

**СМЕШАННАЯ КОНВЕКЦИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОРИСТОЙ ПОЛОСТИ  
С ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИМ ИСТОЧНИКОМ**

С.А. Михайленко

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

Томский государственный университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

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

**MIXED CONVECTION IN A ROTATING POROUS CAVITY HAVING LOCAL HEATER**

S.A. Mihaylenko

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

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

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

**Abstract.** Numerical simulation of convective heat transfer inside a rotating porous square cavity with local heater of constant temperature has been performed. Governing equations formulated on the basis of mass, momentum and energy conservation laws written using the dimensionless stream function, vorticity and temperature have been solved by the finite difference method. The effects of Rayleigh and Taylor numbers on periodic flow and heat transfer have been studied.

**Введение.** Изучение смешанной конвекции во вращающихся системах имеет большое значение при решении различных технических задач. Например, при проектировании пассивных систем охлаждения сложных технических устройств. Целью данной работы является численный анализ режимов конвективного теплопереноса в квадратной вращающейся полости при наличии локального источника энергии и пористой вставки. Полость, изображенная на рис. 1, наполнена водой и вращается против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью  $\omega_0$ . В полости находится пористый слой высоты  $h$  и локальный источник энергии температуры  $T_h$ , расположенный на нижней стенке. Горизонтальные стенки являются адиабатическими, вертикальные поддерживаются при постоянной температуре  $T_c$ .

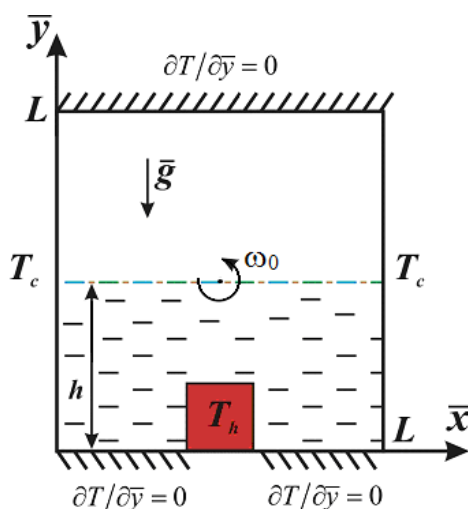


Рис. 1. Область решения задачи

**Уравнения и методы.** Уравнения, сформулированные на основе законов сохранения массы, импульса и энергии, записываются в безразмерном виде в переменных «функция тока–завихренность»:

- для чистой среды

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{1}{\sqrt{Ta}} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + \frac{Ra}{Pr \cdot Ta} \left[ \frac{\partial \theta}{\partial x} \cos(\tau) - \frac{\partial \theta}{\partial y} \sin(\tau) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{Pr \cdot \sqrt{Ta}} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

- для пористой вставки

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (4)$$

$$\varepsilon \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{Ta}} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} - \varepsilon \frac{\omega}{Da} \right) + \frac{\varepsilon^2 \cdot Ra}{Pr \cdot Ta} \left[ \frac{\partial \theta}{\partial x} \cos(\tau) - \frac{\partial \theta}{\partial y} \sin(\tau) \right] \quad (5)$$

$$\eta \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{a_{pm}/a_f}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

Здесь  $Ra$  – число Рэлея,  $Pr$  – число Прандтля,  $Ta$  – число Тейлора,  $Da$  – число Дарси,  $a_{pm}$  – коэффициент температуропроводности пористой среды,  $a_f$  – коэффициент температуропроводности жидкости,  $\varepsilon$  – пористость,  $\eta$  – относительный коэффициент объемной теплоемкости пористой среды.

Начальные и граничные условия:

- в начальный момент времени:  $\Psi(x, y, 0) = 0$ ,  $\omega(x, y, 0) = 0$ ,  $\theta(x, y, 0) = 0.5$ ;

- при  $x = 0$  и  $x = 1$ :  $\Psi = 0$ ,  $\omega = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}$ ,  $\theta = 0$ ;

- при  $y = 0$  и  $y = 1$ :  $\Psi = 0$ ,  $\omega = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2}$ ,  $\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$ ;

- на поверхности источника:  $\Psi = 0$ ,  $\omega = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial n^2}$ ,  $\theta = 1$ ;

- на границе жидкой и пористой сред  $y = \delta = h/L$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi|_{pm} = \Psi|_f \\ \frac{\partial \Psi}{\partial y}|_{pm} = \frac{\partial \Psi}{\partial y}|_f \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \omega|_{pm} = \omega|_f \\ \frac{\partial \omega}{\partial y}|_{pm} = \frac{\partial \omega}{\partial y}|_f \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \theta|_{pm} = \theta|_f \\ \lambda_{pm} \frac{\partial \theta}{\partial y}|_{pm} = \lambda_f \frac{\partial \theta}{\partial y}|_f \end{array} \right.$$

Для решения уравнений математической физики используется метод конечных разностей. Разностные уравнения Пуассона для функции тока (1), (4) решаются на основе метода последовательной верхней релаксации. Уравнения дисперсии завихренности (2), (5) и уравнения энергии (3), (6) решаются с применением локально-одномерной схемы Самарского [1, 2]. В результате был разработан

программный код, протестированный при различных сеточных параметрах. Следует отметить, что было проведено удовлетворительное сравнение с данными эксперимента [3, 4].

**Результаты и выводы.** Численные результаты получены для различных значений определяющих параметров:  $10^3 < Ta < 10^6$ ,  $10^3 < Ra < 10^6$ ,  $10^{-1} < Da < 10^{-7}$ ,  $0 < h < 1$ . Представленные результаты получены после установления периодических изменений в полости, что можно наблюдать на рис. 2: показана зависимость среднего числа Нуссельта на источнике энергии от угла поворота полости.

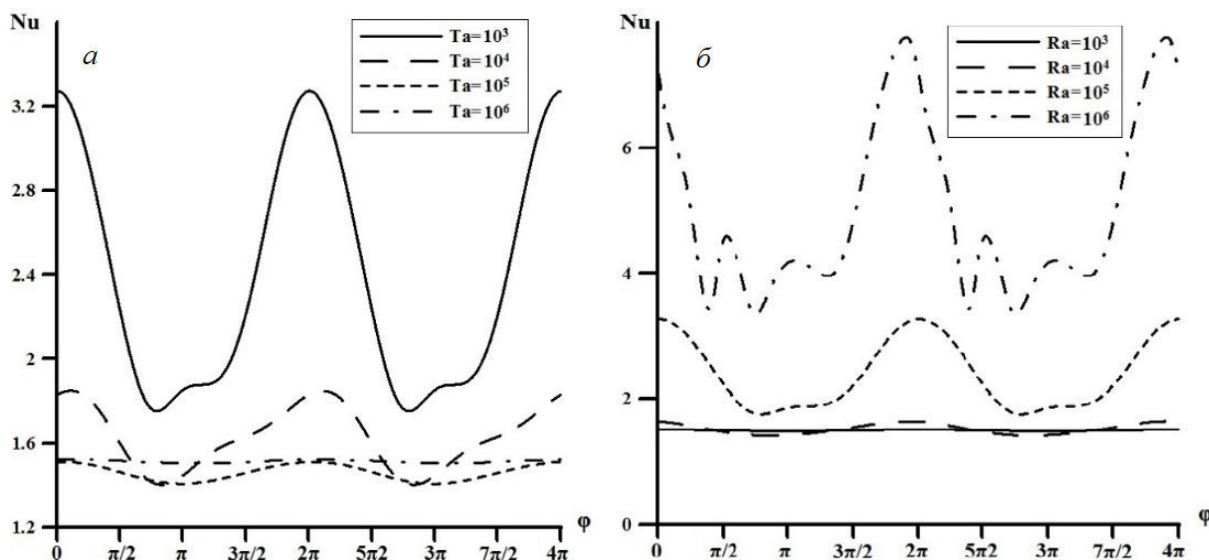


Рис. 2. Зависимость среднего числа Нуссельта при а)  $Ra=10^5$ ,  $Da=10^{-3}$ , б)  $Ta=10^3$ ,  $Da=10^{-3}$

Можно заметить, что с ростом угловой скорости вращения полости понижается интенсивность теплоотдачи с поверхности источника. При этом при высоких значениях числа Тейлора амплитуда колебаний числа Нуссельта очень мала в сравнении с небольшими скоростями вращения. Так же можно заметить, что с ростом числа Рэлея происходит увеличение теплоотдачи с поверхности источника. Так же получены распределения изолиний функции тока и температуры для различных углов поворота полости.

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 17-79-20141).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mikhailenko S.A., Sheremet M.A. Convective heat transfer combined with surface radiation in a rotating square cavity with local heater // Numerical Heat Transfer A. – 2017. – VOL. 72. – N 9. – P. 697-707.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
3. Hamady F.J., Lloyd J.R., Yang K.T., Yang H.Q. A Study of Natural Convection in a Rotating Enclosure // J. Heat Transfer. – 1994. – N 116. – P. 136-143
4. Tso C.P., Jin L.F., Tou S.K.W. Numerical Segregation of the Effects of Body Forces in a Rotating, Differentially Heated Enclosure // Numerical Heat Transfer. – 2013. – N 51. – P. 85-107.