ВЛИЯНИЕ РЕБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЗАМКНУТОЙ КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ

Суан Хоанг Кхоа Лэ
Томский политехнический университет
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А0-11

Введение. Функционирование электронных систем и энергетического оборудования приводит к выделению большого количества тепла. Для обеспечения надежной и устойчивой работы отмеченных систем необходимо быстро отводить энергию от тепловыделяющих элементов. В настоящее время многие инженеры и исследователи занимаются поиском эффективных методов интенсификации теплообмена. Берглес [1, 2] выделил активные и пассивные методы интенсификации теплообмена, которые различаются наличием внешнего источника энергии, необходимого для поддержания активной системы.

Развитые поверхности теплообмена, включающие реберные структуры, относятся к группе пассивных методов улучшения теплопереноса. Они находят широкое применение в таких важных областях, как электроника, машиностроение, энергетика.

В данной работе изучается влияние реберной структуры на интенсивность теплообмена за счет естественной конвекции внутри замкнутой квадратной области.

Постановка задачи. Область решения представляет собой квадратную полость с твердыми непроницаемыми стенками размера L (рис. 1). Верхняя и нижняя стенки считаются теплоизолированными. На левой и правой вертикальных стенках поддерживаются постоянные температуры T_h и T_c ($T_h > T_c$). Сила тяжести направлена вертикально вниз. На левой стенке устанавливаются одинаковые твердые или пористые ребра, имеющие ширину h и длину l. Ребра расположены равномерно по высоте области.

Дифференциальные уравнения, описывающие процесс нестационарного конвективного теплопереноса в приближении Буссинеска в размерных переменных «скорость–давление», имеют следующий вид [3]:

– внутри воздушной полости:

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

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

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

$$(\rho c)_f\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\overline{u}\frac{\partial T}{\partial \overline{x}}+\overline{v}\frac{\partial T}{\partial \overline{y}}\right)=\lambda_f\left(\frac{\partial^2 T}{\partial \overline{x}^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial \overline{y}^2}\right) \tag{4}$$

– внутри твердых ребер:

$$(\rho c)_{fin}\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda_{fin}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial \overline{x}^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial \overline{y}^2}\right) \tag{5}$$

– внутри пористых ребер:

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial \overline{x}}+\frac{\partial \overline{v}}{\partial \overline{y}}=0 \tag{6}$$

$$\rho\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial \overline{u}}{\partial t}+\frac{\overline{u}}{\varepsilon^2}\frac{\partial \overline{u}}{\partial \overline{x}}+\frac{\overline{v}}{\varepsilon^2}\frac{\partial \overline{u}}{\partial \overline{y}}\right)=-\frac{\partial \overline{p}}{\partial \overline{x}}+\frac{\mu}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial \overline{x}^2}+\frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial \overline{y}^2}\right)-\frac{\mu}{K}\overline{u}-\frac{c_F\rho}{\varepsilon^{3/2}\sqrt{K}}\overline{u}\sqrt{\overline{u}^2+\overline{v}^2} \tag{7}$$

$$\rho\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial \overline{v}}{\partial t}+\frac{\overline{u}}{\varepsilon^2}\frac{\partial \overline{v}}{\partial \overline{x}}+\frac{\overline{v}}{\varepsilon^2}\frac{\partial \overline{v}}{\partial \overline{y}}\right)=-\frac{\partial \overline{p}}{\partial \overline{y}}+\frac{\mu}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial \overline{x}^2}+\frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial \overline{y}^2}\right)-\frac{\mu}{K}\overline{v}-\frac{c_F\rho}{\varepsilon^{3/2}\sqrt{K}}\overline{v}\sqrt{\overline{u}^2+\overline{v}^2}+ \tag{8}$$

$$+\rho g\beta\left(T-T_c\right)$$

$$(\rho c)_{pm}\frac{\partial T}{\partial t}+(\rho c)_f\left(\overline{u}\frac{\partial T}{\partial \overline{x}}+\overline{v}\frac{\partial T}{\partial \overline{y}}\right)=\lambda_{pm}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial \overline{x}^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial \overline{y}^2}\right) \tag{9}$$

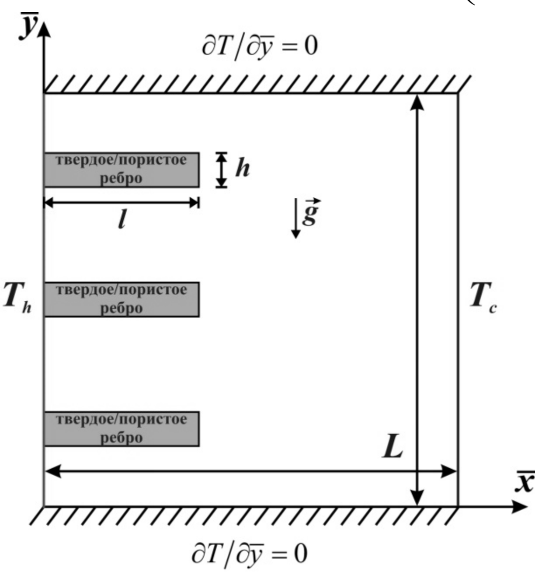

Рис. 1. Область решения задачи

С целью исключения поля давления в систему уравнений (1)–(9) вводятся преобразованные переменные – функция тока $\left(\overline{u}=\frac{\partial\psi}{\partial \overline{y}},\ \overline{v}=-\frac{\partial\psi}{\partial \overline{x}}\right)$ и завихренность скорости $\left(\overline{\omega}=\frac{\partial \overline{v}}{\partial \overline{x}}-\frac{\partial \overline{u}}{\partial \overline{y}}\right)$, а также применяются следующие безразмерные параметры:

$$x=\frac{\bar{x}}{L},\ y=\frac{\bar{y}}{L},\ \tau=t\sqrt{\frac{g\beta\left(T_h-T_c\right)}{L}},\ u=\frac{\bar{u}}{\sqrt{g\beta\left(T_h-T_c\right)L}},\ v=\frac{\bar{v}}{\sqrt{g\beta\left(T_h-T_c\right)L}},$$
$$\theta=\frac{T-T_c}{T_h-T_c},\ \psi=\frac{\bar{\psi}}{\sqrt{g\beta\left(T_h-T_c\right)L^3}},\ \omega=\bar{\omega}\sqrt{\frac{L}{g\beta\left(T_h-T_c\right)}} \qquad (10)$$

В результате определяющие уравнения принимают следующий вид:
– внутри воздушной полости

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}=-\omega \qquad (11)$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial\tau}+\frac{\partial\psi}{\partial y}\frac{\partial\omega}{\partial x}-\frac{\partial\psi}{\partial x}\frac{\partial\omega}{\partial y}=\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial\theta}{\partial x} \qquad (12)$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}+\frac{\partial\psi}{\partial y}\frac{\partial\theta}{\partial x}-\frac{\partial\psi}{\partial x}\frac{\partial\theta}{\partial y}=\frac{1}{\sqrt{Pr\cdot Ra}}\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}\right) \qquad (13)$$

– внутри твердых ребер

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{a_{fin}/a_f}{\sqrt{Pr\cdot Ra}}\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}\right) \qquad (14)$$

– внутри пористых ребер

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}=-\omega \qquad (15)$$

$$\varepsilon\frac{\partial\omega}{\partial\tau}+\frac{\partial\psi}{\partial y}\frac{\partial\omega}{\partial x}-\frac{\partial\psi}{\partial x}\frac{\partial\omega}{\partial y}=\varepsilon\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}-\frac{\varepsilon}{Da}\omega\right)-c_F\sqrt{\frac{\varepsilon}{Da}}\omega\sqrt{\left(\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\psi}{\partial y}\right)^2}+$$
$$+\frac{c_F}{\sqrt{\left(\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\psi}{\partial y}\right)^2}}\sqrt{\frac{\varepsilon}{Da}}\left\{\left(\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)^2\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\left(\frac{\partial\psi}{\partial y}\right)^2\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+2\frac{\partial\psi}{\partial x}\frac{\partial\psi}{\partial y}\frac{\partial^2\psi}{\partial x\partial y}\right\}+\varepsilon^2\frac{\partial\theta}{\partial x} \qquad (16)$$

$$\gamma\frac{\partial\theta}{\partial\tau}+u\frac{\partial\theta}{\partial x}+v\frac{\partial\theta}{\partial y}=\frac{a_{pm}/a_f}{\sqrt{Ra\,Pr}}\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}\right) \qquad (17)$$

Здесь

$$Pr=\frac{\nu}{a_f},\ Ra=\sqrt{\frac{g\beta\left(T_h-T_c\right)L^3}{\nu a_f}},\ \frac{a_{fin}}{a_f}=\frac{\lambda_{fin}}{(\rho c)_{fin}}\frac{(\rho c)_f}{\lambda_f},\ Da=\frac{K}{L^2},$$
$$c_F=\frac{1.75}{\sqrt{150}},\ \gamma=\frac{(\rho c)_{pm}}{(\rho c)_f},\ \frac{a_{pm}}{a_f}=\frac{\lambda_{pm}}{\lambda_f}.$$

Начальные и граничные условия для системы уравнений (11)–(17):

$$\tau = 0 \to \psi = \omega = 0,\ \theta = 0.5$$

$$\tau > 0 \to\ x = 0,\ 0 \le y \le 1,\ \psi = 0,\ \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0,\ \theta = 1$$

$$x = 1,\ 0 \le y \le 1,\ \psi = 0,\ \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0,\ \theta = 0$$

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

на поверхности твердых ребер: $\left|\begin{array}{l}\psi = 0,\\ \dfrac{\partial \psi}{\partial n} = 0,\end{array}\right.\ \begin{cases}\theta_s = \theta_f\\ \dfrac{\partial \theta_f}{\partial n} = \dfrac{\lambda_s}{\lambda_f}\dfrac{\partial \theta_s}{\partial n}\end{cases}$

на поверхности пористых ребер:

$$\begin{cases}\psi|_{pm} = \psi|_f\\ \left.\dfrac{\partial \psi}{\partial n}\right|_{pm} = \left.\dfrac{\partial \psi}{\partial n}\right|_f\end{cases}\quad \begin{cases}\omega|_{pm} = \omega|_f\\ \left.\dfrac{\partial \omega}{\partial n}\right|_{pm} = \left.\dfrac{\partial \omega}{\partial n}\right|_f\end{cases}\quad \begin{cases}\theta|_{pm} = \theta|_f\\ \dfrac{\lambda_{pm}}{\lambda_f}\left.\dfrac{\partial \theta}{\partial n}\right|_{pm} = \left.\dfrac{\partial \theta}{\partial n}\right|_f\end{cases}$$

Система уравнений (11)–(17) с соответствующими начальными и граничными условиями решалась методом конечных разностей [4]. В ходе решения было проанализировано влияние материала твердых и пористых ребер, количества ребер и числа Дарси на структуру течения и теплоперенос. В результате была установлена возможность интенсификации теплопереноса при использовании пористых ребер.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Bergles A.E. Handbook of Heat Transfer. – New York: McGraw-Hill, 1998. – 125 c.
2. Bergles A.E. The implications and challenges of enhanced heat transfer for the chemical process industries // Chemical Engineering Research and Design. – 2001. – N 79. – C. 437-444.
3. Asl A.K., Hossainpour S., Rashidi M.M., Sheremet M.A., Yang Z. Comprehensive investigation of solid and porous fins influence on natural convection in an inclined rectangular enclosure // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – N 133 – C. 729-744.
4. Шеремет М.А. Сопряженные задачи естественной конвекции: Замкнутые области с локальными источниками тепловыделения. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 167 c.

Научный руководитель: М.А. Шеремет, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ ТПУ.