2018. Т. 28. Вып. 1

УДК 536.24

© Н. С. Гибанов, М. А. Шеремет

ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ОБЪЕМНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛУЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НА ТЕПЛООБМЕН ВНУТРИ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА¹

Проведено математическое моделирование процессов теплопереноса внутри замкнутой квадратной полости при наличии локального источника энергии полуцилиндрической формы. Проанализировано влияние расположения нагревателя на особенности эволюции гидродинамики. Рассматриваемая область представляла собой замкнутый квадратный контур, на нижней стенке которого располагался источник объемного тепловыделения, боковые стенки контура — изотермические. Представленная краевая задача была решена в безразмерных преобразованных переменных «функция тока-завихренностьтемпература» на основе метода конечных разностей. Проведены оценка влияния чисел Рэлея в диапазоне 10⁴–10⁵, а также положения локального источника энергии на теплообмен внутри полости.

Ключевые слова: замкнутый контур, источник объемного тепловыделения, конвекция, численный анализ.

DOI: 10.20537/vm180111

Процессы тепломассопереноса в различных замкнутых системах и блоках имеют огромное значение в современной радио- и микроэлектронике. Для повышения эффективности системы охлаждения внутри герметичного блока нужно учитывать все особенности процессов теплопереноса и эффективно управлять тепловыми потоками. Для оптимизации пассивной системы охлаждения необходимо принимать во внимание следующие факторы: материал, из которого изготовлен тепловыделяющий элемент; диапазон его рабочих температур (в случае превышения минимального или максимального порога температур снижается эффективность работы элемента вплоть до полного выхода из строя); свойства рабочего хладагента (воздух, жидкость); расположение и геометрические характеристики источников и стоков энергии. Всё представленное множество параметров значительно влияет на режимы теплопереноса внутри области. Особенно важно это учитывать для блоков с нагревательными элементами, находящимися под постоянной тепловой нагрузкой, так как вследствие скачка энергии либо длительного непрерывного использования аппаратуры может произойти превышение допустимой предельной температуры и весь блок выйдет из строя. Естественно-конвективные процессы теплообмена в замкнутых областях являются предметом интереса многих ученых вследствие широты применения и высокой востребованности результатов исследований. Так, например, в [1] авторами был проанализирован сопряженный конвективно-радиационный теплоперенос в замкнутой квадратной полости. В результате было отмечено, что увеличение степени черноты приводит к снижению среднего конвективного числа Нуссельта, а также к увеличению среднего радиационного числа Нуссельта и ослаблению конвективных режимов тепломассопереноса. Увеличение относительного коэффициента теплопроводности проявляется в интенсификации процесса переноса энергии и в снижении толщины динамического пограничного слоя. В работе [2] авторы обобщили результаты исследования [1] на случай замкнутой кубической полости. В результате численного моделирования установлены пространственные распределения температур и изолиний векторного потенциала в широком диапазоне изменения числа Рэлея, относительного коэффициента теплопроводности и приведенной степени черноты внутренних поверхностей ограждающих конструкций. Трехмерные режимы естественной конвекции жидкости в прямоугольном параллелепипеде также были проанализированы в [3] на

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17–79–20141).

2018. Т. 28. Вып. 1

основе спектрально-разностного численного метода. Представленный метод был использован для моделирования анализируемого процесса при высокой надкритичности и показал хорошие результаты для таких режимов. Множество работ посвящено исследованию естественной конвекции в замкнутых пористых областях. Например, в [4] авторами проводился численный анализ сопряженной естественной конвекции в замкнутой пористой полости с ограждающими стенками конечной толщины при наличии локального источника тепловыделения. В результате решения представленной нестационарной задачи было установлено, что увеличение числа Рэлея, при постоянном значении проницаемости среды, приводит к образованию неустойчивого температурного факела. Показано также, что при уменьшении проницаемости среды происходит доминирование кондуктивного режима теплопередачи над конвективным механизмом. В работах [5,6] проводятся численные исследования естественно-конвективного теплопереноса внутри цилиндрической пористой полости с использованием моделей Дарси и Бринкмана для описания транспортных процессов в пористой среде. Авторами было установлено, что приближение Дарси-Буссинеска возможно применять при небольших значениях относительного коэффициента теплопроводности. Увеличение относительного коэффициента теплопроводности, а также толщины ограждающих стенок приводит к росту степени рассогласования результатов, полученных с помощью двух рассмотренных приближений. В [7] авторами были проведены численные и экспериментальные исследования стационарных конвективных режимов теплопереноса внутри тонкого вертикального слоя при $Ra = 10^2 - 10^7$ в широком диапазоне изменения размеров тепловыделяющего элемента и толщины вертикального слоя. В результате были выделены два режима течения: симметричное конвективное течение и асимметричная циркуляция, обусловленная превышением критического числа Рэлея. Очень часто авторы не уделяют внимание моделированию объемного источника энергии, считая нагревающей или охлаждающей только лишь стенку области или же ее часть [8–11]. Такой подход позволяет адекватно описать влияние охлаждающей стенки, так как в большинстве случаев система охлаждения находится за пределами рассматриваемой области. В случае же с нагревательным элементом, имеющим объемную геометрическую форму и занимающим определенное положение в пространстве, необходимо учитывать массогабаритные характеристики источника, что также оказывает существенное влияние на характер гидродинамики [12–18]. В представленной работе проводится детальный анализ результатов численного моделирования естественной конвекции в замкнутом квадратном корпусе с локальным источником постоянного объемного тепловыделения полуцилиндрической формы. При этом рассматривается множество вариантов расположения нагревателя в области при различных значениях числа Рэлея.

§1. Математическая модель

Сопряженный естественно-конвективный теплообмен рассматривается в замкнутой квадратной полости длины L, боковые стенки которой являются охлаждающими и поддерживаются при постоянной минимальной температуре во всей области T_c (см. рис. 1). Верхняя стенка, а также часть нижней стенки, не занимаемой локальным источником тепловыделения, являлись адиабатическими. Располагаемый на нижней стенке теплопроводный элемент представлял собой полуокружность, внутри которого постоянно генерировалась энергия и за счет теплопроводности отводилась в замкнутую область. В процессе исследования варьировалось положение нагревателя (l — расстояние от стенки области до локального источника тепловыделения). Внутри рассматриваемой полости находился газ, который считался ньютоновской жидкостью с постоянными теплофизическими свойствами, удовлетворяющий приближению Буссинеска.

Процессы переноса тепла, массы и импульса в рассматриваемой области были описаны с помощью системы нестационарных плоских уравнений Обербека–Буссинеска, а также нестационарным двумерным уравнением теплопроводности для описания распределения температуры внутри источника энергии. Математическая модель была сформулирована в безразмерных преобразованных переменных «функция тока – завихренность – температура»:

$$\frac{\partial\Omega}{\partial\tau} + \frac{\partial\Psi}{\partial Y}\frac{\partial\Omega}{\partial X} - \frac{\partial\Psi}{\partial X}\frac{\partial\Omega}{\partial Y} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\left(\frac{\partial^2\Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\Omega}{\partial Y^2}\right) + \frac{\partial\Theta}{\partial X},\tag{1}$$



Рис. 1. Расчетная область

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Theta}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{Pr \cdot Ra}} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right), \tag{3}$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{a_w/a_f}{\sqrt{Pr \cdot Ra}} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} + Os \right). \tag{4}$$

Здесь X, Y — безразмерные координаты, τ — безразмерное время, Ψ — безразмерная функция тока, Ω — безразмерная завихренность, Θ — безразмерная температура, ν — коэффициент кинематической вязкости, a — коэффициент температуропроводности, g — ускорение свободного падения, L — длина области, β — температурный коэффициент объемного расширения, Q — объемный тепловой поток от источника тепловыделения, λ_w — теплопроводность материала нагревателя, a_w — температуропроводность материала источника энергии, a_f — температуропроводность газа, Pr — число Прандтля, Ra — число Рэлея, Os — число Остроградского.

В качестве характерных величин, используемых для получения безразмерных уравнений (1)-(4), выступали следующие параметры:

L -характерная длина, $t_0 = \sqrt{\frac{L}{g\beta\Delta T}} -$ характерное время, $V_0 = \sqrt{g\beta\Delta TL} -$ характерная скорость, $\Delta T = T_h - T_c$ — масштаб температуры, $\psi_0 = \sqrt{g\beta\Delta TL^3}$ — масштаб функции тока, $\omega_0 = \sqrt{\frac{g\beta\Delta T}{L}}$ — масштаб завихренности. Сформулированные дифференциальные уравнения в частных производных были дополнены следующими замыкающими соотношениями. *Начальные условия:* $\Psi = \Omega = 0$; $\Theta = 0.5$.



Рис. 2. Влияние сеточных параметров на профиль температуры в сечении Y = 0.5 (слева) и на изотермы внутри полости (справа)

Граничные условия:

на границах X = 0 и X = 1: $\Psi = 0$, $\frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0$, $\Omega = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2}$, $\Theta = 0$; на границах Y = 0 (вне источника) и Y = 1: $\Psi = 0$, $\frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0$, $\Omega = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2}$, $\frac{\partial \Theta}{\partial Y} = 0$; на границе источника: $\frac{\partial \Theta_w}{\partial \overline{n}} = \frac{\lambda_f}{\lambda_w} \frac{\partial \Theta_f}{\partial \overline{n}}$.

Представленная система уравнений (1)-(4) с начальными и граничными условиями, была решена численно на основе метода конечных разностей на равномерной сетке 150×150 узлов. Размерность сетки была выбрана на основе анализа влияния сеточных параметров на точность получаемых решений, а также исходя из адекватности времени расчета для представленной двумерной задачи (см. рис. 2).

Для решения уравнений параболического типа (1), (3)–(4) была применена локально-одномерная схема А. А. Самарского, позволяющая переходить от плоской задачи к системе одномерных. Для аппроксимации конвективных слагаемых была использована монотонная аппроксимация А. А. Самарского, для диффузионных слагаемых — центральные разности со вторым порядком точности, нестационарный член уравнения был аппроксимирован с помощью схемы первого порядка. Получившаяся в результате аппроксимации система линейных алгебраических уравнений была решена с помощью метода прогонки. Уравнение эллиптического типа (2) было аппроксимировано с использованием центральных разностей со вторым порядком точности. Получившаяся система линейных алгебраических уравнений была решена методом последовательной верхней релаксации. Разработанный численный алгоритм был апробирован на множестве модельных задач [19–21].

§2. Результаты и обсуждение

Математическое моделирование представленной задачи проводилось при следующих значениях определяющих параметров: $10^4 \leq Ra \leq 10^5$, Pr = 0.7, Os = 1, $0.02 \leq l/L \leq 0.35$, $\lambda_w = 150 \,\mathrm{Bt/(M\cdot K)}$, $\lambda_f = 0.022 \,\mathrm{Bt/(M\cdot K)}$, $a_w = 8.8 \cdot 10^{-5} \,\mathrm{m^2/c}$, $a_f = 1.9 \cdot 10^{-5} \,\mathrm{m^2/c}$, $0 \leq \tau \leq 6000$.

Распределения изолиний функции тока и температуры в момент времени $\tau = 6000$, что соответствует стационарному режиму, при числах Рэлея 10^4 и 10^5 представлены на рис. 3. Можно

123



Рис. 3. Линии тока Ψ и изотермы Θ при $\tau = 6000, Ra = 10^4$ и 10^5

отметить, что в каждом из представленных случаев в исследуемой области образуется симметричная картина течения вследствие центрального расположения нагревателя, а именно, над локальным источником энергии образуются две симметричные конвективные ячейки. Увеличение числа Рэлея проявляется в повышении интенсивности циркуляции внутри полости. Конвективные ячейки смещаются в верхнюю часть полости и деформируются в результате влияния источника тепловыделения на характер течения в области. При $Ra = 10^4$ интенсивность потока не столь велика, и конвективные ячейки приобретают эллиптическую форму. Распределения изолиний температуры также симметрично ориентированы относительно центра в рассматриваемой области. При увеличении числа Рэлея толщина теплового факела уменьшается и он вытягивается вертикально вверх, что характеризует интенсификацию теплообмена в области.

На рис. 4 отображены изолинии функции тока и температуры при $Ra = 10^4$, $\tau = 6000$ и различных значениях l/L, соответствующих смещению источника энергии вдоль нижней стенки. Как видно из рисунка, при низких значениях l/L, соответствующих максимальному приближению нагревателя к охлаждающей стенке, образуется большая область конвективного течения с ядром в центре полости; и в случае l/L = 0.02 с одной дополнительной рециркуляционной зоной в верхнем левом углу, возникающей вследствие смещения теплового факела к центру полости под действием нисходящего холодного фронта газа от охлаждающей вертикальной поверхности. При l/L = 0.09 непосредственно над левой частью источника энергии образуется еще одно рециркуляционное течение, которое при последовательном смещении нагревателя от охлаждающей стенки к центру соединяется с верхней конвективной ячейкой, в результате вся полость делится на две подобласти. При дальнейшем передвижении нагревателя к середине области размеры конвективных зон последовательно выравниваются, и полная симметрия наступает в случае центрального расположения нагревателя.

Изолинии функции тока и изотермы при $Ra = 10^5$ в момент времени $\tau = 6000$ и при различных l/L представлены на рис. 5. Видно, что с ростом числа Рэлея при приближении нагре-

2018. Т. 28. Вып. 1



Рис. 4. Линии тока Ψ и изотермы Θ при $Ra = 10^4$ в момент времени $\tau = 6000$ и при различных расположениях источника тепловыделения

вателя к вертикальной стенке образуются три конвективные ячейки: большая циркуляционная зона находится в центре области, вихрь среднего размера располагается в верхнем левом углу, и небольшая циркуляция находится в области над левой частью источника энергии. По аналогии со случаем $Ra = 10^4$ при последовательном удалении нагревателя от охлаждающей поверхности две зоны конвективного течения соединяются в одну, только в отличие от меньшего значения числа Рэлея это слияние происходит дальше от стенки вследствие более высокой интенсивности движения внутри полости, при этом характер искривления теплового факела также остается неизменным на большем расстоянии l/L от вертикальной стенки.

Распределения средней температуры внутри рассматриваемой области, а также внутри локального источника энергии в случае $Ra = 10^4$ при различных положениях нагревателя в зависимости от времени представлены на рис. 6. Анализируя полученные результаты, можно заключить, что, изменяя положение нагревателя, обычно представляющего собой активный элемент электронной схемы, можно увеличить теплоотвод с его поверхности. При приближе-



Рис. 5. Линии тока Ψ и изотермы Θ при $Ra = 10^5$ в момент времени $\tau = 6000$ и при различных расположениях источника тепловыделения





Рис. 6. Средняя температура в нагревателе (a) и области (б) при $Ra = 10^4$



Рис. 7. Максимальные значения функции тока

нии нагревателя к охлаждающей стенке его температура, как и температура во всей области, понижается, в то время как максимальные значения средней температуры внутри полости и внутри тепловыделяющего элемента наблюдаются при l/L = 0.09 и l/L = 0.12, что соответствует объединению рециркуляционных зон. Следует также отметить, что нелинейная зависимость средней температуры источника от расстояния до охлаждающей стенки обусловлена влиянием гидродинамики, а именно формированием застойной зоны вблизи поверхности тепловыделяющего элемента, препятствующей интенсивному теплосъему.

2018. Т. 28. Вып. 1

На рис. 7 представлены зависимости максимальных значений функции тока от времени в рассматриваемой области при $Ra = 10^4$. Эти значения показывают характер изменения скорости течения воздушных масс в области в зависимости от смещения локального источника тепловыделения. Необходимо отметить, что максимальные скорости течения при соседних положениях l/L = 0.09 и l/L = 0.12 значительно отличаются. Такое поведение обусловлено тем, что после слияния небольших рециркуляционных потоков в области формируется еще один крупный вихрь, деформирующий прежнюю основную конвективную ячейку, и, как результат, интенсивность течения снижается.

На рис. 8 представлены средние температуры внутри источника энергии при $Ra = 10^5$ в зависимости от времени. Сравнивая полученные при $Ra = 10^4$ и $Ra = 10^5$ значения, можно сделать вывод о том, что за счет увеличения интенсивности потока повышается и скорость теплосъема с поверхности тепловыделяющего элемента. Следует также отметить, что с ростом числа Рэлея уменьшается перепад между максимальным и минимальным значениями средней температуры внутри источника. Например, при $Ra = 10^4$ максимальная разница между средними температурами в источнике (для положений l/L = 0.02 и l/L = 0.09) достигала 23 %, в то время как при $Ra = 10^5$ она уже составляет менее 14 %.



Рис. 8. Средняя температура в источнике энергии при $Ra = 10^5$

§3. Заключение

Были проведены численные исследования свободной конвекции в замкнутом квадратном контуре с локальным тепловыделяющим элементом полуцилиндрической формы. В результате были получены распределения изолиний функции тока и температуры в широком диапазоне изменения числа Рэлея и при различных положениях тепловыделяющего элемента. Установлено, что расположение нагревательного элемента в рассматриваемой области оказывает существенное влияние на гидродинамику и теплоперенос. При этом в зависимости от интенсивности течения можно контролировать температурный режим в блоках радиоэлектронной аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мартюшев С.Г., Шеремет М.А. Численный анализ сопряженного конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутой полости, заполненной диатермичной средой // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2012. Вып. 3. С. 114–125. DOI: 10.20537/vm120311
- Мартюшев С.Г., Мирошниченко И.В., Шеремет М.А. Численный анализ сопряженной термогравитационной конвекции теплового поверхностного излучения в замкнутом кубе, заполненном диатермичной средой // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2014. Вып. 2. С. 111–120. DOI: 10.20537/vm140208
- Палымский И.Б. О численном моделировании трехмерной конвекции // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2009. Вып. 4. С. 118–132. DOI: 10.20537/vm090412
- 4. Алешкова И.А, Шеремет М.А. Математическое моделирование сопряженной термогравитационной конвекции в пористой среде // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2010. Вып. 2. С. 49–56. DOI: 10.20537/vm100204
- 5. Трифонова Т.А., Шеремет М.А. Численные исследования нестационарных режимов сопряженной естественной конвекции в пористой цилиндрической области (модель Дарси–Буссинеска) // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5. № 2. С. 179–191.
- 6. Трифонова Т.А., Шеремет М.А. Сравнительный анализ моделей Дарси и Бринкмана при исследовании нестационарных режимов сопряженной естественной конвекции в пористой цилиндрической области // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5. № 4. С. 623–634.
- Kondrashov A., Burkova E. Stationary convective regimes in a thin vertical layer under the local heating from below // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 118. P. 58–65. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.096
- Sojoudi A., Saha S.C., Gu Y.T. Natural convection due to differential heating of inclined walls and heat source placed on bottom wall of an attic shaped space // Energy and Buildings. 2015. Vol. 89. P. 153–162. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.12.042
- 9. Rashad A.M., Ismael M.A., Chamkha A.J., Mansour M.A. MHD mixed convection of localized heat source/sink in a nanofluid-filled lid-driven square cavity with partial slip // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2016. Vol. 68. P. 173–186. DOI: 10.1016/j.jtice.2016.08.033
- Al-Zamily A., Amin M.R. Natural convection and entropy generation in a nanofluid-filled semi-circular enclosure with heat flux source // Procedia Engineering. 2015. Vol. 105. P. 418–424. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.05.028
- 11. Mansour M.A., Ahmed S.E. A numerical study on natural convection in porous media-filled an inclined triangular enclosure with heat sources using nanofluid in the presence of heat generation effect // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2015. Vol. 18. Issue 3. P. 485–495. DOI: 10.1016/j.jestch.2015.03.007
- Fontana E., Capeletto C.A., da Silva A., Mariani V.C. Three-dimensional analysis of natural convection in a partially-open cavity with internal heat source // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 61. P. 525–542. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.047
- 13. Roslan R., Saleh H., Hashim I., Bataineh A.S. Natural convection in an enclosure containing a sinusoidally heated cylindrical source // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 70. P. 119–127. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.011
- Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Conjugate natural convection in an enclosure with a heat source of constant heat transfer rate // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 54. Issue 1–3. P. 260–268. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.09.046

- Zhang T., Che D. Double MRT thermal lattice Boltzmann simulation for MHD natural convection of nanofluids in an inclined cavity with four square heat sources // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 94. P. 87–100. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.071
- Muthtamilselvan M., Periyadurai K., Doh D.H. Effect of uniform and nonuniform heat source on natural convection flow of micropolar fluid // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115. P. 19–34. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.134
- Sourtiji E., Ganji D.D., Gorji-Bandpy M., Seyyedi S.M. Numerical study of periodic natural convection in a nanofluid-filled enclosure due to transitional temperature of heat source // Powder Technology. 2014. Vol. 259. P. 65–73. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.03.055
- Nardini G., Paroncini M., Vitali R. Experimental and numerical analysis of the effect of the position of a bottom wall hot source on natural convection // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 92. P. 236–345. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.09.085
- 19. Шеремет М.А. Сопряженные задачи естественной конвекции. Замкнутые области с локальными источниками тепловыделения. Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 176 с.
- 20. Gibanov N., Sheremet M. Unsteady natural convection in a cubical cavity with a triangular heat source // International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. 2017. Vol. 27. P. 1795–1813. DOI: 10.1108/HFF-06-2016-0234
- 21. Гибанов Н.С. Шеремет М.А. Влияние формы и размеров локального источника энергии на режимы конвективного теплопереноса в квадратной полости // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т. 7. № 2. С. 271–280.

Поступила в редакцию 18.01.2018

Гибанов Никита Сергеевич, аспирант, кафедра теоретической механики, Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: gibanov@mail.tsu.ru

Шеремет Михаил Александрович, д. ф.-м. н., профессор, кафедра теоретической механики, Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: sheremet@math.tsu.ru

N.S. Gibanov, M.A. Sheremet

The impact of position of the local volumetric heat generating source of a semi-cylindrical shape on heat exchange inside the cavity

Citation: Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki, 2018, vol. 28, issue 1, pp. 119–130 (in Russian).

Keywords: closed contour, heat generating source, convection, numerical simulation.

MSC2010: 76R10, 80A20

DOI: 10.20537/vm180111

Mathematical modeling of heat transfer processes inside a closed square cavity having a local heat source of a semi-cylindrical shape has been performed. The effect of the heater location on the evolution of flow structures has been analyzed. The considered cavity was a closed square contour with a heat-generating element located on the bottom wall. Side walls were considered as isothermal. The presented boundary problem has been formulated in dimensionless variables such as stream function–vorticity–temperature and it has been solved by a finite difference method. The effects of Rayleigh numbers in the range of 10^4-10^5 and the position of the local energy source on heat exchange inside the cavity have been estimated.

REFERENCES

 Martyushev S.G., Sheremet M.A. Numerical analysis of conjugate convective-radiative heat transfer in an enclosure filled with diathermanous medium, Vestn. Udmurt. Univ. Mat. Mekh. Komp'yut. Nauki, 2012, issue 3, pp. 114–125 (in Russian). DOI: 10.20537/vm120311

- Martyushev S.G., Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A. Numerical analysis of conjugate natural convection and thermal surface radiation in a cube filled with diathermanous medium, Vestn. Udmurt. Univ. Mat. Mekh. Komp'yut. Nauki, 2014, issue 2, pp. 111–120 (in Russian). DOI: 10.20537/vm140208
- Palymskiy I.B. About numerical simulation of the three-dimentional convection, Vestn. Udmurt. Univ. Mat. Mekh. Komp'yut. Nauki, 2009, issue 4, pp. 118–132 (in Russian). DOI: 10.20537/vm090412
- Aleshkova I.A., Sheremet M.A. Mathematical simulation of conjugate natural convection in a porous medium, Vestn. Udmurt. Univ. Mat. Mekh. Komp'yut. Nauki, 2010, issue 2, pp. 49–56 (in Russian). DOI: 10.20537/vm100204
- Trifonova T.A., Sheremet M.A. Numerical simulation of unsteady conjugate natural convection in a cylindrical porous domain (Darcy-Boussinesq model), *Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, no. 2, pp. 179–191 (in Russian).
- Trifonova T.A., Sheremet M.A. Comparative analysis of Darcy and Brinkman models at studying of transient conjugate natural convection in a porous cylindrical cavity, *Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 623–634 (in Russian).
- Kondrashov A., Burkova E. Stationary convective regimes in a thin vertical layer under the local heating from below, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 118, pp. 58–65. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.096
- Sojoudi A., Saha S.C., Gu Y.T. Natural convection due to differential heating of inclined walls and heat source placed on bottom wall of an attic shaped space, *Energy and Buildings*, 2015, vol. 89, pp. 153–162. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.12.042
- Rashad A.M., Ismael M.A., Chamkha A.J., Mansour M.A. MHD mixed convection of localized heat source/sink in a nanofluid-filled lid-driven square cavity with partial slip, *Journal of the Taiwan Institute* of Chemical Engineers, 2016, vol. 68, pp. 173–186. DOI: 10.1016/j.jtice.2016.08.033
- Al-Zamily A., Amin M.R. Natural convection and entropy generation in a nanofluid-filled semi-circular enclosure with heat flux source, *Procedia Engineering*, 2015, vol. 105, pp. 418–424. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.05.028
- Mansour M.A., Ahmed S.E. A numerical study on natural convection in porous media-filled an inclined triangular enclosure with heat sources using nanofluid in the presence of heat generation effect, *Engineer*ing Science and Technology, an International Journal, 2015, vol. 18, issue 3, pp. 485–495. DOI: 10.1016/j.jestch.2015.03.007
- Fontana E., Capeletto C.A., da Silva A., Mariani V.C. Three-dimensional analysis of natural convection in a partially-open cavity with internal heat source, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 61, pp. 525–542. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.047
- Roslan R., Saleh H., Hashim I., Bataineh A.S. Natural convection in an enclosure containing a sinusoidally heated cylindrical source, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 70, pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.011
- Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Conjugate natural convection in an enclosure with a heat source of constant heat transfer rate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, vol. 54, issue 1–3, pp. 260–268. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.09.046
- Zhang T., Che D. Double MRT thermal lattice Boltzmann simulation for MHD natural convection of nanofluids in an inclined cavity with four square heat sources, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 94, pp. 87–100. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.071
- Muthtamilselvan M., Periyadurai K., Doh D.H. Effect of uniform and nonuniform heat source on natural convection flow of micropolar fluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 115, pp. 19–34. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.134
- Sourtiji E., Ganji D.D., Gorji-Bandpy M., Seyyedi S.M. Numerical study of periodic natural convection in a nanofluid-filled enclosure due to transitional temperature of heat source, *Powder Technology*, 2014, vol. 259, pp. 65–73. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.03.055
- Nardini G., Paroncini M., Vitali R. Experimental and numerical analysis of the effect of the position of a bottom wall hot source on natural convection, *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 92, pp. 236–345. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.09.085
- 19. Sheremet M.A. Sopryazhennye zadachi estestvennoi konvektsii (Conjugate natural convection), Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011, 167 p.
- 20. Gibanov N., Sheremet M. Unsteady natural convection in a cubical cavity with a triangular heat source, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2017, vol. 27, issue 8, pp. 1795–1813. DOI: 10.1108/HFF-06-2016-0234
- 21. Gibanov N.S. Sheremet M.A. Effect of shape and sizes of a local heat source on convective heat transfer in a square cavity, *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 271–280 (in Russian).

Received 18.01.2018

Gibanov Nikita Sergeevich, Post-Graduate Student, Department of Theoretical Mechanics, Tomsk State University, pr. Lenina, 36, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: gibanov@mail.tsu.ru

Sheremet Mikhail Aleksandrovich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Theoretical Mechanics, Tomsk State University, pr. Lenina, 36, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: sheremet@math.tsu.ru