

В настоящей работе доказана применимость метода прогонки для расчета нестационарных одномерных дифференциальных уравнений теплопроводности путем сравнения численных результатов тестовой задачи с результатами, полученными в ходе ее решения с использованием аналитического и приближенного аналитического методов. Данный метод численного моделирования применим при расчете задач подобных тестовой при больших числах Фурье $Fo > 0,5$.

Список литературы:

1. Богачев В.А., Таран О.Е. Влияние тепловой неравномерности на температуру и надежность металла конвективных пароперегревателей // Электрические станции. – 2002. – № 2. – С. 21 – 24.
2. Богачев В.А. Температурный режим поврежденного змеевика пароперегревателя // Электрические станции. – 2009. – № 5. – С. 20 – 23.
3. Верховский Г.Е., Лепаев П.А. Повышение надежности работы пароперегревателей барабанных котлов с помощью оптимизации регулирования перегрева // Энергетик. – 2010. – № 1. – С. 25 – 28.
4. Закирова А.А., Зарипова Р.Г., Семенов В.И. Повышение Структура и механические свойства углеродистых сталей, подвергнутых интенсивной пластической деформации кручением // Машиностроение. Материаловедение и термическая обработка металлов – 2008. – Т. 11. – № 2. – С. 123 – 130.

УДК 532.5

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАНДАРТНЫХ k - ε И k - ω МОДЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ

Мирошниченко И.В.¹, Шеремет М.А.^{1,2}, д.ф.-м.н.

¹Томский государственный университет, г. Томск

²Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: miroshnichenko@land.ru

Конвективные процессы играют важную роль в природных явлениях и во многих отраслях техники. В настоящее время изучение процессов переноса тепла и массы связано с достаточно широким кругом задач [1]. Так как эти процессы очень важны, управление ими является ключевой задачей. В свою очередь, для этого необходимо понимание существа этих явлений и методов их моделирования.

Цель данной работы заключается в математическом моделировании турбулентных режимов естественной конвекции в замкнутой квадратной полости с адиабатическими горизонтальными и изотермическими вертикальными стенками на основе двух стандартных моделей турбулентности (k - ε и k - ω).

Рассматривается краевая задача турбулентного конвективного теплопереноса в замкнутой квадратной области. Среда, занимающая внутреннюю полость, считается теплопроводной, ньютоновской жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска. Режим течения турбулентный. Вертикальные стенки полости $x = 0$ и $x = L$ поддерживаются при постоянных по высоте, но различных температурах T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$), а горизонтальные стенки предполагаются теплоизолированными.

С учетом физической постановки задачи процесс переноса тепла в анализируемой области решения описывается системой нестационарных двумерных уравнений турбулентной естественной конвекции в безразмерных преобразованных переменных «функция тока – завихренность – температура» [2].

Для получения более точных значений искомых параметров вблизи стенок используется специальное преобразование координат для сгущения разностной сетки, позволяющее от неравномерной сетки в физической области перейти к равномерной сетке в вычислительной области. Данное преобразование имеет следующий вид:

$$\xi = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{2} (2X - 1) \varepsilon \right] / \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{2} \varepsilon \right] \right\}; \quad \eta = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{2} (2Y - 1) \varepsilon \right] / \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{2} \varepsilon \right] \right\}.$$

В результате процесс переноса массы, импульса и энергии в безразмерных переменных «функция тока – завихренность скорости» с учетом отмеченного выше преобразования координат описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{d^2 \xi}{dX^2} \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} + \left(\frac{d\xi}{dX} \right)^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi^2} + \frac{d^2 \eta}{dY^2} \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} + \left(\frac{d\eta}{dY} \right)^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \eta^2} = -\Omega, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + \left(U - \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial v_t}{\partial \xi} \right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial \Omega}{\partial \xi} + \left(V - \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial v_t}{\partial \eta} \right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} = \\ = \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\sqrt{\operatorname{Pr}} + v_t \right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial \Omega}{\partial \xi} \right] + \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\left(\sqrt{\operatorname{Pr}} + v_t \right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} \right] + \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} + \left(\frac{d^2 \xi}{dX^2} \frac{\partial v_t}{\partial \xi} + \left(\frac{d\xi}{dX} \right)^2 \frac{\partial^2 v_t}{\partial \xi^2} - \frac{d^2 \eta}{dY^2} \frac{\partial v_t}{\partial \eta} - \left(\frac{d\eta}{dY} \right)^2 \frac{\partial^2 v_t}{\partial \eta^2} \right) \times \\ \times \left(\Omega + 2 \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) + 4 \frac{d\xi}{dX} \left(\frac{d\eta}{dY} \right)^2 \frac{\partial^2 v_t}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial \Theta}{\partial \xi}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} + V \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial \Theta}{\partial \eta} = \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\text{Ra Pr}}} + \frac{v_t}{\text{Pr}_t} \right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} \right] + \\ + \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\text{Ra Pr}}} + \frac{v_t}{\text{Pr}_t} \right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial \Theta}{\partial \eta} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

В качестве моделей турбулентности рассматривались стандартная k - ε модель[2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \tau} + U \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial K}{\partial \xi} + V \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial K}{\partial \eta} = \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial K}{\partial \xi} \right] + \\ + \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\left(\sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial K}{\partial \eta} \right] + \bar{P}_k + \bar{G}_k - E, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \tau} + U \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial E}{\partial \xi} + V \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial E}{\partial \eta} = \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial E}{\partial \xi} \right] + \\ + \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\left(\sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial E}{\partial \eta} \right] + \left[c_{1\varepsilon} (\bar{P}_k + c_{3\varepsilon} \bar{G}_k) - c_{2\varepsilon} E \right] \frac{E}{K}. \end{aligned} \quad (5)$$

и стандартная k - ω модель:

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \tau} + U \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial K}{\partial \xi} + V \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial K}{\partial \eta} = \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial K}{\partial \xi} \right] + \\ + \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\left(\sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial K}{\partial \eta} \right] + \bar{P}_k + \bar{G}_k - \beta^* WK, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \tau} + U \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial W}{\partial \xi} + V \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial W}{\partial \eta} = \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial W}{\partial \xi} \right] + \\ + \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\left(\sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial W}{\partial \eta} \right] + \alpha \frac{W}{K} \bar{P}_k + \frac{W}{K} \bar{G}_k - \beta W^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь

$$\bar{P}_k = v_t \left[2 \left(\frac{d\xi}{dX} \frac{\partial U}{\partial \xi} \right)^2 + 2 \left(\frac{d\eta}{dY} \frac{\partial V}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{d\eta}{dY} \frac{\partial U}{\partial \eta} + \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial V}{\partial \xi} \right)^2 \right],$$

$$\bar{G}_k = -\frac{v_t}{\text{Pr}_t} \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial \Theta}{\partial \eta}, \quad v_t = c_\mu K^2 / E.$$

Параметры стандартной k - ε модели:

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad Pr_t = 1.0, \quad c_\mu = 0.09, \quad c_{1\varepsilon} = 1.44, \quad c_{2\varepsilon} = 1.92, \quad \sigma_{3\varepsilon} = 0.8.$$

Параметры стандартной $k-\omega$ модели:

$$\alpha = 0.56, \quad \beta = 0.075, \quad \beta^* = 0.09, \quad \sigma_k = 0.5, \quad \sigma_\omega = 0.5.$$

Начальные и граничные условия для сформулированной задачи (1)–(5) или (1)–(3), (6), (7) подробно описаны в [2, 3].

Сформулированная краевая задача решена численно методом конечных разностей [2] на равномерной сетке (ξ, η) 200×200 . Уравнения параболического типа решались с использованием локально-одномерной схемы А.А. Самарского. Полученная таким образом система линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей разрешалась методом прогонки. Конвективные слагаемые аппроксимировались на основе монотонной аппроксимации А.А. Самарского, диффузионные слагаемые – с использованием центральных разностей. Разностное уравнение Пуассона для функции тока разрешалось на основе метода последовательной верхней релаксации.

Численное исследование проводилось в широком диапазоне изменения чисел Рэлея и Прандтля ($10^7 \leq Ra \leq 1.58 \cdot 10^9$, $Pr = 0.7, 7.0, 0.0115$). Были установлены распределения изолиний функции тока, температуры, кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации. Показано, что с увеличением числа Рэлея толщина теплового пограничного слоя уменьшается, а ядра конвективного течения сужаются. В случае малых значений числа Прандтля ($Pr = 0.0115$) в центральной части формируется трехядерная конвективная ячейка. Полученные в работе результаты позволили проанализировать две модели турбулентности (стандартные $k-\varepsilon$ и $k-\omega$) и сравнить их с данными эксперимента [3] (рис. 1). Стандартная $k-\varepsilon$ модель в поставленной задаче выглядит предпочтительнее и лучше согласуется с результатами других авторов [3, 4].

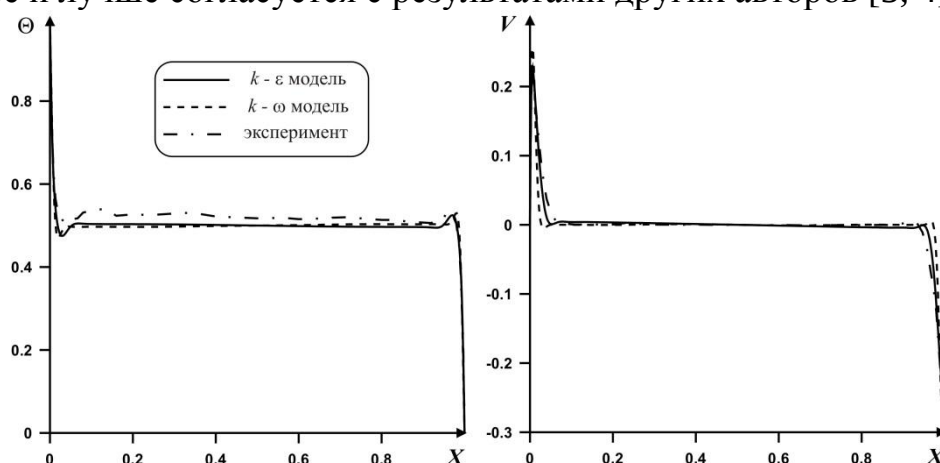


Рис. 1. Распределения температуры и вертикальной компоненты скорости в среднем сечении полости в сравнении с данными эксперимента [3]

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 14-08-31137 мол_а).

Список литературы:

1. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И., Гуреев В.М. Вчера, сегодня и завтра интенсификации теплообмена // Труды 5 Российской национальной конференции по теплообмену. – Москва, 2010. – Т. 1. – С. 37–40.
2. Шеремет М.А. Математическое моделирование турбулентных режимов сопряженной термогравитационной конвекции в замкнутой области с локальным источником тепла // Теплофизика и аэромеханика. – 2011. – Т. 18, №1. – С. 117–131.
3. Ampofo F., Karayiannis T.G. Experimental benchmark data for turbulent natural convection in an air filled square cavity // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2003. – Vol. 46. – Pp. 3551–3572.
4. Zhuo C., Zhong C. LES-based filter-matrix lattice Boltzmann model for simulating turbulent natural convection in a square cavity // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2013. – Vol. 42. – Pp. 10–22.

УДК 536.2:

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ С
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ОТОПИТЕЛЬНЫХ
ПРИБОРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ**

Морозов М.Н., Стрижак П.С.

Томский политехнический университет Томск

В последнее время вопрос энергосбережения и повышения энерго- и ресурсоэффективности во всех сферах жизнедеятельности стал подниматься на различных уровнях [1, 2].

Особое значение уделяют мероприятиям, направленным на повышение энергоэффективности зданий и сооружений административного и производственного назначений [3-9].

К современным системам теплоснабжения предъявляются следующие требования: с одной стороны необходимо поддерживать параметры микроклимата на комфортном уровне, а с другой требуется повышение энергоэффективности инженерных систем жизнеобеспечения здания.

Цель настоящей работы заключается в исследовании однотрубной конфигурации системы отопления здания при местном регулировании в тепловом пункте, а также в случае дополнения системы индивидуальными регуляторами.