

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 536.33:536.244

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЗАМКНУТОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ С ТЕПЛОПРОВОДНЫМИ ОГРАЖДАЮЩИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ В УСЛОВИЯХ ЛУЧИСТОГО НАГРЕВА ВНУТРЕННИХ ГРАНИЦ

Г.В. КУЗНЕЦОВ, А.Э. НИ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Проведено математическое моделирование кондуктивно-конвективного теплопереноса в замкнутой прямоугольной области с теплопроводными ограждающими конструкциями в условиях радиационного нагрева внутренних границ. Получены поля температур и функций тока для двух возможных вариантов описания распределения лучистой энергии (равномерное распределение теплового потока только по нижней горизонтальной границе и распределение радиационной энергии и по вертикальным внутренним поверхностям по закону Ламберта). Установлено, что поглощение вертикальными ограждающими конструкциями лучистых потоков приводит к увеличению градиентов температур в характерных сечениях. Показаны масштабы влияния турбулизации течения на интенсивность теплопереноса.

Ключевые слова: сопряженный теплоперенос, численное моделирование, турбулентность, термогравитационная конвекция, модель Болдуина–Ломакса, газовый инфракрасный излучатель.

Введение

В условиях непрерывного истощения ископаемых топлив все более актуальными становятся задачи энергосбережения. Одно из перспективных направлений генерации тепловой и электрической энергии – использование нетрадиционных энергетических ресурсов (солнечные батареи и коллекторы, тепловые насосы, ветроустановки и др.). Но в силу значительных материальных затрат использование альтернативных источников энергии оказывается во многих случаях неэффективным.

Высоким потенциалом энергосбережения обладают промышленные предприятия с крупногабаритными производственными цехами. Установлено [1, 2], что использование газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) для локального обогрева помещений позволяет экономить до 40% энергетических ресурсов по сравнению с традиционным конвективным отоплением. По этой причине целесообразно исследование тепловых режимов областей с лучистыми системами теплоснабжения.

© Г.В. Кузнецов, А.Э. Ни

Проблемы энергетики, 2015, № 7-8

Известные математические модели теплопереноса в условиях радиационного нагрева объектов теплоснабжения, основанные на теории [3, 4], не описывают в полной мере совместно протекающие при работе ГИИ процессы кондукции, конвекции и излучения. Для решения таких сложных задач целесообразно использование аппарата [5, 6], разработанного для моделирования сопряженного теплопереноса в замкнутых областях с локальными источниками энергии в условиях естественной конвекции.

Исследование свободно-конвективного теплопереноса в отопляемом с использованием ГИИ помещении выполнено в работах [7, 8]. Но численный анализ турбулентной термогравитационной конвекции [7] проведен без учета распределения лучистой энергии по внутренним поверхностям ограждающих конструкций (предполагалось, что вся энергия, поступающая от ГИИ, равномерно распределена только по нижней горизонтальной границе раздела «газ – стенка»). Четыре возможных варианта описания распределения радиационных потоков по внутренним поверхностям области анализа исследованы в работе [8], но в рамках ламинарной модели течения воздуха. В крупногабаритных же производственных помещениях преобладает турбулентная конвекция.

Целью работы является численное моделирование сопряженного турбулентного теплопереноса в замкнутой прямоугольной области, нагреваемой газовым инфракрасным излучателем, с учетом распределения лучистой энергии по закону Ламберта.

Постановка задачи. Рассматривается область (рис.1) прямоугольного поперечного сечения, заполненная воздухом и ограниченная твердыми теплопроводными и теплоаккумулирующими стенками конечной толщины. Излучатель 3 расположен вблизи верхней горизонтальной границы. Считается, что воздух – вязкая теплопроводная ньютоновская жидкость, удовлетворяющая приближению Буссинеска и абсолютно прозрачная среда для теплового излучения. Теплофизические свойства газа и материалов ограждающих конструкций не зависят от температуры в рассматриваемом диапазоне ее изменения.

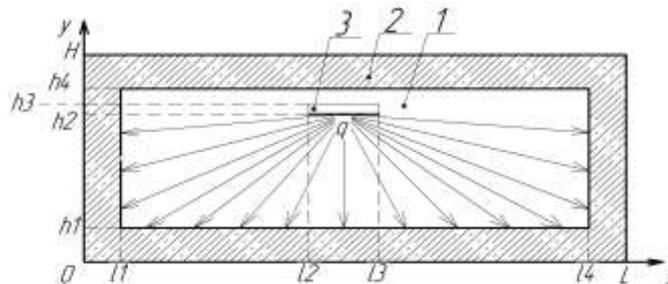


Рис. 1. Область решения задачи: 1 – воздух; 2 – ограждающие конструкции; 3 – газовый инфракрасный излучатель (условное обозначение)

Исследованы два возможных достаточно реальных варианта описания распределения лучистой энергии по внутренним поверхностям ограждающих конструкций:

1. Тепловой поток равномерно распределен только по нижней горизонтальной границе раздела «газ - стенка».
2. Распределение радиационной энергии задано по закону Ламберта [9].

Исследуемый процесс сопряженного турбулентного теплопереноса описывается нестационарными уравнениями Рейнольдса и энергии для газа и уравнением теплопроводности для ограждающих конструкций. В безразмерных переменных «вихрь скорости Ω – функция тока Ψ – температура Θ » эти уравнения имеют вид [10, 11]:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{\partial^2}{\partial X^2} \left[\left(\frac{\sqrt{\text{Pr}}}{\sqrt{\text{Ra}}} + \nu_t \right) \Omega \right] + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left[\left(\frac{\sqrt{\text{Pr}}}{\sqrt{\text{Ra}}} + \nu_t \right) \Omega \right] + \frac{\partial \Theta_1}{\partial X}, \quad (1)$$

$$\nabla^2 \Psi = -\Omega, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta_1}{\partial Y} = \frac{\partial^2}{\partial X^2} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\text{Ra} \cdot \text{Pr}}} + \frac{\nu_t}{\text{Pr}_t} \right) \Theta_1 \right] + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\text{Ra} \cdot \text{Pr}}} + \frac{\nu_t}{\text{Pr}_t} \right) \Theta_1 \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial Fo_2} = \nabla^2 \Theta_2. \quad (4)$$

Турбулентная вязкость определялась с использованием модели Болдуина – Ломакса [12]:

$$\nu_t = l_m^2 |\Omega|, \quad l_m = ky,$$

где l_m – путь смешения; y – координата; k – постоянная Кармана ($k \approx 0,4$).

Начальные условия для уравнений (1) – (4):

$$\Psi(X, Y, 0) = 0; \quad \Omega(X, Y, 0) = 0; \quad U(X, Y, 0) = 0; \quad V(X, Y, 0) = 0;$$

$$\Theta_1(X, Y, 0) = \Theta_2(X, Y, 0) = 0.$$

Граничные условия для уравнений (1) – (4):

на внешних границах области решения:

$$X = 0, \quad X = 1, 2, \quad 0 < Y \leq 1: \quad \frac{\partial \Theta_2(X, Y, \tau)}{\partial X} = 0;$$

$$Y = 0, \quad Y = 1, \quad 0 < X \leq 1, 2: \quad \frac{\partial \Theta_2(X, Y, \tau)}{\partial Y} = 0.$$

на внутренних границах «твердая стенка – воздух», параллельных оси OX:

$$\Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \quad \begin{cases} \Theta_i = \Theta_j, \\ \frac{\partial \Theta_i}{\partial Y} = \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \cdot \frac{\partial \Theta_i}{\partial Y} + \text{Ki} \end{cases}, \quad \text{где} \quad \begin{cases} i = \overline{1, 2} \\ j = \overline{1, 2} \end{cases}$$

на внутренних границах «твердая стенка – воздух», параллельных оси OY:

$$\Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0, \quad \begin{cases} \Theta_i = \Theta_j, \\ \frac{\partial \Theta_i}{\partial X} = \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \cdot \frac{\partial \Theta_i}{\partial X} + \text{Ki} \end{cases}, \quad \text{где} \quad \begin{cases} i = \overline{1, 2} \\ j = \overline{1, 2} \end{cases}$$

где $Fo = \frac{a \cdot t_0}{(L - 2 \cdot l)^2}$ – число Фурье; $Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (L - 2 \cdot l)^3 \cdot (T_h - T_0)}{\nu \cdot a}$ – число Рэлея;

$\text{Ki} = \frac{q \cdot (L - 2 \cdot l)}{\lambda \cdot (T_h - T_0)}$ – число Кирпичева; $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$ – число Прандтля;

$\text{Pr}_t = \frac{\nu_t}{a_t}$ – турбулентное число Прандтля; a – коэффициент температуропроводности,

m^2/c ; a_t – турбулентный коэффициент температуропроводности; g – ускорение свободного падения m/c^2 ; β – коэффициент объёмного расширения, $1/\text{K}$;

ν – кинематическая вязкость, m^2/c ; q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{m}^2$;

© Проблемы энергетики, 2015, № 7-8

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); X, Y – безразмерные координаты, соответствующие x, y ; $(L - 2l)$ – характерный размер газовой полости по оси x , м; τ – безразмерное время; U, V – безразмерные скорости соответствующие u, v ; T_0 – температура воздуха, и стенок в начальный момент времени, К; T_h – температура на поверхности излучателя, К;

Уравнения (1) – (4) с соответствующими начальными и граничными условиями решены методом конечных разностей, аналогично работам [5, 13]. Для оценки работоспособности используемого алгоритма решена краевая задача термогравитационной конвекции в замкнутой квадратной полости [11, 14]. Результаты сравнения средних чисел Нуссельта приведены в табл. 1.

Таблица 1

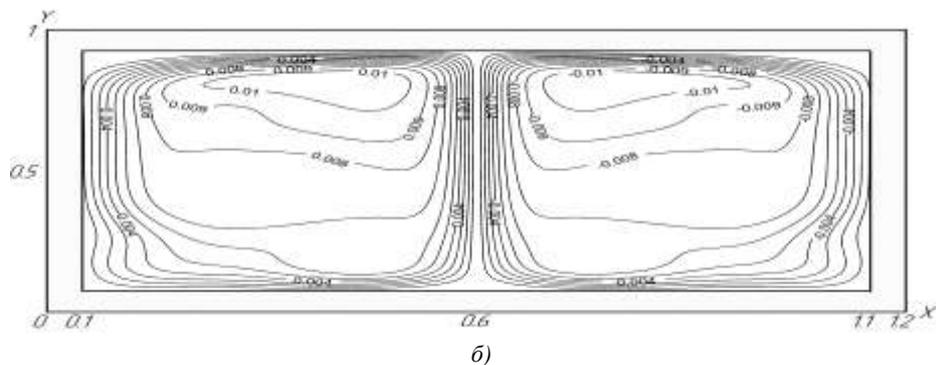
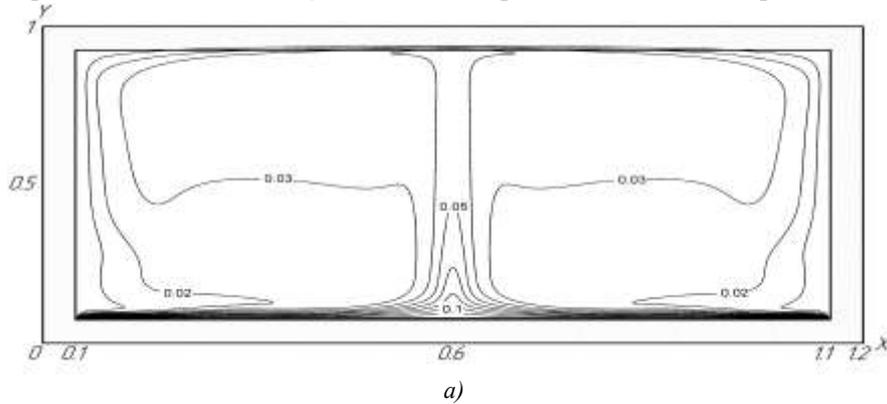
Сравнение средних чисел Нуссельта

Число Рэлея	Nu_{av}	Nu_{av} [11]	Nu_{av} [14]
$Ra = 10^8$	33,92	30,32	31,2
$Ra = 10^9$	56,21	49,52	58,1

На основании сравнения полученных Nu_{av} с результатами [11, 14] можно сделать обоснованный вывод о работоспособности используемого алгоритма решения.

Результаты и обсуждения

Численное исследование проведено при значениях безразмерных критериев, соответствующих достаточно типичным условиям теплопереноса при работе ГИИ: число Рэлея $Ra = 10^8$, число Прандтля $Pr = 0,71$, турбулентное число Прандтля $Pr_t = 1$, число Кирпичева $0 < Ki \leq 30$. Результаты моделирования показаны на рис. 2.



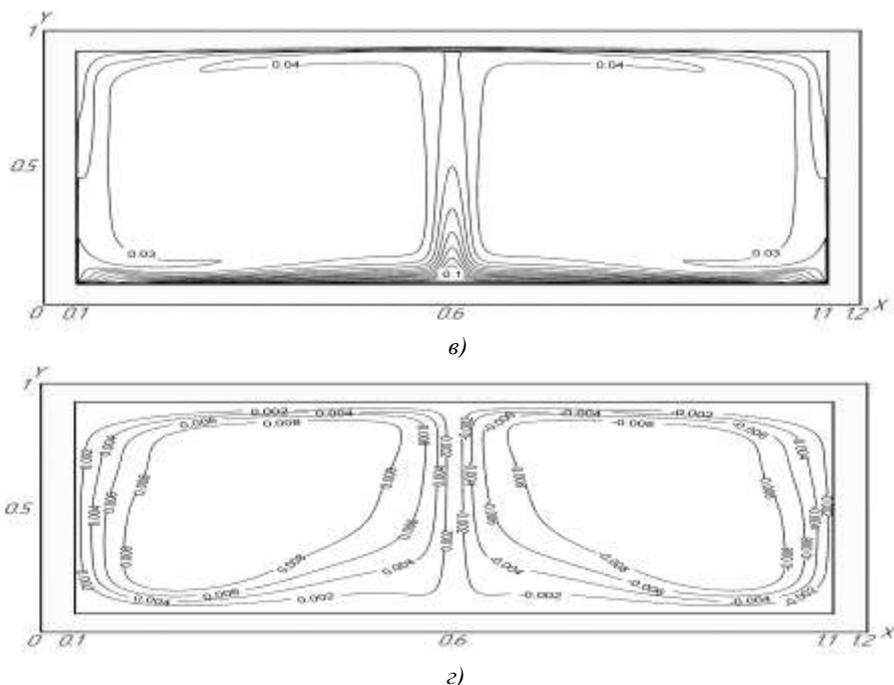
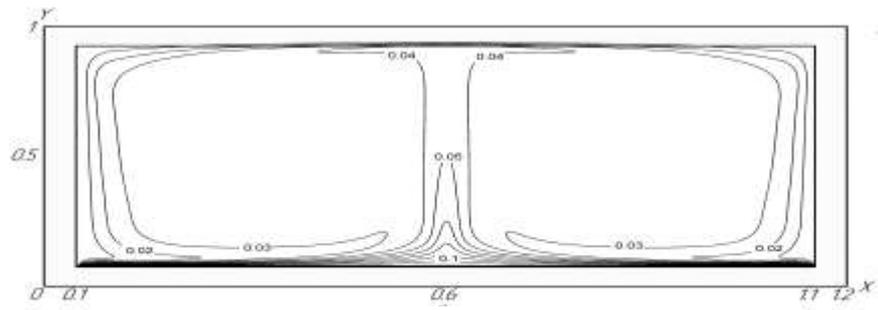


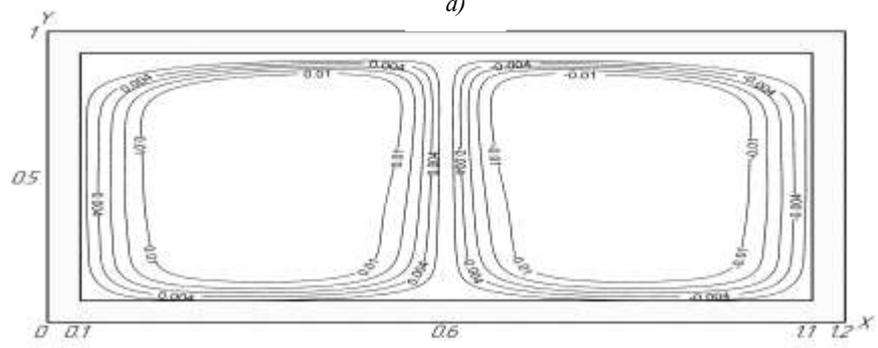
Рис. 2. Изолинии температур (а, в) и функции тока (б, г) при $\tau = 1000$: а, б) Равномерное распределение теплового потока по нижней горизонтальной границе; в, г) Распределение лучистой энергии и по вертикальным внутренним границам области в соответствии с законом Ламберта

Установлено, что в момент времени $\tau = 1000$ формируются вихревые (рис. 2, б, г) структуры в газовой полости. Причиной таких циркуляционных течений является непрерывный подвод лучистой энергии к внутренним поверхностям ограждающих конструкций. В первом случае (рис. 2, а, б) происходит прогрев газа у границы $y=h1, 11 < x < 14$ и продвижение воздушных масс в направлении оси Y . Во втором случае (при более равномерном нагреве внутренних границ и соответствующем отводе теплоты в ограждающие конструкции) циркуляционные течения принимают более выраженный характер (рис. 2, г).

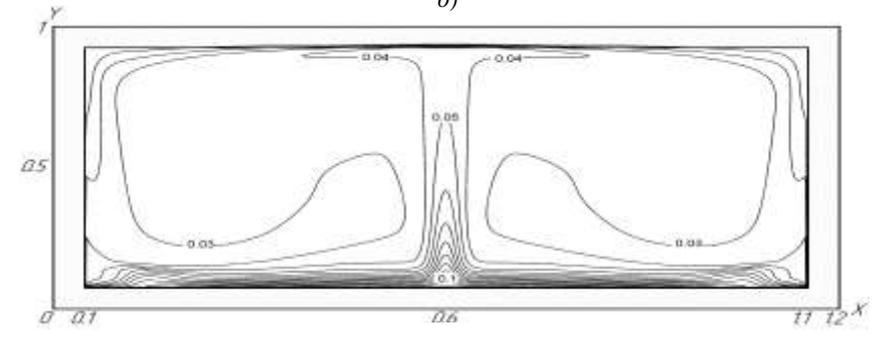
С увеличением времени до $\tau = 1500$, в случае равномерного распределения теплового потока только по нижней горизонтальной границе (рис. 3, а, б), формируется выраженное симметричное относительно оси $X=0,6$ циркуляционное течение воздуха. При распределении лучистой энергии по закону Ламберта часть теплового потока поступает к вертикальным ограждающим конструкциям. Повышается температура в области $X=0,1; X=1,1; 0,08 < Y < 0,8$ (рис. 4) и происходит образование вторичных вихрей в газовой полости (рис. 3, г). Необходимо отметить, что такое перераспределение энергии за счет теплоотвода в вертикальные ограждающие конструкции ведет к понижению температуры по высоте области анализа в сечении $X=0,6$ (рис. 4, б).



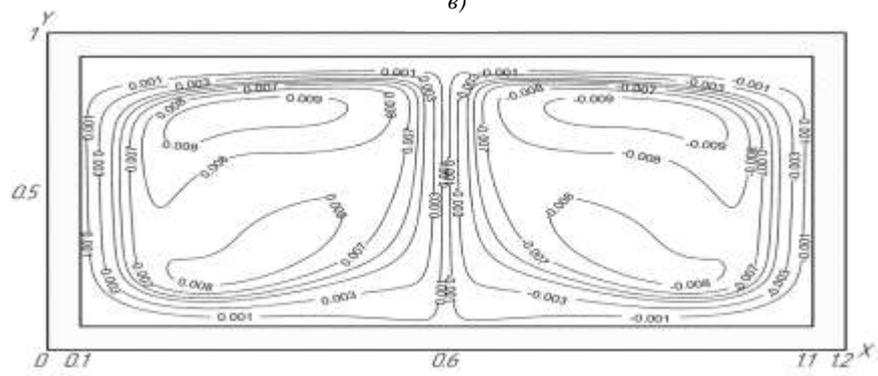
a)



б)



в)



г)

Рис. 3. Изолинии температур (а, в) и функций тока (б, г) при $\tau = 1500$: (а, б) Равномерное распределение теплового потока по нижней горизонтальной границе; (в, г) Распределение лучистой энергии и по вертикальным внутренним границам области в соответствии с законом Ламберта

На рис. 4 показаны распределения температур по оси Y в сечениях $X=0,12$ и $X=0,6$.

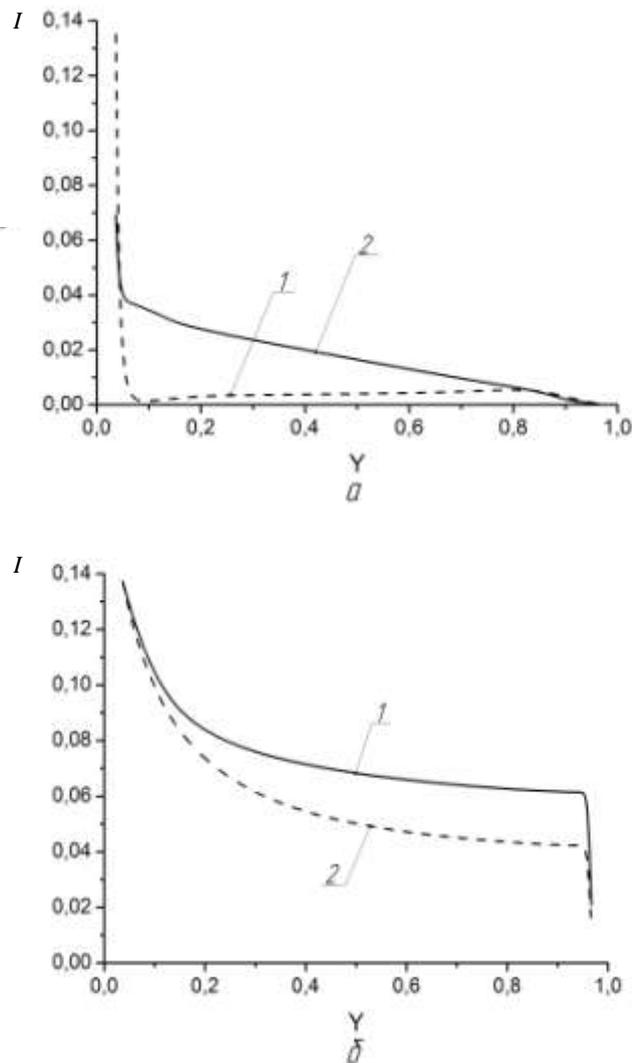


Рис. 4. Распределение температур по оси Y при $\tau = 1500$ в сечении: а) $X=0,12$; б) $X=0,6$.

- 1 – равномерное распределение теплового потока по нижней горизонтальной границе;
- 2 – распределение лучистой энергии по закону Ламберта

Из рис. 4 видно, что при лучистом нагреве внутренних границ замкнутой прямоугольной области, заполненной газом и ограниченной твердыми теплопроводными стенками конечной толщины, формируются существенно неоднородные температурные поля. Распределение лучистой энергии по вертикальным ограждающим конструкциям приводит к увеличению градиента температур в сечении $X=0,6$ (рис. 4, б). При этом растет температура воздуха у вертикальных стенок (рис. 4, а). Можно сделать вывод о значимости фактора распределения лучистых потоков по внутренним границам при анализе основных закономерностей теплопереноса в областях с радиационной системой отопления.

Проведена оценка влияния турбулизации течения на процесс теплопереноса в рассматриваемой области решения путем сравнения рассчитанных средних чисел Нуссельта с результатами работы [8]. На границе раздела «воздух – стенка» ($y=h1$, $1 < x < 14$) безразмерный коэффициент теплоотдачи определяется [5] как

$$Nu_{av} = \int_{0,1}^{1,1} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial Y} \right)_{Y=0,08} dX;$$

Результаты для случая распределения лучистой энергии по закону Ламберта приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение средних чисел Нуссельта

Время, τ	Nu_{av} ($Ra = 10^8$)	Nu_{av} [8] ($Ra = 10^6$)
500	2,99	1,11
1000	3,23	1,14
1500	3,32	1,15

На основании анализа полученных результатов (табл. 2) можно сделать вывод, что турбулизация процесса теплообмена приводит к существенной интенсификации конвективного теплопереноса даже в условиях интенсивного теплоотвода в ограждающие конструкции.

Заключение

По результатам численного моделирования установлено, что процесс радиационного нагрева замкнутых прямоугольных помещений с теплопроводными и теплоаккумулирующими твердыми стенками носит существенно нестационарный характер. При этом формируются неоднородные температурные поля. Показано, что распределение тепловых потоков по внутренним поверхностям ограждающих конструкций приводит к увеличению градиента температур по высоте области анализа. Можно сделать вывод, что при постановке задач сопряженного теплопереноса с радиационными источниками энергии целесообразно учитывать распределение лучистой энергии и по вертикальным границам. При анализе тепловых режимов локальных рабочих зон в крупногабаритных помещениях с теплопроводными ограждающими конструкциями в условиях работы газовых инфракрасных излучателей целесообразно использовать модели естественной конвекции.

Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» №13.1339.2014/К (шифр Федеральной целевой научно-технической программы 2.1410.2014).

Summary

Mathematical modeling of conductive - convective heat transfer in a closed rectangular area with thermally conductive enclosure structures in conditions of radiant heating of internal boundaries is passed. The fields of temperature and stream functions for the two possible descriptions of the radiant energy distribution (even distribution of heat flow only along the lower horizontal boundary and the Lambert's law radiant energy distribution along vertical inner surfaces) are obtained. It is established that the absorption of radiant fluxes by vertical enclosure structures radiant flux increases the temperature

gradients in the characteristic sections. Scale of the influence of turbulence on the flow rate of heat transfer is showed.

Keywords: *conjugate heat transfer, numerical simulation, turbulence, thermogravitational convection, Baldwin – Lomax model, gas infrared emitter.*

Литература

1. Романова Е. А. Энергосберегающие системы газового отопления и вентиляции // Новые технологии и изобретения. 2005. №2. С. 19 – 23.
2. Roth K. Infrared radiant heaters // ASHRAE. Journal. June. 2007.
3. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Солнышкова Ю.С. Алгоритм расчета систем лучистого отопления помещений // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2010. № 4. С. 23 – 25.
4. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Солнышкова Ю.С. Модификация зонального метода для решения задач радиационного теплообмена: Основные положения // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2009. № 2. С. 61 – 63.
5. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Two-dimensional problem of natural convection in a rectangular domain with local heating and heat-conducting boundaries of finite thickness // Fluid Dynamics. 2006. V.41. P. 881 – 890.
6. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Turbulent regime of thermogravitational convection in a closed cavity // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2010. V. 83. №2. P. 346 – 357.
7. Кузнецов Г.В., Куриленко Н.И., Максимов В.И., и др. Свободно- конвективный теплоперенос в отапливаемых с использованием газовых инфракрасных излучателей производственных помещений // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №1 – 2. С. 18 – 25.
8. Kuznetsov G.V., Nagornova T.A., Ni A.E. Computational modeling of conjugate heat transfer in a closed rectangular domain under the conditions of radiant heat supply to the horizontal and vertical surfaces of enclosure structures // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. V.88. № 1. P. 168 – 177.
9. Теплопередача: Учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. 5-е изд., стереотипное. ООО «ТИД «Арис», 2014. 416 с., ил.
10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
11. Sajjadi H., Kefayatib R. Lattice Boltzman simulation of turbulent natural convection in tall enclosure // Thermal Science. 2015. V.19. №1. P. 155 – 166.
12. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие, СПб: Балтийский государственный технический университет, 2001. 108 с.
13. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Heat and mass transfer at ignition of liquid fuel droplets spreading over the surface of massive hot bodies // Journal of Engineering Thermophysics. 2010. V.19. № 2. P. 75 – 84.
14. Dixit H.N., Babu V. Simulation of High Rayleigh Number Natural Convection in a Square Cavity using the Lattice Boltzmann Method // Int. J. Heat Mass Transfer. 2006. V. 49. P. 727–739.

Поступила в редакцию

29 апреля 2015 г.

Кузнецов Гений Владимирович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой ТПТ ЭНИН Томского политехнического университета (ТПУ). Тел: 8(382)2564010. E-mail: marisha@tpu.ru.

Ни Александр Эдуардович – инженер кафедры ТПТ ЭНИН Томского политехнического университета (ТПУ). Тел:8(952)8802713. E-mail: nee_alexander@mail.ru.