

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЛОКАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ НА РЕЖИМЫ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ

¹Гибанов Н.С., ^{1,2}Шеремет М.А.
¹Томский государственный университет
²Томский политехнический университет
fire9n@mail.ru

Введение

Развитие компонентной базы радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники требует создания эффективных систем охлаждения как активного, так и пассивного типа [1]. Разработка пассивных систем охлаждения затрагивает не только выбор оптимального материала для ограждающей оболочки и подложки электронной системы, но и форму тепловыделяющих элементов электронной аппаратуры.

Целью данной работы является численный анализ влияния формы тепловыделяющего элемента на режимы естественной конвекции в замкнутой полости. В качестве области решения рассматривается герметичный электронный контур с тепловыделяющим элементом, расположенным на нижней стенке.

Постановка задачи

В данной работе исследуются нестационарные режимы естественной конвекции в замкнутой квадратной полости с источником энергии постоянной температуры (рис. 1).

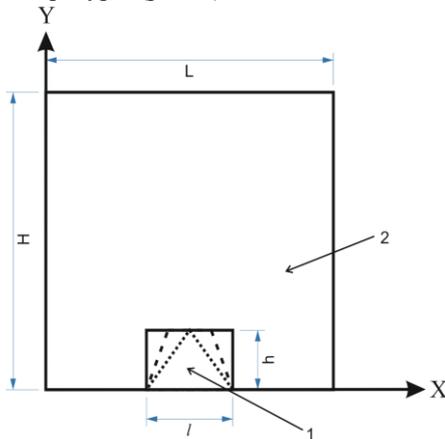


Рис. 1. Область решения: 1 – источник тепловыделения; 2 – газовая полость

Предполагается, что на вертикальных стенках поддерживается температура охлаждения, которая технически может быть реализована за счет введения тепловых трубок, а горизонтальные стенки являются адиабатическими. Теплофизические характеристики внутренней среды не зависят от температуры, а режим течения – ламинарный. Жидкость, заполняющая внутреннюю полость, считается ньютоновской, теплопроводной и удовлетворяющей приближению Буссинеска.

Процесс переноса тепла описывается системой нестационарных двумерных уравнений конвекции Обербека–Буссинеска в безразмерных переменных «функция тока – завихренность» [2].

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

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

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

где $\text{Pr} = \nu/a$ – число Прандтля;

$\text{Ra} = g\beta(T_h - T_c)L^3/\nu a$ – число Рэлея; a – коэффициент температуропроводности внутренней среды; ν – коэффициент кинематической вязкости внутренней среды, β – температурный коэффициент объемного расширения, g – ускорение свободного падения, T_h – температура источника тепловыделения, T_c – температура вертикальных стенок.

Полученная система дифференциальных уравнений решалась методом конечных разностей на различных равномерных сетках для различных форм источников энергии. Аппроксимация конвективных и диффузионных слагаемых в дифференциальных уравнениях проводилась на основе разностных схем второго порядка точности. Полученная система линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей решалась методом прогонки. Разработанный численный метод был протестирован на ряде модельных задач [3, 4].

Результаты решения

Расчеты проводились при числах Рэлея равных 10^5 и 10^6 в случаях, когда источник энергии имеет форму прямоугольника, равнобедренной трапеции и равнобедренного треугольника. На рис. 2–5 представлены распределения линий тока и изотерм при различных значениях числа Рэлея и различных формах источника энергии.

Увеличения числа Рэлея приводит к сгущению изотерм вблизи как вертикальных стенок полости, так и сторон локального источника энергии, что отражает уменьшение толщины теплового пограничного слоя. Следует также отметить интенсификацию течения внутри полости со смещением ядер конвективных ячеек к верхней стенке.

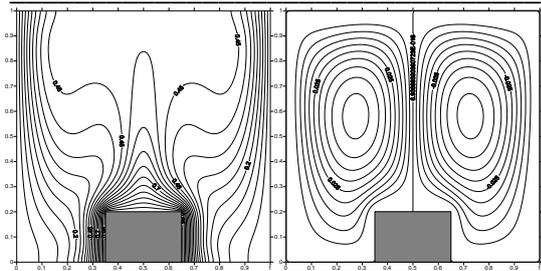


Рис. 2. Линии тока (справа) и изотермы (слева) при $Ra = 10^5$ с прямоугольной формой источника энергии

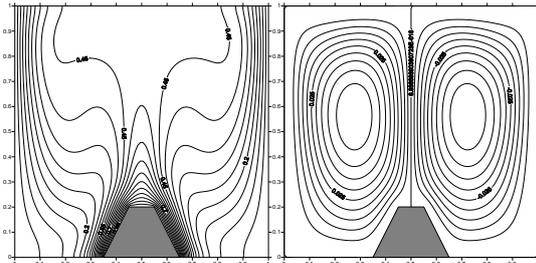


Рис. 3. Линии тока (справа) и изотермы (слева) при $Ra = 10^5$ с трапециевидной формой источника энергии

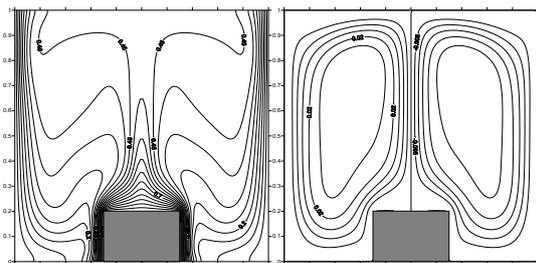


Рис. 4. Линии тока (справа) и изотермы (слева) при $Ra = 10^6$ с прямоугольной формой источника энергии

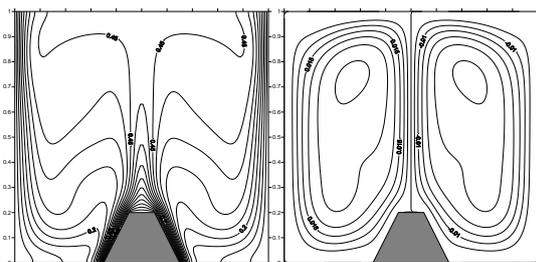


Рис. 5. Линии тока (справа) и изотермы (слева) при $Ra = 10^6$ с трапециевидной формой источника энергии

Изменение формы тепловыделяющего элемента приводит к изменению структуры течения и его интенсивности, а также отражается на геометрических параметрах теплового двумерного факела, формирующегося над источником.

На рис. 6 и 7 представлены временные зависимости среднего числа Нуссельта по периметру источника энергии от числа Рэлея и формы теплового элемента.

При умеренных значениях числа Рэлея $Ra \leq 10^5$ наиболее интенсивный отвод энергии происходит от источника энергии трапециевидной формы (рис. 6). В случае же $Ra = 10^6$ (рис. 7) эффективность трапециевидной формы источника энергии незначительно отличается от прямоугольной формы.

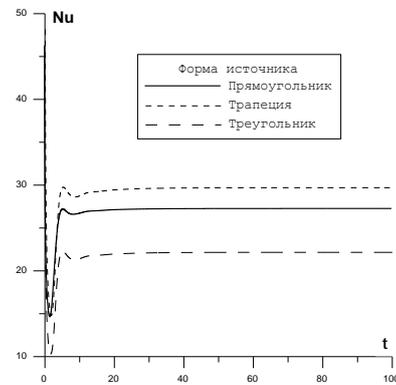


Рис. 6. Зависимость числа Нуссельта от времени при $Ra = 10^5$

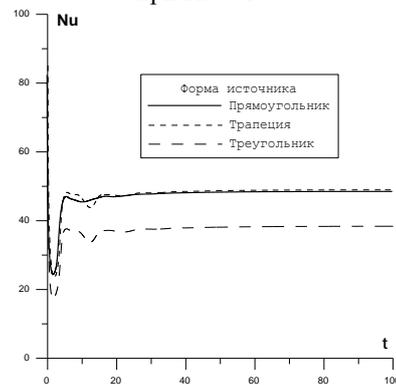


Рис. 7. Зависимость числа Нуссельта от времени при $Ra = 10^6$

■ Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (задание № 13.1919.2014/К).

Литература

1. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен. Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 400с.
2. Шермет М.А. Сопряженные задачи естественной конвекции. Замкнутые области с локальными источниками тепловыделения. – Берлин: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 176 с.
3. Yesiloz G., Aydin O. Laminar natural convection in right-angled triangular enclosures heated and cooled on adjacent walls // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2013. – Vol. 60. – Pp. 365–374.
4. de Vahl Davis G. Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution // Int. J. Numerical Methods of Fluids. – 1983. – Vol. 3. – P. 249–264.