ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ ЗА СЧЁТ ВВЕДЕНИЯ ПОРИСТОЙ ВСТАВКИ ПО ПЕРИМЕТРУ ИСТОЧНИКА

М.С. Астанина
Научный руководитель: д.ф.-м.н., доцент М.А. Шеремет
Томский государственный университет
astanina.marina@bk.ru

Введение

Современный уровень развития промышленности и приборостроения ставит новые задачи в области разработки систем охлаждения источников энергии. Исследования в этом направлении позволяют предсказывать работу электронных устройств с источниками энергии и увеличивать их срок службы. Особый практический интерес имеют задачи с переменными теплофизическими свойствами рабочей среды [1].

Постановка задачи

В представленной работе исследуется процесс охлаждения теплопроводного тепловыделяющего источника энергии в замкнутой частично пористой полости (рис. 1).

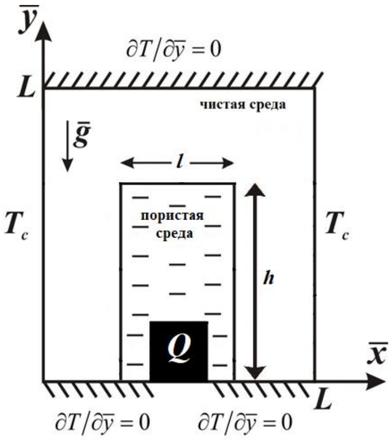

Рис 1. Область решения задачи

Рассматривается случай квадратной области $(L = H)$. Горизонтальные стенки полости теплоизолированы, вертикальные границы поддерживаются при постоянной температуре охлаждения. В качестве рабочей жидкости рассматривается ньютоновская несжимаемая теплопроводная жидкость (по характеристикам − вода). Считается, что рабочая среда удовлетворяет приближению Буссинеска, а её вязкость зависит от температуры по экспоненциальному закону: $\mu = \mu_0 \exp\left(-C\frac{T-T_0}{\Delta T}\right)$.

Сила тяжести направлена вертикально вниз по оси *y*. Режим течения и теплопереноса в полости является ламинарным. Тепловыделяющий элемент располагается на нижней стенке; около него находится пористая вставка высоты *h* и длины *l*. Пористый слой изотропен и проницаем для воды. При этом температура жидкости и твердого скелета считаются равными и моделирование ведется в рамках тепловой равновесной модели.

Математическая модель

Теплоперенос в полости за счёт естественной конвекции описывается системами дифференциальных уравнений в безразмерных преобразованных переменных «функция тока – завихренность – температура», составленными отдельно для чистой среды, твердого скелета и источника энергии:

- для чистой среды

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}=-\omega$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial\tau}+u\frac{\partial\omega}{\partial x}+v\frac{\partial\omega}{\partial y}=\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\left(\frac{\partial^2(\mu\omega)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2(\mu\omega)}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial\theta}{\partial x}+2\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\left[\frac{\partial^2\mu}{\partial x^2}\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{\partial^2\mu}{\partial y^2}\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial^2\mu}{\partial x\partial y}\left(\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{\partial u}{\partial x}\right)\right]$$

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

- для пористой среды [2]

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}=-\omega$$

$$\varepsilon\frac{\partial\omega}{\partial\tau}+u\frac{\partial\omega}{\partial x}+v\frac{\partial\omega}{\partial y}=$$
$$=\varepsilon\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\left(\frac{\partial^2(\mu\omega)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2(\mu\omega)}{\partial y^2}-\varepsilon\frac{\mu\omega}{Da}\right)+\varepsilon^2\frac{\partial\theta}{\partial x}+$$
$$+2\varepsilon\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\left[\begin{array}{l}\dfrac{\varepsilon u}{2Da}\dfrac{\partial\mu}{\partial y}-\dfrac{\varepsilon v}{2Da}\dfrac{\partial\mu}{\partial x}+\dfrac{\partial^2\mu}{\partial x^2}\dfrac{\partial u}{\partial y}-\\ -\dfrac{\partial^2\mu}{\partial y^2}\dfrac{\partial v}{\partial x}+\dfrac{\partial^2\mu}{\partial x\partial y}\left(\dfrac{\partial v}{\partial y}-\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)\end{array}\right]$$

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

- для источника энергии

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{\alpha_{hs}/\alpha_f}{\sqrt{Ra\cdot Pr}}\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}+Os\right)$$

Здесь x, y – безразмерные декартовы координаты; u, v – безразмерные составляющие скорости в проекции на оси; θ – безразмерная температура; ψ – безразмерная функция тока; ω – безразмерная завихрённости скорости, $Pr = \frac{\mu_0}{\rho a}$ – число Прандтля, $Da = \frac{K}{L^2}$ – число Дарси, $Ra = \frac{\rho g \beta \Delta T L^3}{\alpha \mu_0}$ – число Рэлея, $Os = \frac{QL^2}{\lambda_{hs} \Delta T}$ – число Остроградского, $\mu = \exp(-C\theta)$ – безразмерная вязкость.

Граничные условия для рассматриваемой системы уравнений запишем в безразмерном виде:

$\tau = 0$:

$$\psi = \omega = \theta = 0 \quad \text{на } 0 \le x \le 1 \text{ и } 0 \le y \le 1$$

$\tau > 0$:

$$\psi = 0,\ \omega = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2},\ \theta = 0 \quad \text{на } x = 0 \text{ и } 0 \le y \le 1$$

$$\psi = 0,\ \omega = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2},\ \theta = 0 \quad \text{на } x = 1 \text{ и } 0 \le y \le 1$$

$$\psi = 0,\ \omega = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2},\ \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad \text{на } y = 0,\ 1 \text{ и } 0 < x < 1$$

на источнике энергии :

$$\psi = 0,\ \omega = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial n^2},\ \begin{cases} \theta_{hs} = \theta_{pm} \\ \frac{\lambda_{hs}}{\lambda_{pm}} \frac{\partial \theta_{hs}}{\partial n} = \frac{\partial \theta_{pm}}{\partial n} \end{cases}$$

на горизонтальной границе раздела сред :

$$\begin{cases} \psi_{pm} = \psi_f \\ \frac{\partial \psi_{pm}}{\partial y} = \frac{\partial \psi_f}{\partial y} \end{cases} \quad \begin{cases} \omega_{pm} = \omega_f \\ \frac{\partial \omega_{pm}}{\partial y} = \frac{\partial \omega_f}{\partial y} \end{cases} \quad \begin{cases} \theta_{pm} = \theta_f \\ \frac{\lambda_{pm}}{\lambda_f} \frac{\partial \theta_{pm}}{\partial y} = \frac{\partial \theta_f}{\partial y} \end{cases}$$

на вертикальной границе раздела сред :

$$\begin{cases} \psi_{pm} = \psi_f \\ \frac{\partial \psi_{pm}}{\partial x} = \frac{\partial \psi_f}{\partial x} \end{cases} \quad \begin{cases} \omega_{pm} = \omega_f \\ \frac{\partial \omega_{pm}}{\partial x} = \frac{\partial \omega_f}{\partial x} \end{cases} \quad \begin{cases} \theta_{pm} = \theta_f \\ \frac{\lambda_{pm}}{\lambda_f} \frac{\partial \theta_{pm}}{\partial x} = \frac{\partial \theta_f}{\partial x} \end{cases}$$

Полученные уравнения с соответствующими начальными и граничными условиями решались методом конечных разностей на равномерной сетке. Для численного решения уравнений параболического типа использовалась локально-одномерная схема Самарского, позволяющая плоскую задачу свести к системе одномерных задач [3]. Дискретизация уравнения Пуассона проводилась на основе формул симметричной аппроксимации вторых производных. Далее полученное разностное уравнение разрешалось методом последовательной верхней релаксации. Численный метод был опробован ранее на ряде модельных задач и подтвердил работоспособность.

Результаты

Исследование было произведено для большого диапазона изменения определяющих параметров. При рассмотрении задачи пассивного охлаждения источника в данной постановке наибольшее влияние на теплоперенос имеет число Остроградского, параметр изменения вязкости *C*, размеры и пористость твёрдого скелета. Описание результатов производилось по распределениям изолиний функции тока и температуры в полости, а также по среднему числу Нуссельта и средней температуре в источнике. Результаты показали, что варьирование теплофизических свойств рабочей жидкости и изменение пористости и размеров пористой вставки позволяет интенсифицировать теплоперенос в полости и улучшить теплоотвод от источника.

Заключение

В работе было проведено численное моделирование системы пассивного охлаждения тепловыделяющего источника при наличии пористой вставки и жидкости с переменной вязкостью. Теплоперенос в данном случае происходит за счёт естественной конвекции. Исходя из полученных результатов можно отметить, что пористая вставка и использование рабочих жидкостей с различными свойствами являются хорошими инструментами для улучшения характеристик системы охлаждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для молодых российских ученых (грант МД-2819.2017.8).

Список использованных источников

1. Alim, M.A., Alam, S., Miraj, M. Effects of volumetric heat source and temperature dependent viscosity on natural convection flow along a wavy surface. – Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 90. – P. 383–388.
2. Sheremet, M.A., Trifonova, T.A. Unsteady conjugate natural convection in a vertical cylinder containing a horizontal porous layer: Darcy model and Brinkman-extended Darcy model. – Transport in Porous Media. – 2014. – Vol. 101. – P. 437–463.
3. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.