

УДК 536.24

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ
НАНОЖИДКОСТИ В ПОЛОСТИ С ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ**Е.В. Шулепова

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. М.А. Шеремет
 Национальный исследовательский Томский государственный университет,
 Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050
 E-mail: elena.vasilevna.1996@mail.ru

**MATHEMATICAL SIMULATION OF NATURAL CONVECTION OF NANOFLUID
IN A CAVITY WITH A HEAT-GENERATING ELEMENT**E.V. Shulepova

Scientific Supervisor: Prof., Dr. M.A. Sheremet
 Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050
 E-mail: elena.vasilevna.1996@mail.ru

Abstract. This work deals with numerical simulation of natural convective heat transfer of nanofluid in a square cavity with a local heater of constant heat generation flux. Analysis has been performed using 2D unsteady Oberbeck-Boussinesq equations for nanofluid and heat conduction equation for the heat-generating element. The finite difference method of the second order of accuracy has been used for numerical simulation. Effects of the heat generation strength and nanoparticles volume fraction on nanofluid flow and heat transfer have been studied.

Введение. Передача тепла за счет естественной конвекции в замкнутых областях изучается многими исследовательскими группами во всем мире, особенно применительно к задачам интенсификации транспортных процессов в машиностроении, микроэлектронике и энергетике [1-3]. В последнее время с целью интенсификации теплообмена в качестве рабочей среды используют наножидкости [4, 5].

Целью исследования является численный анализ естественной конвекции наножидкости в квадратной полости с тепловыделяющим элементом. Рассматривается возможность охлаждения внутреннего тепловыделяющего элемента за счет использования наножидкости (рисунок 1).

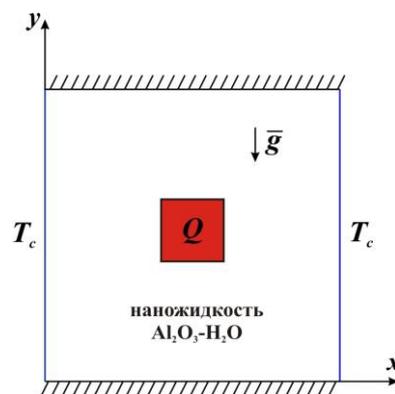


Рис. 1. Область решения задачи

Предполагается, что наножидкость является вязкой несжимаемой теплопроводной средой. Горизонтальные стенки полости считаются адиабатическими, а вертикальные – изотермическими с температурой T_c . Считается, что наножидкость состоит из наночастиц оксида алюминия [6], а в качестве базовой жидкости используется вода.

Описание математической модели. Математическое описание данной задачи проводится на основе однофазного приближения для наножидкости с экспериментальными соотношениями для эффективной теплопроводности и динамической вязкости. Определяющие уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho\beta)_{nf} g (T - T_c) \quad (3)$$

$$(\rho c)_{nf} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Уравнение теплопроводности внутри тепловыделяющего элемента имеет следующий вид

$$(\rho c)_{hs} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{hs} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q \quad (5)$$

Здесь x, y – координаты декартовой системы координат, t – время, ρ_{nf} – плотность наножидкости, ρ_{hs} – плотность материала источника энергии, c_{hs} – теплоемкость материала источника энергии, μ_{nf} – динамическая вязкость наножидкости, β_{nf} – термический коэффициент объемного расширения наножидкости, λ_{nf} – теплопроводность наножидкости, λ_{hs} – теплопроводность материала источника энергии.

Начальные и граничные условия для сформулированной системы дифференциальных уравнений (1)–(5) выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \tau = 0: \quad & u = v = 0, \quad T = T_c; \\ \tau > 0: \quad & u = v = 0, \quad T = T_c \quad \text{на вертикальных стенках;} \\ & u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{на горизонтальных стенках;} \\ & u = v = 0, \quad \begin{cases} T_{nf} = T_{hs} \\ -\lambda_{nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial \bar{n}} = -\lambda_{hs} \frac{\partial T_{hs}}{\partial \bar{n}} \end{cases} \quad \text{на границах внутреннего источника энергии} \end{aligned} \quad (6)$$

Сформулированная краевая задача (1)–(6) была решена в преобразованных переменных «функция тока – завихренность» методом конечных разностей. Численные исследования проведены в широком диапазоне изменения определяющих параметров, характеризующих свободно-конвективный теплообмен наножидкости внутри замкнутой полости: число Рэлея ($Ra = 10^4$ – 10^6), объемная доля наночастиц ($\phi = 0$ –4%).

Результаты и заключение. В результате работы была создана вычислительная модель и численный алгоритм для исследования естественной конвекции наножидкости в квадратной полости с

тепловыделяющим элементом. Разработан программный код для проведения вычислительных экспериментов. В результате моделирования получены распределения изолиний функции тока и температуры, а также интегральных параметров.

Работа выполнена при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karlapalem V., Dash S.K. On the enhancement of natural convection heat transfer with multi-branching fins // International Journal of Thermal Sciences. – 2023. – Vol. 183. – P. 107868.
2. Husain S., Khan S.A. A review on heat transfer enhancement techniques during natural convection in vertical annular geometry // Cleaner Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 5. – P. 100333.
3. Huang C.-H., Chen W.-Y. A natural convection horizontal straight-fin heat sink design problem to enhance heat dissipation performance // International Journal of Thermal Sciences. – 2022. – Vol. 176. – P. 107540.
4. Gurdal M., Arslan K., Gedik E., Minea A.A. Effects of using nanofluid, applying a magnetic field, and placing turbulators in channels on the convective heat transfer: A comprehensive review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 162. – P. 112453.
5. Esfe M.H., Bahiraei M., Hajbarati H., Valadkhani M. A comprehensive review on convective heat transfer of nanofluids in porous media: Energy-related and thermohydraulic characteristics // Applied Thermal Engineering. – 2020. – Vol. 178. – P. 115487.
6. Ho C.J., Liu W.K., Chang Y.S., Lin C.C. Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study // International Journal of Thermal Sciences. – 2010. – Vol. 49. – P. 1345–1353.