УДК 536.24

ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО ИСТОЧНИКА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ОБЪЕМНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ В ЗАМКНУТОЙ ДВУСВЯЗНОЙ 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

LOCATION EFFECT OF THE INTERNAL PERIODICAL VOLUMETRIC HEAT-GENERATING SOURCE ON THE STRUCTURE OF A CONVECTIVE FLOW IN A CLOSED DOUBLE-CONNECTED 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 work deals with numerical simulation of natural convection in a closed cavity with internal unit of periodical volumetric heat generation. The governing partial-differential Oberbeck–Boussinesq equations have been formulated using non-primitive variables and solved by the finite difference method. Analysis of thermal oscillation frequency, temperature difference and heater location on flow structures and heat transfer patterns has been performed. Optimal values of governing parameters illustrating the heat transfer enhancement have been defined.*

Введение. Развитие микроэлектронных систем требует детального изучения транспортных процессов внутри электронных сборок с целью снижения тепловых нагрузок на составные элементы. В настоящее время существует множество активных и пассивных подходов к интенсификации теплоотвода [1], но наиболее простым методом пассивного охлаждения, отличающимся низким уровнем шума и высокой степенью надежности в случае небольших тепловых потоков, является формирование свободноконвективного режима переноса энергии внутри полости с тепловыделяющим элементом. Целью настоящей работы является математическое моделирование нестационарных режимов естественной конвекции внутри замкнутой полости с источником периодического объемного тепловыделения в условиях двусвязности геометрии анализируемого объекта.

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 циркулирует внутри двусвязной области (рисунок 1). Предполагается, что условия применения приближения Буссинеска выполнены. Тепловое излучение внутри полости считается пренебрежимо малым по сравнению с режимом естественной конвекции. Плотность объемного тепловыделения внутреннего источника энергии описывается на основе следующего закона: $Q(t) = 0.5Q_0\left\{1-\cos\left(ft\right)\right\}$, который отражает колебательное изменение производительности внутреннего элемента.

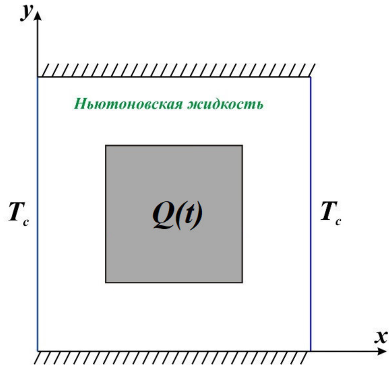

Рис. 1. Область исследования

Для моделирования теплопереноса в приближении Буссинеска в замкнутой полости с внутренним блоком периодического объемного тепловыделения за основу были взяты дифференциальные уравнения в размерных переменных «скорость–давление», имеющие следующий вид [2, 3]:

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

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

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

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

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

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

Для сокращения времени вычислений за счет исключения поля давления вводятся безразмерные функция тока ψ и завихренность ω [3, 4]. В результате использования новых функций и обезразмеривания задачи, нестационарные дифференциальные уравнения примут вид [3, 4]:

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

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

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

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{a_b/a_f}{\sqrt{\Pr\cdot\mathrm{Ra}}}\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial\bar{x}^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial\bar{y}^2}+\frac{1}{2}\{1-\cos(\gamma\tau)\}\right) \tag{9}$$

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

$$\begin{gathered}\tau=0:\ \psi=0,\ \omega=0,\ \theta=0\ \text{ при }\ 0\le\bar{x}\le1,\ \ 0\le\bar{y}\le1;\\ \tau>0:\ \psi=0,\ \frac{\partial\psi}{\partial\bar{x}}=0,\ \theta=0\ \text{ при }\ \bar{x}=0,1,\ \ 0\le\bar{y}\le1;\\ \psi=0,\ \frac{\partial\psi}{\partial\bar{y}}=0,\ \frac{\partial\theta}{\partial\bar{y}}=0\ \text{ при }\ \bar{y}=0,\,1,\ \ 0\le\bar{x}\le1\\ \psi=\xi,\ \frac{\partial\psi}{\partial\bar{n}}=0,\ \begin{cases}\theta_f=\theta_b\\ \dfrac{\lambda_f}{\lambda_b}\dfrac{\partial\theta_f}{\partial\bar{n}}=\dfrac{\partial\theta_b}{\partial\bar{n}}\end{cases}\ \text{на внутренней границе блока}\end{gathered} \tag{10}$$

Сформулированная краевая задача (6)–(10) была решена численно методом конечных разностей на равномерной сетке.

Для определения величины функции тока на внутренней границе блока была разработана специальная процедура, основанная на однозначности поля давления вдоль внутренней поверхности блока [3, 4]:

$$\int\frac{\partial p}{\partial\eta}\,d\sigma=0$$

Здесь η – единичный тангенциальный вектор вдоль границы источника энергии, σ – внутренняя поверхность блока.

Разработанная процедура позволила определить значение функции тока на поверхности внутреннего источника энергии [3, 4].

Численные исследования проведены в широком диапазоне изменения определяющих параметров, характеризующих режимы конвективного теплоперенос. Получены распределения изолиний функции тока и температуры, отражающие влияние температурного напора, частоты температурных осцилляций и положения источника энергии внутри полости. Установлены наиболее оптимальные параметры, характеризующие интенсификацию теплоотвода.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bahiraei M., Heshmatian S. Electronics cooling with nanofluids: A critical review // Energy Conversion and Management. – 2018. – Vol. 172. – P. 438–456.
2. 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. – 104611.
3. Pop I., Sheremet M.A., Grosan T. Thermal convection of nanoliquid in a double-connected chamber // Nanomaterials. – 2020. – Vol. 10(3). – 588.
4. 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. – 033606.