

УДК 536.2

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ТЕПЛООБМЕНА  
В ЗАМКНУТОМ КУБЕ**С.Х.К. Лэ

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [lexuanhoangkhoa@gmail.com](mailto:lexuanhoangkhoa@gmail.com)**ANALYSIS OF FINS STRUCTURE EFFECT ON HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A CUBE**X.H.K. Le

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

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [lexuanhoangkhoa@gmail.com](mailto:lexuanhoangkhoa@gmail.com)

**Abstract.** *The objective of this research is to study the effect of solid fins on heat transfer enhancement in a cubical cavity. The number of solid fins varies from 1 to 3 and their lengths vary from  $0,1L$  to  $0,5L$ . A wide range of Rayleigh number and solid fins material has been investigated ( $10^3 < Ra < 10^6$ , copper, aluminum and steel fins). The left vertical side where the fins are located is uniformly heated while the opposite side is kept at lower temperature. Other sides are considered to be insulated. Governing equations are solved using finite difference method. It is shown that having solid fins attached to the heated vertical side of the cubical cavity can lead to the heat transfer enhancement compared with a cubical enclosure without any fins and thus solid fins have a positive effect on heat transfer enhancement within the differentially-heated cubical cavity.*

**Введение.** Развитие электроники и электронных систем приводит к росту интенсивности тепловыделения. Одним из самых простых и популярных в реализации методов интенсификации теплоотвода от тепловыделяющих элементов является введение развитой поверхности теплообмена, представляющей собой, например, реберную структуру. Ребра могут иметь различную форму (треугольник [1], трапеция [2], прямоугольник [3] и т.д), а также могут быть твердым [4, 5] или пористыми [6]. Многие опубликованные работы посвящены исследованию влияния реберной структуры в двумерной постановке. В данном исследовании изучается влияние твердых ребер на интенсификацию теплообмена внутри замкнутого куба.

**Физико-математическая постановка задачи.** Область решения представляет собой кубическую полость размера  $L$  с твердыми непроницаемыми стенками. Две противоположные вертикальные грани имеют постоянные температуры  $T_h$  (при  $y = 0$ ) и  $T_c$  (при  $y = L$ ), причем  $T_h > T_c$ . Другие грани являются теплоизолированными. Сила тяжести направлена вертикально вниз. На нагретой стенке устанавливаются одинаковые, равномерно расположенные твердые ребра с длиной  $l$ , которая варьируется в диапазоне от  $0,1L$  до  $0,5L$ . Ширина ребер зафиксированы и совпадают с размером стороны кубической полости, а толщина ребер равна  $h = 0,1L$ .

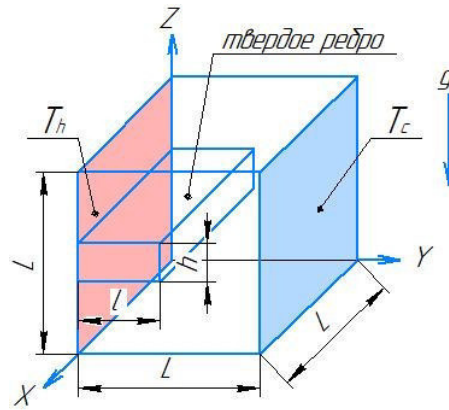


Рис.1. Область решения задачи

Дифференциальные уравнения, описывающие процесс нестационарного конвективного теплопереноса в приближении Буссинеска в безразмерных преобразованных переменных «скорость–вектор завихренности», имеют следующий вид:

– внутри воздушной полости:

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + v \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + w \frac{\partial \omega_x}{\partial z} - \omega_x \frac{\partial u}{\partial x} - \omega_y \frac{\partial u}{\partial y} - \omega_z \frac{\partial u}{\partial z} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \left( \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega_y}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega_y}{\partial x} + v \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + w \frac{\partial \omega_y}{\partial z} - \omega_x \frac{\partial v}{\partial x} - \omega_y \frac{\partial v}{\partial y} - \omega_z \frac{\partial v}{\partial z} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \left( \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega_z}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega_z}{\partial x} + v \frac{\partial \omega_z}{\partial y} + w \frac{\partial \omega_z}{\partial z} - \omega_x \frac{\partial w}{\partial x} - \omega_y \frac{\partial w}{\partial y} - \omega_z \frac{\partial w}{\partial z} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \left( \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial \omega_y}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{\partial \omega_z}{\partial x} - \frac{\partial \omega_x}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{\partial \omega_x}{\partial y} - \frac{\partial \omega_y}{\partial x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

– внутри твердых ребер:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{a_{fin}/a_{fluid}}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

Безразмерные начальные и граничные условия для системы уравнений (1)–(8) имеют вид:

$$\tau = 0 \rightarrow u = v = w = \omega_x = \omega_y = \omega_z = 0, \theta = 0,5 \quad (9)$$

при  $\tau > 0$  имеем

$$\text{– на твердых стенках } x = \text{const}: u = v = w = 0, \omega_x = 0, \omega_y = -\frac{\partial w}{\partial x}, \omega_z = \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\text{– на твердой стенке } y = 0: u = v = w = 0, \omega_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \omega_y = 0, \omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y}, \theta = 1 \quad (11)$$

$$\text{– на твердой стенке } y = 1: u = v = w = 0, \omega_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \omega_y = 0, \omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y}, \theta = 0 \quad (12)$$

$$\text{– на твердой стенке } z = \text{const}: u = v = w = 0, \omega_x = -\frac{\partial v}{\partial z}, \omega_y = \frac{\partial u}{\partial z}, \omega_z = 0, \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

$$\text{– на поверхности твердых ребер: } u = v = w = 0, \begin{cases} \theta_{fin} = \theta_{fluid} \\ \frac{\partial \theta_{fluid}}{\partial n} = \frac{\lambda_{fin}}{\lambda_{fluid}} \frac{\partial \theta_{fin}}{\partial n} \end{cases} \quad (14)$$

Система (1)–(8) с соответствующими начальными (9) и граничными (10)–(14) условиями решалась методом конечных разностей. Разработанный алгоритм решения был протестирован на модельных задачах в сравнении с экспериментальными и численными данными других авторов.

**Результаты.** Результаты показывают, что введение твердых ребер приводит к улучшению теплообмена за счет увеличения поверхности теплообмена. Рост числа ребер оказывает немонотонное влияние на интенсивность теплообмена внутри полости. При одинаковых условиях увеличение длины одиночного ребра проявляется в повышении среднего числа Нуссельта.

**Заключение.** В ходе решения задачи было проанализировано влияние твердых ребер на интенсивность теплообмена. В результате была выявлена возможность интенсификации теплообмена внутри дифференциально-обогреваемой кубической полости путем установки твердых ребер на нагреваемой поверхности куба.

*Работа выполнена при поддержке Программы развития Томского политехнического университета (Приоритет-2030-НИП/ЭБ-002-0000-2022).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абузова Ф.Ф. Тепломассообмен. – М: УГНТУ, 2008. – 175 с.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
3. Lakhali E.K., Hasnaoui M., Bilgen E., Vasseur P. Natural convection in inclined rectangular enclosures with perfectly conducting fins attached on the heated wall. Heat Mass Transfer – 1997. – V. 32, № 5. – P. 365-373.
4. Hasnaoui M., Vasseur P., Bilgen E., Natural convection in rectangular enclosures with adiabatic fins attached on the heated wall // Heat Mass Transfer – 1992. – V. 27, № 6. – P. 357–368.
5. Ambarita H., Kishinami K., Daimaruya M., Saitoh T., Takahashi H., Suzuki J. Laminar natural convection heat transfer in an air filled square cavity with two insulated baffles attached to its horizontal walls // Thermal Science & Engineering. – 2006. – V. 14, № 3. – P. 35–46.
6. Khanafar K., AlAmiri A., Bull J. Laminar natural convection heat transfer in a differentially heated cavity with a thin porous fin attached to the hot wall // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – V. 87. – P. 59–70.