых применялся степенной закон, для диффузионных слагаемых — центральные разности. Разностные уравнения движения и энергии разрешались на основе итерационного метода переменных направлений. Для поиска поля давления, согласованного с полем скорости, применялась процедура SIMPLE. В случае метода конечных разностей и преобразованных переменных “функция тока-завихренность” для аппроксимации конвективных слагаемых применялась монотонная схема Самарского, для диффузионных слагаемых — центральные разности. Значения завихренности на поверхностях стенок определялись по формулам второго порядка точности. Уравнения дисперсии вихря и энергии решались с использованием локально одномерной схемы А.А. Самарского. Полученная таким образом система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с трехдиагональной матрицей разрешалась методом прогонки. Для дискретизации уравнения Пуассона применялся пятиточечный шаблон “крест” на основе формул симметричной аппроксимации вторых производных. При этом полученная СЛАУ разрешалась методом последовательной верхней релаксации. Оптимальное значение параметра релаксации подбиралось на основе вычислительных экспериментов. Параметры стандартной  $k-\varepsilon$  модели турбулентности подробно описаны в [4, 6].

В результате проведенных исследований получены распределения как локальных (изолинии функции тока, температуры и турбулентных характеристик), так и интегральных (средние радиационное и конвективное числа Нуссельта) характеристик. Проведено детальное сравнение результатов 2D и 3D моделирования. Показано, что увеличение степени черноты ограждающих поверхностей проявляется в изменении структуры течения и интенсификации теплопереноса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Номер проекта 17-79-20141).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xaman J., Arce J., Alvarez G., Chavez Y. Laminar and turbulent natural convection combined with surface thermal radiation in a square cavity with a glass wall // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2008. – Vol. 47. – Pp. 1630–1638.
2. Wu T., Lei C. On numerical modelling of conjugate turbulent natural convection and radiation in a differentially heated cavity // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 91. – Pp. 454–466.
3. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975. – 935 с.
4. Miroshnichenko I. V., Sheremet M. A. Numerical simulation of turbulent natural convection combined with surface thermal radiation in a square cavity // *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. – 2015. – Vol. 25. – No. 7. – Pp. 1600-1618.
5. Мартюшев С.Г., Мирошниченко И.В., Шерemet М.А. Численный анализ пространственных нестационарных режимов сопряженного конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутом объеме с источником энергии // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87, № 1. – С. 119–128.
6. Sheremet M.A., Miroshnichenko I.V. Numerical study of turbulent natural convection in a cube having finite thickness heat-conducting walls // *Heat Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 51. – Pp. 1559–1569.