

УДК 532.5; 536.24
PACS 47.27.Te

Ориентационные эффекты конвекции в полости между частично нагретыми цилиндрами различной формы

М. М. Гончаров, А. А. Оглезнев, А. Н. Кондрашов

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15
email: 123goncharov@mail.ru

В статье описаны результаты численного моделирования стационарного конвективного течения несжимаемой жидкости в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами. Внутренний, имеющий треугольное сечение, нагревается частично. Внешний, имеющий круглое сечение, поддерживается при постоянной температуре. Показано, что при повороте нагревателя ось конвективного факела наклоняется. Это влияет на структуру течения и интенсивность теплообмена. Наибольший интегральный тепловой поток наблюдается, когда нагреватель находится сбоку, а наименьший – снизу. Аппроксимацией результатов получена зависимость числа Нуссельта от числа Рэлея и угла поворота.

Ключевые слова: естественная конвекция; частичный нагрев; коаксиальные цилиндры; стационарное течение

Поступила в редакцию 12.04.2019; принята к опубликованию 27.05.2019

Oriental effects of convection in the cavity between partially heated cylinders of various shapes

M. M. Goncharov, A. A. Ogleznev, A. N. Kondrashov

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm
email: 123goncharov@mail.ru

This paper reports the results of numerical simulation of a steady-state convective flow of incompressible fluid in the gap between two coaxial cylinders. We assume that only one side of the inner triangular cylinder is heated, and the external circular cylinder is kept at constant temperature. It has been established that the rotation of the heater through a certain angle causes the convective plume axis to deviate. This strongly affects the flow pattern and the related heat transfer process. The maximum integral heat flux is observed when the heater is in its side position, and the minimum heat flux is observed when the heater is in the bottom position. Approximating the results, we obtain the dependence of the Nusselt number on the Rayleigh parameter and the rotation angle.

Keywords: natural convection; partial heating; coaxial cylinders; steady flow

Received 12.04.2019; accepted 27.05.2019

doi: 10.17072/1994-3598-2019-2-16-23

1. Введение

Теплоперенос между поверхностями изотермических соосных цилиндров изучается с 30-х гг. двадцатого века в связи с необходимостью отвода тепла в системах теплоснабжения. По результатам экспериментальных и теоретических работ было установлено, что на интенсивность теплообмена и структуру связанного с ним конвективного течения влияют аспектное соотношение и величина градиента температуры [1]. В случае повреждения трубы ее поверхность прогревается неравномерно. Возникает область локального прогрева.

Интерес к проблеме локализованного теплового деления усиливается одновременно с развитием полупроводниковой технологии [2]. Исследования показали, что способ размещения компактных источников тепла в замкнутых полостях влияет на структуру и интенсивность конвективного течения [3–6]. Это сказывается на характеристиках систем охлаждения [7].

Расположение электронных компонентов в корпусе может приводить к различным условиям нагрева. Чтобы описать вызванные ими особенности теплообмена, рассматриваются системы с различной геометрией рабочей полости и нагревателя [8, 9]. В работах [10] и [11] исследуется конвекция в полости, заключенной между цилиндрами, имеющими в сечении четырехугольник и окружность. В работах [12–16] рассматривается треугольник и окружность. В похожей системе инженерами корпорации *Apple Inc.* был рассчитан теплообмен для оптимального функционирования профессиональной рабочей станции *Mac Pro 2018*. Она представляет собой круглую полость, внутри которой находится треугольный цилиндр из плат с электрическими компонентами [17].

В подобных системах отсутствие осевой симметрии приводит к зависимости характеристик течения от направления вектора \mathbf{g} . В работе [18] рассматривалась эффективность теплообмена в зависимости от наклона равномерно нагретого внутреннего квадратного нагревателя. Но информации о теплообмене в подобных системах с частичным прогревом внутреннего цилиндра мало. В связи с этим возникает вопрос о влиянии ориентации неоднородно нагретого треугольного цилиндра относительно действия силы тяжести на теплообмен в аксиальном зазоре.

В текущей статье описаны результаты численного моделирования конвективного теплообмена в зазоре между двумя горизонтальными коаксиальными цилиндрами треугольного и круглого сечения. Зазор между цилиндрами заполнен вязкой несжимаемой жидкостью с постоянными теплофизическими свойствами. Третий внутренний треугольного цилиндра поддерживалась при постоянной температуре. Она выполняла роль нагревателя. Оставшаяся поверхность треугольника

теплоизолирована. На поверхности внешнего круглого цилиндра задавалась постоянная температура, меньшая, чем температура нагревателя. В ходе выполнения численных экспериментов изменялись направления действия гравитационного поля и интенсивность нагрева.

Расчет проводился в *Comsol Multiphysics 5.4* методом конечных элементов в двумерной постановке. Проведена валидация модели на известных результатах. Получены распределения температуры и скорости в зазоре. Показано, что ориентация нагреваемой области оказывает существенное влияние на структуру конвективного течения и связанные с ним тепловые процессы. В заключении приводится эмпирическая зависимость числа Нуссельта от величины числа Рэлея и направления вектора ускорения свободного падения.

2. Постановка задачи

В работе численно исследуются процессы теплопередачи и структура конвективного течения, возникающие в результате действия силы тяжести на неравномерно нагретую вязкую жидкость, заполняющую пространство между поверхностями двух коаксиальных цилиндров. Внутренний цилиндр треугольного сечения вписан в окружность радиусом R_i . Нагревается только одна сторона треугольника. Она играет роль нагревателя. Внешний цилиндр имеет круглое сечение радиусом R_o , остается при постоянной температуре и служит холодильником. Длина полости многократно превосходит диаметр внешнего цилиндра. Поэтому задача решается в двумерной постановке. Характеристики потока разрешаются в плоскости поперечного сечения, перпендикулярной осям цилиндров.

Геометрия задачи показана на рис. 1.

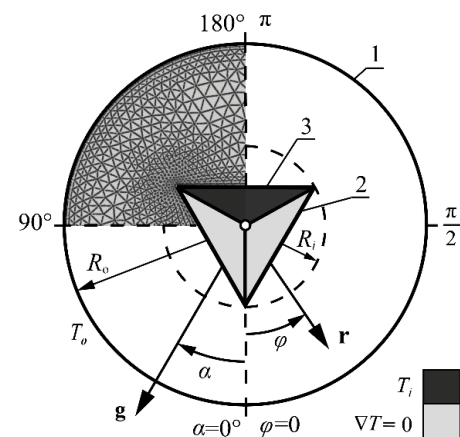


Рис. 1. Схема исследуемой полости с выбранной системой координат и фрагмент расчетной сетки

Используется полярная система координат, в которой радиус-вектор обозначается \mathbf{r} , а азимутальный угол — φ . Начало системы координат

устанавливается на оси цилиндров. Азимутальный угол отсчитывается от вертикали и увеличивается в направлении против хода часовой стрелки. Так, на рис. 1 при $\varphi = 0^\circ$ радиус вектор \mathbf{r} будет направлен вниз.

Исследуемая жидкость находится в поле силы тяжести. Вектор ускорения свободного падения \mathbf{g} ортогонален оси цилиндров. В задаче рассматривается влияние ориентации нагревателя на процессы тепломассопереноса. Поэтому направление действия вектора \mathbf{g} задается углом наклона α относительно $\varphi = 0^\circ$. Угол α равносителен повороту нагревателя против часовой стрелки при фиксированном направлении вектора \mathbf{g} . Для удобства восприятия будем вращать не вектор ускорения свободного падения, а саму полярную систему координат. Тогда углу $\alpha = 0^\circ$ будет соответствовать положение нагреваемой области сверху, углу $\alpha = 90^\circ$ – с левого бока, а угол $\alpha = 180^\circ$ будет эквивалентен нагреву снизу.

Скорости исследуемого течения по порядку величины составляют 10^{-3} м/с. Поток остается ламинарным, и вязкая диссипация энергии не учитывается. Для описания установившегося течения используется система уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска:

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho_0} + \nu \Delta \mathbf{u} + \frac{\rho(T)}{\rho_0} \mathbf{g}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (2)$$

Теплообмен в системе описывается стационарным уравнением конвективного переноса:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T - \lambda \Delta T = 0. \quad (3)$$

В уравнениях используются следующие обозначения: \mathbf{u} – скорость движения жидкости, \mathbf{g} – вектор ускорения свободного падения, p , T – давление и температура жидкости, ρ_0 – плотность при температуре T_0 , ν – кинематическая вязкость, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении и λ – теплопроводность. Параметры среды, кроме плотности, считаются постоянными и не изменяются с температурой. Для плотности применяется линейная аппроксимация:

$$\rho(T) = \rho_0(1 - \beta(T - T_0)), \quad (4)$$

где β – коэффициент теплового расширения жидкости. Числовые значения параметров приведены в табл. 1.

Свойства жидкости определяются числом Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu \rho C_p}{\lambda}. \quad (5)$$

Конвективное течение организуется неравномерным подогревом твердых границ. Для этого одна треть внутреннего цилиндра нагревается.

Оставшаяся часть его поверхности теплоизолирована. На поверхности внешнего цилиндра задается постоянная температура, меньшая температуры нагревателя.

Таблица 1. Параметры моделируемой жидкости

Плотность	ρ_0 , кг/м ³	998.8
Коэффициент теплового расширения	β , 1/К	$1.8 \cdot 10^{-4}$
Удельная теплоемкость	C_p , кДж/(кг·К)	4.18
Коэффициент теплопроводности	λ , Вт/(м·К)	0.599
Кинематическая вязкость	ν , м ² /с	$1.01 \cdot 10^{-6}$
Число Прандтля	Pr	7.02

Система управляющих уравнений дополняется граничными условиями для скорости и температуры. Границы 1 и 3 на рис. 1 имеют постоянную температуру T_o и T_i соответственно:

$$T|_1 = T_o, \quad (6)$$

$$T|_3 = T_i. \quad (7)$$

На границе 2 задается адиабатическое условие:

$$\nabla T|_2 = 0, \quad (8)$$

на твердых границах задается условие прилипания:

$$u|_1 = u|_{2,3} = 0. \quad (9)$$

Безразмерным параметром, характеризующим интенсивность нагрева, выступает число Рэлея Ra :

$$Ra = g \beta \frac{T_i - T_o}{Pr} \left(\frac{\rho C_p}{\lambda} \right)^2 (R_0 - R_i)^3, \quad (10)$$

где за характерный размер принимается величина наименьшего расстояния между цилиндрами $R_0 - R_i$. Она может быть задана аспектным соотношением $A = R_0 / R_i$ [12–16].

Безразмерная интегральная характеристика теплового потока через горячую поверхность внутреннего цилиндра (обозначена 3 на рис. 1) определяется глобальным числом Нуссельта Nu :

$$Nu = \frac{\int_3 q_c dl}{\int_3 q_h dl}. \quad (11)$$

В (11) приняты следующие обозначения: q_c – плотность теплового потока через нагретую границу внутреннего цилиндра при конвекции, а q_h – в теплопроводном случае. Значения величин q_c и q_h определяются непосредственно в ходе численного решения уравнений (1)–(3).

3. Метод решения

Численное решение системы уравнений тепловой конвекции 1, 2 и 3 в узлах нерегулярной сетки выполнено в пакете *Comsol Multiphysics* 5.4 методом конечных элементов. Вблизи твердых стенок для лучшего разрешения градиентов увеличивалась плотность расчетных узлов (рис. 1).

Задача решалась в стационарной постановке. Использовался сопряженный нелинейный решатель, использующий метод Ньютона–Рафсона (*Fully coupled nonlinear solver with a constant Newton-Raphson method*). Заданное число Рэлея достигалось за счет наращивания нелинейности путем постепенного увеличения температуры нагревателя. Каждое предыдущее решение использовалось в качестве начальной догадки для следующего.

Сходимость подтверждалась анализом поведения среднего значения удельной кинетической энергии $\bar{\varepsilon} = \overline{\rho u^2} / 2$ и глобального числа Нуссельта Nu при увеличении количества расчетных узлов N . Результаты параметрического исследования плотности сетки показаны на рис. 2.

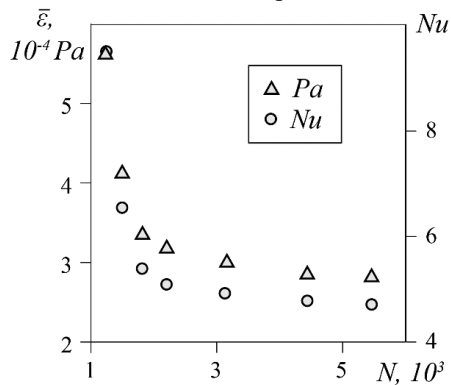


Рис. 2. Результаты параметрического исследования плотности сетки. По вертикальным осям отложены средняя кинетическая энергия $\bar{\varepsilon}$ и безразмерная величина теплового потока через нагретую границу Nu . По горизонтальной оси отложено количество расчетных узлов N

В ходе параметрического исследования моделировалось течение жидкости с постоянными свойствами из табл. 1. Радиус внутреннего цилиндра – $R_i = 5$ мм. Аспектное соотношение – $A = 5$. Угол наклона нагревателя – $\alpha = 0^\circ$. Температура внешнего цилиндра – $T_o = 300$ К. Число Рэлея для заданных параметров – $Ra = 5.9 \cdot 10^5$, что эквивалентно температуре нагревателя $T_i = 306$ К.

Результаты показывают монотонное спадание $\bar{\varepsilon}$ и Nu до некоторых асимптотических значений при увеличении N . На этом основании была выбрана подходящая расчетная сетка. Последующие результаты представлены для $N \approx 5 \cdot 10^3$ узлов. Дальнейшее сгущение сетки не оказывает существенного влияния на интегральные характеристики течения.

4. Валидация

С целью валидации численной модели решена задача о теплообмене между двумя коаксиальными цилиндрами круглого сечения. Оба цилиндра поддерживались при постоянной температуре, внутренний – горячее внешнего. Проведено сравнение рассчитанных локальных значений числа Нуссельта Nu_L с известными из работы [19].

В этой работе локальное число Нуссельта Nu_L характеризует интенсивность потока в точке на поверхности нагревателя:

$$Nu_L = \frac{q_c}{q_h} \quad (12)$$

Для заданных значений чисел Прандтля $Pr = 7.02$ и Рэлея $Ra = 1.0 \cdot 10^2$ распределение Nu_L вдоль поверхности нагретого цилиндра при различном аспектном соотношении описывается кривыми, приведенными на рис. 3.

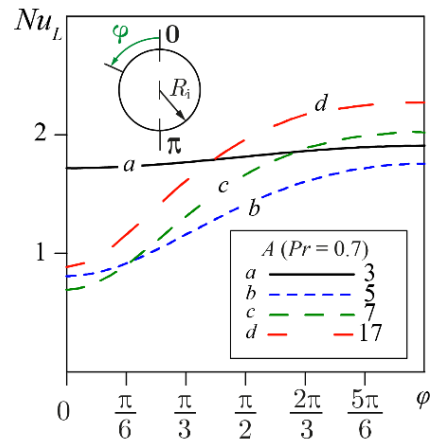


Рис. 3. Распределение локального значения числа Нуссельта Nu_L вдоль поверхности нагретого внутреннего цилиндра при различном аспектном соотношении ($Pr = 7.02$ и $Ra = 1.0 \cdot 10^2$). Полученные кривые в точности совпадают с результатами работы [19]

Линии на графике демонстрируют изменение числа Нуссельта с увеличением полярного угла ϕ для разных аспектных соотношений. Так, значение аспектного соотношения $A = 3$ отвечает теплопроводному режиму, а $A > 3$ – конвективному. Полученные кривые в точности совпадают с результатами работы [19].

5. Результаты

5.1. Влияние ориентации гравитационного поля на структуру течения

Задача о распределении скорости и температуры решается для полости с аспектным соотношением $A = 5$ в следующем диапазоне управляющих параметров: $R_i = 5$ мм, $Ra \in (0, 6 \cdot 10^5)$,

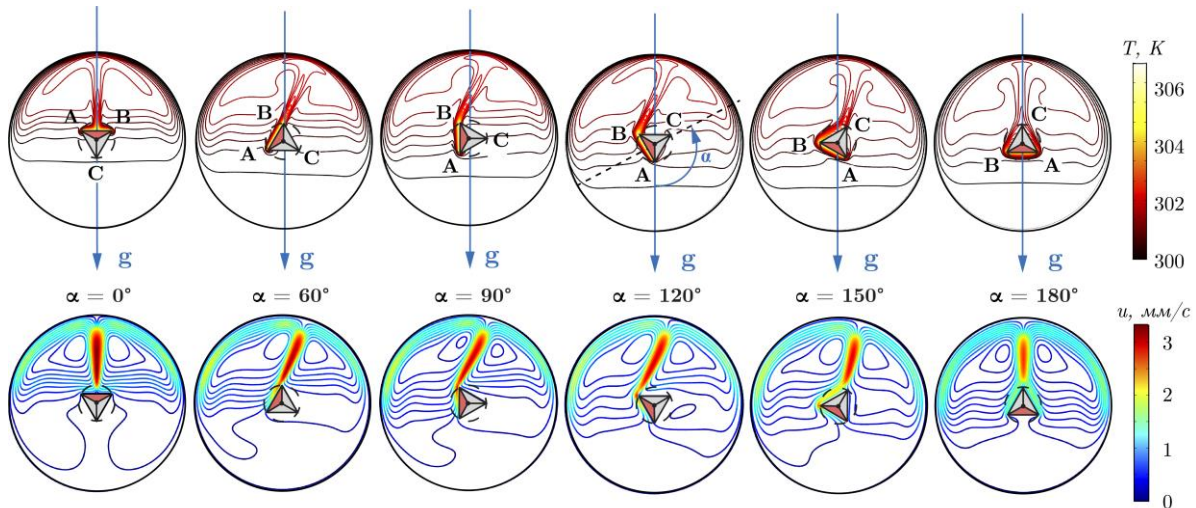


Рис. 4. Изотермы и линии тока при различных направлениях действия гравитационного поля $\alpha = 0^\circ; 60^\circ; 120^\circ; 150^\circ; 180^\circ$, при $Ra = 6 \cdot 10^5$, $R_i = 5$ мм и $A = 5$

$\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$, $Pr = 7.02$. При заданных геометрии полости, ориентации гравитационного вектора и свойствах жидкости число Ra изменяется за счет разницы температур между нагревателем и холодильником. Выбранный интервал чисел Рэлея $Ra \in (0, 1.2 \cdot 10^6)$ соответствует перепаду температур в диапазоне от 0 К до 6 К. В рамках поставленной задачи исследуются структуры полей скорости и температуры и их зависимости от интенсивности нагрева, и ориентации подогреваемой области.

Структура течения зависит от направления действия g . На рис. 4 показаны изотермы и линии тока для различных углов поворота. Для удобства обсуждения результатов обозначим вершины треугольника на краях нагревателя как А и В, а вершину на стыке теплоизолированных сторон треугольника – С.

Углы $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$ равносильны вертикальному расположению нагревателя сверху или снизу соответственно. В этих случаях организуется симметричное двухваликовое течение. Нагретая жидкость, поднимаясь, формирует конвективную струю. Наибольшая скорость достигается в области непосредственно над нагревателем. Похожая структура наблюдается при равномерном нагреве внутреннего круглого цилиндра [20, 21].

Ситуация меняется при повороте гравитационного вектора на отличные от 0° и 180° углы – симметрия нагрева жидкости нарушается. Так, в результате наклона системы на угол $0^\circ < \alpha < 60^\circ$ большая часть нагретой поверхности оказывается слева по отношению к оси $\varphi = 0^\circ$. По мере увеличения угла в указанном диапазоне точка отрыва постепенно смещается к вершине В. Происходит это в результате конкуренции восходящего и нисходящего вдоль нагретой поверхности потоков.

Кроме того, ввиду ограниченного пространства, конвективный факел, достигая верхней гра-

ницы, отклоняется в сторону. Тестовые расчёты показали, что в случае бесконечного слоя такое явление не наблюдается.

При дальнейшем увеличении угла α факел продолжает наклоняться в сторону теплоизолированной границы треугольника. При этом при $\alpha > 120^\circ$ часть нагретой жидкости начинает обтекать треугольник справа по поверхности АС. Точка отрыва смещается к вершине С, которая достигается при значении угла $\alpha = 150^\circ$.

Между углами 150° и 180° интенсивность потоков справа и слева от оси $\varphi = 0^\circ$ постепенно выравнивается. Одновременно с этим отклонение конвективного факела от вертикали ослабевает, и система возвращается в симметричное состояние.

5.2. Влияние ориентации нагревателя на теплообмен

Ориентация нагреваемого сегмента в гравитационном поле сказывается на интегральных характеристиках теплопереноса. На рис. 5 приведены графики зависимостей глобального числа Нуссельта Nu от числа Рэлея при различных углах поворота α .

Значение функции $Nu(Ra)$ увеличивается при повышении параметра Рэлея. Скорость роста каждой кривой нелинейно зависит от угла наклона нагревателя α . Так, линия $\alpha = 0^\circ$ на рис. 5, а лежит ниже кривой для $\alpha = 60^\circ$, но выше чем для $\alpha = 180^\circ$. При фиксированных значениях числа Рэлея Ra , интенсивность теплоотдачи увеличивается с ростом угла до значения $\alpha \approx 90^\circ$ (рис. 5, b). Затем функция монотонно убывает. Так происходит потому, что вместе с углом вплоть до 90° увеличивается скорость потока вдоль нагретой поверхности. После достижения $\alpha = 90^\circ$ часть нагретой жидкости обтекает треугольник по теплоизолированной поверхности. В связи с этим интенсивность охла-

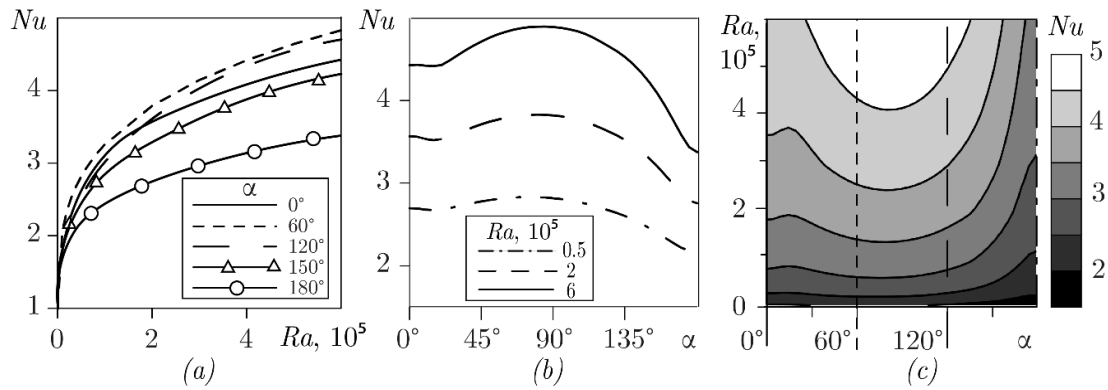


Рис. 5. Зависимость глобального Нуссельта: а – от числа Рэлея для четырех фиксированных углов поворота нагревателя; б – от угла поворота нагревателя для трех фиксированных чисел Рэлея; с – в пространстве чисел Рэлея Ra и угла поворота нагревателя α

ждающего потока ослабевает, а эффективность теплоотдачи уменьшается.

В крайнем верхнем положении нагревателя значение числа Нуссельта при $Ra = 6 \cdot 10^5$ оказывается примерно на 25 % больше, чем в нижнем, но на 10 % меньше, чем при подогреве сбоку.

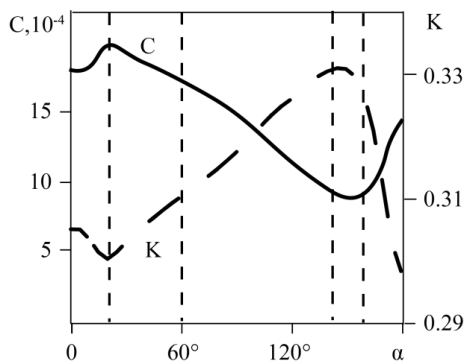


Рис. 6. Зависимость коэффициентов C и K от угла поворота нагревателя α

Для того, чтобы описать сложную зависимость Нуссельта от числа Рэлея и угла наклона нагревателя, функция $Nu(Ra, \alpha)$ была аппроксимирована степенным законом:

$$Nu(Ra, \alpha) = 1 + C(\alpha)Ra^{K(\alpha)}, \quad (13)$$

где $C(\alpha)$ и $K(\alpha)$ – зависящие от угла α коэффициенты. Их зависимость от α показана на рис. 6. Для упрощения анализа кривые $C(\alpha)$ и $K(\alpha)$ разделены на пять монотонных участков: 1 – $(0^\circ, 20^\circ)$, 2 – $(20^\circ, 60^\circ)$, 3 – $(60^\circ, 140^\circ)$, 4 – $(140^\circ, 160^\circ)$, 5 – $(160^\circ, 180^\circ)$. На рисунке они разграничены пунктиром. В пределах каждой из этих областей зависимости $C(\alpha)$ и $K(\alpha)$ можно представить полиномами второго порядка:

$$C(\alpha) = C_0 + C_1\alpha + C_2\alpha^2, \quad (14)$$

$$K(\alpha) = K_0 + K_1\alpha + K_2\alpha^2. \quad (15)$$

Коэффициенты разложений (14) и (15) представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты разложения функций $C(\alpha)$ и $K(\alpha)$

№ п/п	Коэффициенты					
	$C_0, 10^{-2}$	$C_1, 10^{-4}$	$C_2, 10^{-7}$	$K_0, 10^{-1}$	$K_1, 10^{-3}$	$K_2, 10^{-5}$
1	0.18	0.01	4.57	3.1	-0.11	-0.77
2	0.21	-0.08	0.19	2.9	0.34	-0.10
3	0.23	-0.07	-0.14	0.30	0.26	0
4	1.02	-1.21	3.94	-0.17	6.83	-2.3
5	0.99	-1.33	4.80	0.66	-2.63	0.38

6. Заключение

Исследованы процессы тепломассопереноса в зазоре между коаксиальными цилиндрами для числа Прандтля $Pr = 7.02$ при частичном подогреве внутреннего, имеющего треугольное сечение. Задача решена численно в стационарной постановке в *Comsol Multiphysics 5.4*.

Проведена верификация численной модели на примере известных результатов для конвекции в зазоре между изотермическими коаксиальными цилиндрами круглого сечения. Достигнуто совпадение собственных и известных результатов.

Рассмотрено влияние ориентации нагревателя на структуру конвективного течения, распределение температуры и скорости. Показано, что поворот системы приводит к нарушению симметрии течения и перераспределению тепловых потоков в зазоре между цилиндрами.

При увеличении наклона системы до 90° тепловой поток с поверхности нагревателя усиливается. Дальнейший поворот приводит к ослаблению теплоотдачи. Таким образом, наибольшее число Нуссельта наблюдается в случае боковой ориентации нагретой области.

На основании полученных результатов построена эмпирическая зависимость числа Нуссельта от интенсивности нагрева и угла поворота.

Список литературы

1. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., De Witt D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New-York: Wiley, 2011, 733 p.
2. Sheikh H. F., Ahmad I., Wang Z., Ranka S. An overview and classification of thermal-aware scheduling techniques for multi-core processing systems // *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2012. T. 2. №. 3. С. 151–169.
3. Nada S., Mowad M. Free convection from a vertical and inclined semicircular cylinder at different orientations // *Alexandria Engineering Journal*. 2003. Vol. 42. N. 3. С. 273–282.
4. Martyushev S. G., Sheremet M. A. Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in a three-dimensional enclosure with a heat source // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 73. P. 340–353.
5. Gibanov N., Sheremet M. Unsteady natural convection in a cubical cavity with a triangular heat source // *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*. 2017. Vol. 27. N. 8. P. 1795–1813.
6. Kondrashov A., Burkova E. Stationary convective regimes in a thin vertical layer under the local heating from below // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 118. P. 58–65.
7. Gibanov N. S., Sheremet M. A. Natural convection in a cubical cavity with different heat source configurations // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018. Vol. 7. P. 138–145.
8. Garoosi F., Hoseininejad F., Rashidi M. M. Numerical study of natural convection heat transfer in a heat exchanger filled with nanofluids // *Energy*. 2016. Vol. 109. P. 664–678.
9. Yuan X., Tavakkoli F., Vafai K. Analysis of natural convection in horizontal concentric annuli of varying inner shape // *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2015. Vol. 68. N. 11. P. 1155–1174.
10. Abdulkadhim A., Majdi H., Abed A. Characteristics of natural convection flow and heat transfer of parallelogramic enclosure with an inner circular cylinder using liquid nanofluids // *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*. 2018. Vol. 12.
11. Selimefendigil F. Natural convection in a trapezoidal cavity with an inner conductive object of different shapes and filled with nanofluids of different nanoparticle shapes // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 42. N. 2. P. 169–184.
12. Yu Z.-T., Fan L.-W., Hu Y.-C., Cen K.-F. Prandtl number dependence of laminar natural convection heat transfer in a horizontal cylindrical enclosure with an inner coaxial triangular cylinder // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53. N. 7–8. P. 1333–1340.
13. Yu Z.-T., Xu X., Hu Y.-C., Fan L.-W., Cen K.-F. Transient natural convective heat transfer from a heated triangular cylinder to its air-filled coaxial cylindrical enclosure // *International journal of heat and mass transfer*. 2010. Vol. 53. N. 19–20. P. 4296–4303.
14. Dogonchi A. S., Sheremet M. A., Pop I., Ganji D. D. MHD natural convection of Cu/H₂O nanofluid in a horizontal semi-cylinder with a local triangular heater // *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*. 2018. Vol. 28. N. 12. P. 2979–2996.
15. Haq R. U., Soomro F. A., Öztop H. F., Mekkaoui T. Thermal management of water-based carbon nanotubes enclosed in a partially heated triangular cavity with heated cylindrical obstacle // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 131. P. 724–736.
16. Vijaybabu T. R., Dhinakaran S. MHD Natural convection around a permeable triangular cylinder inside a square enclosure filled with Al₂O₃-H₂O nanofluid: An LBM study // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 153. P. 500–516.
17. Degner B. W., Kalinowsky C. E., Kosoglow R. D., et al. Desktop electronic device: US Patent Application 20180246547.
18. Dutta A., Gupta A. K., Mishra G., Ghhabra R. P. Effect of fluid yield stress and of angle of tilt on natural convection from a square bar in a square annulus // *Computers and Fluids*. 2018. Vol. 160. P. 138–163.
19. Kuehn T. H., Goldstein R. J. A parametric study of Prandtl number and diameter ratio effects on natural convection heat transfer in horizontal cylindrical annuli // *Journal of Heat Transfer*. 1980. Vol. 102. N. 4. P. 768–770.
20. Cho C. H., Chang K. S., Park K. H. Numerical simulation of natural convection in concentric and eccentric horizontal cylindrical annuli // *Journal of Heat transfer*. 1982. Vol. 104. N. 4. P. 624–630.
21. Shadlaghani A., Farzaneh M., Shahabadi M., Tavakoli M. R., Safaei M. R. Numerical investigation of serrated fins on natural convection from concentric and eccentric annuli with different cross sections // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019. Vol. 135. N. 2. P. 1429–1442.

References

1. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., De Witt D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New-York: Wiley, 2011, 733 p.
2. Sheikh H. F., Ahmad I., Wang Z., Ranka S. An overview and classification of thermal-aware scheduling techniques for multi-core processing systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 151–169.
3. Nada S., Mowad M. Free convection from a vertical and inclined semicircular cylinder at different orientations. *Alexandria Engineering Journal*, 2003, vol. 42, no. 3, pp. 273–282.

4. Martyushev S. G., Sheremet M. A. Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in a three-dimensional enclosure with a heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 73, pp. 340–353.
5. Gibanov N., Sheremet M. Unsteady natural convection in a cubical cavity with a triangular heat source. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2017, vol. 27, no. 8, pp. 1795–1813.
6. Kondrashov A., Burkova E. Stationary convective regimes in a thin vertical layer under the local heating from below. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 118, pp. 58–65.
7. Gibanov N. S., Sheremet M. A. Natural convection in a cubical cavity with different heat source configurations. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 7, pp. 138–145.
8. Garoosi F., Hoseinnejad F., Rashidi M. M. Numerical study of natural convection heat transfer in a heat exchanger filled with nanofluids. *Energy*, 2016, vol. 109, pp. 664–678.
9. Yuan X., Tavakkoli F., Vafai K. Analysis of natural convection in horizontal concentric annuli of varying inner shape. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2015, vol. 68, no. 11, pp. 1155–1174.
10. Abdulkadhim A., Majdi H., Abed A. Characteristics of natural convection flow and heat transfer of parallelogramic enclosure with an inner circular cylinder using liquid nanofluids. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 2018, vol. 12.
11. Selimefendigil F. Natural convection in a trapezoidal cavity with an inner conductive object of different shapes and filled with nanofluids of different nanoparticle shapes. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 42, no. 2, pp. 169–184.
12. Yu Z.-T., Fan L.-W., Hu Y.-C., Cen K.-F. Prandtl number dependence of laminar natural convection heat transfer in a horizontal cylindrical enclosure with an inner coaxial triangular cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, no. 7–8, pp. 1333–1340.
13. Yu Zi-Tao, Xu X., Hu Y.-C., Fan L.-W., Cen K.-F. Transient natural convective heat transfer from a heated triangular cylinder to its air-filled coaxial cylindrical enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, no. 19–20, pp. 4296–4303.
14. Dogonchi A. S., Sheremet M. A., Pop I., Ganji D. D. MHD natural convection of Cu/H₂O nanofluid in a horizontal semi-cylinder with a local triangular heater. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2018, vol. 28, no. 12, pp. 2979–2996.
15. Haq R. U., Soomro F. A., Öztop H. F., Mekkaoui T. Thermal management of water-based carbon nanotubes enclosed in a partially heated triangular cavity with heated cylindrical obstacle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 131, pp. 724–736.
16. Vijaybabu T. R., Dhinakaran S. MHD Natural convection around a permeable triangular cylinder inside a square enclosure filled with Al₂O₃-H₂O nanofluid: An LBM study. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, vol. 153, pp. 500–516.
17. Degner B. W., Kalinowsky C. E., Kosoglow R. D., et al. *Desktop electronic device: US Patent Application 20180246547*.
18. Dutta A., Gupta A. K., Mishra G., Ghhabra R. P. Effect of fluid yield stress and of angle of tilt on natural convection from a square bar in a square annulus. *Computers and Fluids*, 2018, vol. 160, pp. 138–163.
19. Kuehn T. H., Goldstein R. J. A parametric study of Prandtl number and diameter ratio effects on natural convection heat transfer in horizontal cylindrical annuli. *Journal of Heat Transfer*, 1980, vol. 102, no. 4, pp. 768–770.
20. Cho C. H., Chang K. S., Park K. H. Numerical simulation of natural convection in concentric and eccentric horizontal cylindrical annuli. *Journal of Heat transfer*, 1982, vol. 104, no. 4, pp. 624–630.
21. Shadlaghani A., Farzaneh M., Shahabadi M., Tavakoli M. R., Safaei M. R. Numerical investigation of serrated fins on natural convection from concentric and eccentric annuli with different cross sections. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, vol. 135, no. 2, pp. 1429–1442.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Гончаров М. М., Оглезнев А. А., Кондрашов А. Н. Ориентационные эффекты конвекции в полости между частично нагретыми цилиндрами различной формы // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 2. С. 16–23. doi: 10.17072/1994-3598-2019-2-16-23

Please cite this article in English as:

Goncharov M. M., Ogleznev A. A., Kondrashov A. N. Orientational effects of convection in the cavity between partially heated cylinders of various shapes // Bulletin of Perm University. Physics, 2019, no. 2, pp. 16–23. doi: 10.17072/1994-3598-2019-2-16-23