УДК 536.24

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО БЛОКА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗАМКНУТОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ОБОГРЕВАЕМОЙ ПОЛОСТИ

Е.В. Шулепова

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

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

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

E-mail: elena.vasilevna.1996@mail.ru

INTERNAL HEAT-CONDUCTING BODY EFFECT ON NATURAL CONVECTION STRENGTH IN A DIFFERENTIALLY-HEATED CAVITY

E.V. Shulepova

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

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

E-mail: elena.vasilevna.1996@mail.ru

Abstract. *This research is devoted to the numerical simulation of natural convection in a cavity with an internal heat-conducting block. The Oberbeck-Boussinesq partial differential equations written using non-primitive variables have been solved by the finite difference technique. The analysis of the influence of the inner body geometry and the Rayleigh number on the flow structure and heat transfer has been carried out. The optimal values of the control parameters illustrating the heat transfer enhancement have been defined.*

Введение. Микроэлектроника является первым звеном технологической цепочки радиоэлектронной промышленности. Продукция микроэлектроники (компоненты) используется для производства плат и частей оборудования, которые в дальнейшем применяются при производстве готовых изделий.

В современной жизни любая техника, которой мы пользуемся ежедневно, наполнена различными микроэлектронными компонентами. Одной из важных проблем в электронике является перегрев частей оборудования и её поломка. Немаловажную роль в отведении тепла от составных частей электронной техники играет их расположение и геометрическая форма.

Цель представленной работы – численный анализ естественной конвекции в квадратной дифференциально-обогреваемой полости с внутренним теплопроводным блоком и изотермическими вертикальными границами.

Определяющие уравнения и метод решения. Математическое описание поставленной задачи проведено в рамках механики сплошной среды с использованием основных законов сохранения массы, импульса и энергии. Ньютоновская теплопроводная жидкость, удовлетворяющая приближению Буссинеска, циркулирует внутри квадратной области (рисунок 1).

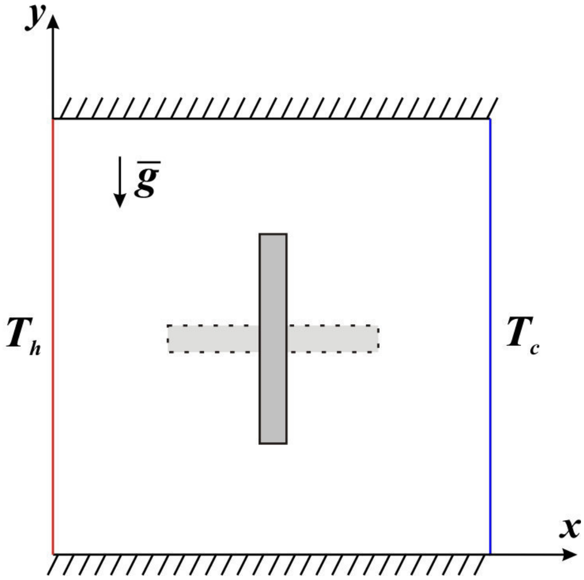

Рис. 1. Область исследования

Для моделирования теплопереноса в замкнутой полости с внутренним блоком за основу были взяты дифференциальные уравнения в размерных переменных «скорость–давление», имеющие следующий вид [1, 2]:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\nabla^2 u \tag{2}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\nabla^2 v+\rho g\beta\left(T-T_c\right) \tag{3}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{4}$$

$$\left(\rho\tilde{n}\right)_b\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda_b\nabla^2 T \tag{5}$$

Здесь x, y – координаты декартовой системы координат; t – время; u, v – составляющие скорости в проекции на оси x, y, соответственно; ρ – плотность; p – давление; T – температура; μ – коэффициент динамической вязкости; β – температурный коэффициент объемного расширения; a – коэффициент температуропроводности; c_b – коэффициент теплоемкости материала внутреннего блока; λ_b – коэффициент теплопроводности материала внутреннего блока.

Краевая задача формулируется с использованием безразмерных преобразованных переменных «функция тока – завихренность». В результате использования новых функций и обезразмеривания задачи, нестационарные дифференциальные уравнения примут вид [2, 3]:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}=-\omega \tag{6}$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial\tau}+\frac{\partial\psi}{\partial y}\frac{\partial\omega}{\partial x}-\frac{\partial\psi}{\partial x}\frac{\partial\omega}{\partial y}=\sqrt{\frac{\Pr}{\mathrm{Ra}}}\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial\theta}{\partial x} \tag{7}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}+\frac{\partial\psi}{\partial\overline{y}}\frac{\partial\theta}{\partial\overline{x}}-\frac{\partial\psi}{\partial\overline{x}}\frac{\partial\theta}{\partial\overline{y}}=\frac{1}{\sqrt{\mathrm{Pr}\cdot\mathrm{Ra}}}\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial\overline{x}^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial\overline{y}^2}\right) \tag{8}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{a_b/a_f}{\sqrt{\mathrm{Pr}\cdot\mathrm{Ra}}}\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial\overline{x}^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial\overline{y}^2}\right) \tag{9}$$

Начальные и граничные условия для сформулированной системы дифференциальных уравнений (6)–(9) в безразмерном виде выглядят следующим образом:

$$\tau=0:\ \psi=0,\ \omega=0,\ \theta=0.5\ \text{ при }\ 0\le\overline{x}\le1,\ 0\le\overline{y}\le1;$$

$$\tau>0:\ \psi=0,\ \frac{\partial\psi}{\partial\overline{x}}=0,\ \theta=1\ \text{ при }\ \overline{x}=0,\ 0\le\overline{y}\le1;$$

$$\psi=0,\ \frac{\partial\psi}{\partial\overline{x}}=0,\ \theta=0\ \text{ при }\ \overline{x}=1,\ 0\le\overline{y}\le1;$$

$$\psi=0,\ \frac{\partial\psi}{\partial\overline{y}}=0,\ \frac{\partial\theta}{\partial\overline{y}}=0\ \text{ при }\ \overline{y}=0,1,\ 0\le\overline{x}\le1$$

$$\psi=\xi,\ \frac{\partial\psi}{\partial\overline{n}}=0,\ \begin{cases}\theta_f=\theta_b\\ \dfrac{\lambda_f}{\lambda_b}\dfrac{\partial\theta_f}{\partial\overline{n}}=\dfrac{\partial\theta_b}{\partial\overline{n}}\end{cases}\ \text{на внутренней границе блока}$$

При решении поставленной краевой задачи используется метод конечных разностей. Область, в которой определяется решение дифференциальных уравнений, покрывается расчетной равномерной сеткой – дискретным множеством точек. При переходе от дифференциальной задачи к разностной все дифференциальные операторы, входящие в уравнения, заменяются их разностными аналогами.

Численные исследования проведены в широком диапазоне изменения определяющих параметров, характеризующих режимы конвективного теплопереноса: число Рэлея ($Ra = 10^4$–10^6), число Прандтля ($Pr = 6.82$). Исследования также проводились для различных положений внутреннего теплопроводного блока и его геометрической формы (квадратная и прямоугольная).

В результате моделирования получены распределения изолиний функции тока и температуры, отражающие внутреннюю гидродинамику и тепловое состояние анализируемой системы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sivaraj C., Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A. Influence of thermal radiation on thermogravitational convection in a tilted chamber having heat-producing solid body // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 115. – P. 104611.
2. Pop I., Sheremet M.A., Grosan T. Thermal convection of nanoliquid in a double-connected chamber // Nanomaterials. – 2020. – Vol. 10(3). – P. 588.
3. Shulepova E.V., Sheremet M.A., Oztop H.F. Natural convection of Al_2O_3–water nanosuspension in a semi-open domain with composite fin // Physics of Fluids. – 2021. – Vol. 33. – P. 033606.