

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ТРАПЕЦИЕВИДНОГО ЛОКАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ  
НА ЭВОЛЮЦИЮ ЛАМИНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ФАКЕЛОВ В ЗАМКНУТЫХ КОНТУРАХ**

Н.С. Гибанов

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. М.А. Шеремет  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Россия, г. Томск, пр. Ленина 36, 634050  
Email: [Fire9n@mail.ru](mailto:Fire9n@mail.ru)

**EFFECT OF TRAPEZOIDAL DISCRETE HEATER SIZES ON EVOLUTION OF LAMINAR  
THERMAL PLUMES IN ENCLOSURES**

N.S. Gibanov

Scientific supervisor: Assoc. Prof, Dr. M.A. Sheremet  
National Research Tomsk State University, Russia, Tomsk, 36 Lenin avenue, 634050  
Email: [Fire9n@mail.ru](mailto:Fire9n@mail.ru)

***Abstract.** In this study, numerical simulation of unsteady laminar natural convection in a cubical cavity having discrete heat source of a trapezoidal shape has been carried out. Governing equations describing fluid flow and heat and mass transfer within the considered area have been represented using the dimensionless vector potential functions, vorticity vector and temperature. Distributions of velocity and temperature fields inside the domain of interest have been obtained. All calculations have been conducted in a wide range of Rayleigh number and heater size.*

**Введение.** Задачи конвективного теплообмена являются наиболее востребованными среди исследователей всего мира в связи с разработкой технических устройств широкого профиля, в которых конвекция представляется определяющим механизмом переноса энергии [1]. Одним из наиболее важных направлений является охлаждение рабочих элементов и блоков радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники.

Целью представленной работы является численный анализ ламинарных нестационарных режимов естественной конвекции в замкнутом кубическом контуре при наличии локального источника энергии трапециевидной формы, а также исследование эволюции тепловых потоков и особенностей течения среды в области при изменении размеров тепловыделяющего элемента.

**Физическая и математическая постановка.** Проводится математическое моделирование естественной конвекции в замкнутой кубической полости, показанной на рисунке 1. На нижней стенке расположен локальный источник энергии трапециевидной формы, размеры которого в процессе исследования менялись в диапазоне:  $0.01 \leq v/V \leq 0.135$ , где  $v$  – объем локального источника тепловыделения,  $V$  – объем всей рассматриваемой полости. Боковые вертикальные стенки ( $x = 0$ ,  $x = L$ ) являются охлаждающими. Остальные стенки считаются адиабатическими. Внутри рассматриваемой полости находится газ, который считался несжимаемой ньютоновской жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска, с постоянными остальными теплофизическими параметрами [2–4].

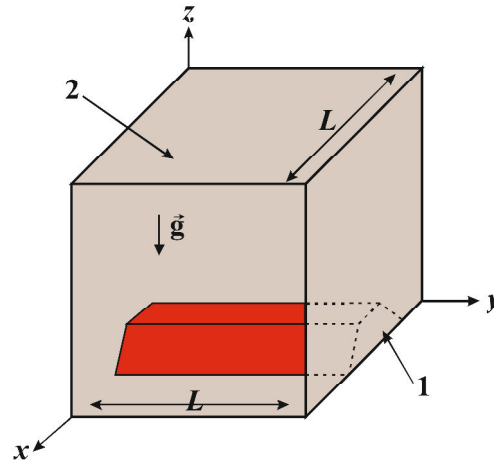


Рис. 1. Область исследования (1 – источник тепловыделения, 2 – полость)

Процессы тепломассопереноса в исследуемом замкнутом контуре описываются системой нестационарных пространственных уравнений Обербека–Буссинеска, записанных с помощью преобразованных переменных «векторный потенциал – вектор завихренности - температура» [5]:

$$\frac{\partial \Omega_x}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega_x}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega_x}{\partial Y} + W \frac{\partial \Omega_x}{\partial Z} - \Omega_x \frac{\partial U}{\partial X} - \Omega_y \frac{\partial U}{\partial Y} - \Omega_z \frac{\partial U}{\partial Z} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \Omega_x + \frac{\partial \Theta}{\partial Y}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Omega_y}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega_y}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega_y}{\partial Y} + W \frac{\partial \Omega_y}{\partial Z} - \Omega_x \frac{\partial V}{\partial X} - \Omega_y \frac{\partial V}{\partial Y} - \Omega_z \frac{\partial V}{\partial Z} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \Omega_y - \frac{\partial \Theta}{\partial X}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Omega_z}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega_z}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega_z}{\partial Y} + W \frac{\partial \Omega_z}{\partial Z} - \Omega_x \frac{\partial W}{\partial X} - \Omega_y \frac{\partial W}{\partial Y} - \Omega_z \frac{\partial W}{\partial Z} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \Omega_z, \quad (3)$$

$$\nabla^2 \Psi_x = -\Omega_x, \quad \nabla^2 \Psi_y = -\Omega_y, \quad \nabla^2 \Psi_z = -\Omega_z, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} + W \frac{\partial \Theta}{\partial Z} = \frac{1}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \nabla^2 \Theta \quad (5)$$

Начальные и граничные условия для приведенной задачи (1)-(5) были представлены в виде:

$$\tau = 0: \Psi_x = \Psi_y = \Psi_z = \Omega_x = \Omega_y = \Omega_z = 0, \quad \Theta = 0.5;$$

$$\tau > 0: \frac{\partial \Psi_x}{\partial X} = \Psi_y = \Psi_z = 0, \quad \Omega_x = 0, \quad \Omega_y = -\frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial X^2}, \quad \Omega_z = -\frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial X^2}, \quad \Theta = 0 \quad \text{при } X = 0, X = 1;$$

$$\Psi_x = \frac{\partial \Psi_y}{\partial Y} = \Psi_z = 0, \quad \Omega_x = -\frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial Y^2}, \quad \Omega_y = 0, \quad \Omega_z = -\frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial Y^2}, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = 0 \quad \text{при } Y = 0, Y = 1;$$

$$\Psi_x = \Psi_y = \frac{\partial \Psi_z}{\partial Z} = 0, \quad \Omega_x = -\frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial Z^2}, \quad \Omega_y = -\frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial Z^2}, \quad \Omega_z = 0, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial Z} = 0 \quad \text{при } Z = 0, Z = 1;$$

$\Theta = 1$  на поверхности источника тепловыделения.

Поставленная краевая задача (1)–(5) была решена на основе метода конечных разностей [6] с использованием локально-одномерной схемы Самарского, для упрощения процесса решения пространственной задачи, и с дальнейшим применением монотонной аппроксимации Самарского и центральных разностей – для дискретизации конвективных и диффузионных слагаемых в имеющихся дифференциальных уравнениях в частных производных.

**Результаты.** Численное моделирование представленной задачи проводилось на равномерной сетке при изменении определяющих параметров – числа Рэлея ( $10^4 \leq Ra \leq 10^6$ ) и соотношения объема

локального источника тепловыделения к объему рассматриваемой полости. Были подробно проанализированы результаты, описывающие особенности эволюции тепловых факелов и  $u$ -компоненты векторного потенциала.

На рисунке 2 представлены поля температур и вертикальной компоненты скорости для различных размеров трапециевидного источника. Видно, что размеры нагревателя оказывают существенное влияние на характер теплового режима и гидродинамики внутри области.

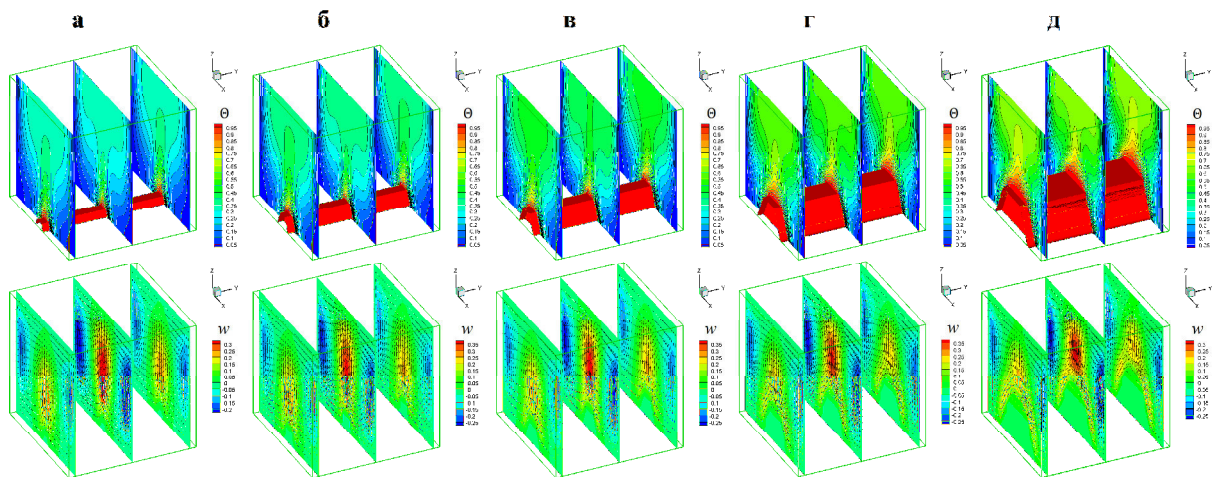


Рис. 2. Трехмерные распределения изолиний температуры (сверху) и  $w$ -компоненты скорости (снизу) для следующих соотношений объемов источника и области  $v/V$ : а – 0.01, б – 0.02, в – 0.034, г – 0.076, д – 0.135 при  $Ra=10^5$

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки России (проект № 13.9724.2017/БЧ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jaluria Y. Design and Optimization of Thermal Systems. – New York: McGraw-Hill, 1998. – 626 p.
2. Шермет М.А. Сопряженные задачи естественной конвекции. Замкнутые области с локальными источниками тепловыделения. – Берлин: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 176 с.
3. Гибанов Н.С. Шермет 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.
4. Мартюшев С.Г., Шермет М.А. Численный анализ конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутой воздушной полости с локальным источником энергии // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6, № 3. – С. 383–396.
5. Шермет М.А. Математическое моделирование нестационарной сопряженной термогравитационной конвекции в замкнутом наклонном цилиндре // Механика жидкости и газа. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, №4, с. 1272-1274
6. Полежаев В.И. и др. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса. М.: Наука, 1987. – 271 с.