

УДК 536.24

**О РЕЖИМАХ ЗАРЯДКИ И РАЗРЯДКИ В ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ
С ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ОТКРЫТОМ КАНАЛЕ**

М.С. Астанина

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

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: astanina.marina@bk.ru

**ABOUT CHARGING AND DISCHARGING MODES IN A THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM
WITH A POROUS MEDIUM IN A RECTANGULAR OPEN CHANNEL**

M.S. Astanina

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

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

E-mail: astanina.marina@bk.ru

Abstract. *In the study numerical simulation of mixed convection in an open rectangular channel in the presence of a porous insert has been performed. Newtonian medium with temperature-dependent viscosity has been considered as a working fluid. The charging mode implies the hot flow at the inlet to the channel, while the discharging mode implies the cold flow. The peculiarities of these modes have been shown for a wide range of governing parameters.*

Введение. Тепловые системы с неоднородными пористыми материалами имеют большое количество практических применений в области промышленности, разработке тепловых систем аккумулирования энергии и строительстве зданий. Пористые среды являются эффективным способом регулирования теплонакопления и теплоотвода в различных приложениях из-за повышения интенсивности теплообмена при взаимодействии рабочей среды с введённой пористой структурой. В этом ключе использование численных методов – наиболее доступный из методов прогнозирования работы подобных систем по сравнению с экспериментальными способами. Данные численного моделирования могут быть использованы на этапах проектирования или отладки работы различных элементов тепловых систем.

Математическая модель. Схема моделируемой задачи показана на рисунке 1. Рассматривается конвективное течение в открытом прямоугольном канале с пористым материалом. На входе в канал подаётся набегающий поток, инициирующий течение. Поведение системы рассматривается в два этапа: режим зарядки (подача горячего потока) и режим разрядки (подача холодного потока). В качестве рабочей среды рассматривается ньютоновская среда с переменной вязкостью. В качестве закона зависимости рассматривается соотношение Сазерленда [1]. Горизонтальные границы канала теплоизолированы. Для моделирования теплового взаимодействия между пористым материалом и рабочей жидкостью используется локально-равновесная тепловая модель, в рамках которой температуры двух фаз считаются одинаковыми.

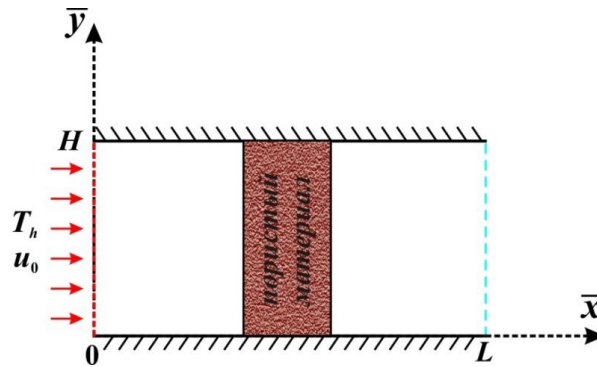


Рис. 1. Схематическая постановка задачи

Таким образом, определяющие уравнения, описывающие изучаемый процесс, можно записать следующим образом [2]:

- Для чистой среды

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 (\mu \omega)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\mu \omega)}{\partial y^2} \right) + \frac{Gr}{Re^2} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \\ + \frac{2}{Re} \left[\frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial^2 \mu}{\partial y^2} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial x \partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

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

- Для пористой среды (модель Дарси-Бринкмана-Форхгеймера)

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

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{\varepsilon}{Re} \left(\frac{\partial^2 (\mu \omega)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\mu \omega)}{\partial y^2} - \varepsilon \frac{\mu \omega}{Da} \right) + \varepsilon^2 \frac{Gr}{Re^2} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \\ + \frac{2\varepsilon}{Re} \left[\frac{\varepsilon \mu}{2Da} \frac{\partial \mu}{\partial y} - \frac{\varepsilon v}{2Da} \frac{\partial \mu}{\partial x} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial^2 \mu}{\partial y^2} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial x \partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] - \frac{\varepsilon^2 C_F}{\sqrt{Da}} \omega \sqrt{u^2 + v^2} + \\ + \frac{\varepsilon^2 C_F}{\sqrt{u^2 + v^2} \sqrt{Da}} \left(u^2 \frac{\partial u}{\partial y} + uv \frac{\partial v}{\partial y} - uv \frac{\partial u}{\partial x} - v^2 \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\eta \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\alpha_{pm}/\alpha_f}{Re \cdot Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

Безразмерные преобразованные переменные (функция тока и завихрённость) были введены следующим образом:

$$\left\{ \bar{u} = \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{y}}, \bar{v} = -\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}}; \left\{ \bar{\omega} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}}. \right. \right.$$

В определяющей системе дифференциальных уравнений (1)–(6) были использованы следующие безразмерные параметры и переменные:

$$Pr = \mu_0 / \rho \alpha, Da = K / H^2, C_F = 1.75 / \sqrt{150 \varepsilon^3}, Gr = \rho^2 g \beta \Delta T H^3 / \mu_0^2, Re = \rho H u_0 / \mu_0$$
$$x = \bar{x} / H, y = \bar{y} / H, \tau = t u_0 / H, \theta = (T - T_0) / \Delta T, \mu = \bar{\mu} / \mu_0, u = \bar{u} / u_0, v = \bar{v} / u_0, \psi = \bar{\psi} / (u_0 H), \omega = \bar{\omega} H / u_0$$

В начальный момент времени $\tau = 0$ рабочая среда была неподвижна, и все переменные считались равными нулю ($\theta = \psi = \omega = 0$). В качестве граничных условий были использованы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \tau > 0: \quad & \psi = y, \quad \omega = 0, \quad \theta = 0 \quad \text{на } x = 0 \text{ и } 0 \leq y \leq 1 \\ & \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad \text{на } x = A \text{ и } 0 \leq y \leq 1 \\ & \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad \psi = 0 \quad \text{на } y = 0 \text{ и } 0 < x < A \\ & \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad \psi = 1 \quad \text{на } y = 1 \text{ и } 0 < x < A \end{aligned} \quad (7)$$

на границе пористого материала и чистой среды:

$$\begin{cases} \psi_{pm} = \psi_f \\ \partial \psi_{pm} / \partial n = \partial \psi_f / \partial n \end{cases} \quad \begin{cases} \omega_{pm} = \omega_f \\ \partial \omega_{pm} / \partial n = \partial \omega_f / \partial n \end{cases} \quad \begin{cases} \theta_{pm} = \theta_f \\ (\lambda_{pm} / \lambda_f)(\partial \theta_{pm} / \partial n) = \partial \theta_f / \partial n \end{cases}$$

Записанные дифференциальные уравнения с использованием переменных «функция тока – завихренность – температура» с соответствующими начальными и граничными соотношениями решались методом конечных разностей на структурированной равномерной расчётной сетке. Для реализации решения был создан программный код на языке программирования C++ с возможностью визуализации результатов. Разработанная методика решения задач конвективного теплообмена была тщательно верифицирована на нескольких модельных течениях.

Результаты и заключение. Проведено численное моделирование смешанной конвекции в прямоугольном канале с пористым материалом. В первую очередь анализ полученных результатов проводился с точки зрения оценки эффективности работы системы как теплоаккумулирующего элемента. В качестве получаемых характеристик рассматривались поля температуры и изолинии функции тока, распределения средней температуры пористой вставки, а также коэффициент эффективности разрядки. Полученные в итоге данные отражают возможность регулирования свойств аккумуляции тепловой энергии за счёт варьирования определяющих параметров: числа Рейнольдса и Грасгофа, а также свойства пористого материала (пористость, число Дарси). Представленные теоретические результаты могут быть использованы при проектировании и сервисном обслуживании теплоаккумулирующих систем в строительстве, а также в микроэлектронике.

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского научного фонда (22-79-10341).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Armengol J.M., Bannwart F.C., Xamán J., Santos R.G. Effects of variable air properties on transient natural convection for large temperature differences // International Journal of Thermal Sciences. – 2017. – Vol. 120. – P. 63-79.
2. Астанина М.С., Шеремет М.А. Моделирование смешанной конвекции жидкости с переменной вязкостью в частично пористом горизонтальном канале с источником тепловыделения // Компьютерные исследования и моделирование. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 95-107.