

УДК 519.6:536.24

ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ ПСЕВДОПЛАСТИЧНОЙ НАНОЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ОБЪЕМНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ И ТЕПЛОПРОВОДНОЙ ПОДЛОЖКИ¹

© 2024 г. Д. С. Лоенко*, М. А. Шеремет

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

*E-mail: d.s.loenko@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 20.10.2022 г.

После доработки 20.09.2023 г.

Принята к публикации 04.12.2023 г.

Данное исследование посвящено анализу возможности интенсификации охлаждения источника энергии, расположенного на теплопроводной подложке, в замкнутой полости, заполненной псевдопластичной наножидкостью, в режиме естественно-конвективного теплообмена. Рабочая среда представляла собой суспензию “карбоксилметилцеллюлоза–вода с наночастицами меди”. Задача описывается дифференциальными уравнениями в приближении Обербека–Буссинеска, которые решаются методом конечных разностей. В ходе решения оценивалось влияние определяющих параметров (числа Рэлея, объемной доли наночастиц, толщины теплопроводной подложки и положения источника) на структуру течения и интенсивность теплообмена. Установлено, что наиболее интенсивное охлаждение происходит, когда источник энергии расположен максимально близко к охлаждающим стенкам, при этом объемная доля наночастиц не должна превышать 1%.

DOI: 10.31857/S0040364424010101

ВВЕДЕНИЕ

Использование наножидкостей помогает улучшить характеристики теплопереноса в полостях благодаря их составу. Наножидкость представляет собой форму теплоносителя с высокой теплопроводностью, состоящую из частиц металлов или неметаллов нанометрового размера (диаметр частицы <100 нм), диспергированных в традиционных средах, таких как вода, спирт и масло. Естественно-конвективный теплоперенос наножидкостями в различных геометрических конфигурациях встречается в технических приложениях, связанных, например, с охлаждением электронного оборудования, солнечной дистилляцией, литьем металлов, жидкометаллическими охлаждающими покрытиями для термоядерных реакторов, а также с конструкциями современных теплообменников.

Большой популярностью пользуются кольцевые полости. В [1] проведено численное исследование естественной конвекции в кольцевой полости, заполненной наножидкостью “вода с наночастицами

оксида алюминия”, для определения характеристик колебательных режимов конвекции. Обнаружено, что увеличение объемной доли наночастиц не только усиливает конвективный теплообмен, но и улучшает условия стабилизации течения и симметрию его структуры. Авторы [2] провели математическое моделирование охлаждения кремниевого чипа в полукруглой наклонной полости в режиме естественно-конвективного теплообмена в наножидкости “вода с многостенными углеродными нанотрубками”. Результаты показали, что увеличение угла наклона полости приводит к интенсификации циркуляции жидкости, а влияние наличия твердых нанодобавок проявляется в интенсификации теплообмена. Цель исследования [3] заключалась в изучении возможности интенсификации теплообмена в круглой трубе, заполненной наножидкостью “вода с наночастицами оксида алюминия”, в условиях естественной конвекции. Для этого было проведено математическое моделирование описываемого процесса в холодном полуэллиптическом корпусе, в центре которого располагалась горячая полутруба. В ходе исследования установлено, что при больших числах Рэлея оптимальная объемная доля наночастиц оксида алюминия составляет 1%.

¹ По материалам Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8). Москва. 17–22 октября 2022 г.

Авторы [4] исследовали режимы естественной конвекции наножидкости “вода с наночастицами меди” в кольцевом пространстве. Исследуемая область представляла собой бесконечно длинные горизонтальные эллиптические цилиндры, пространство между которыми заполнялось рабочей средой. Поверхность внутреннего цилиндра была горячей и погружалась в пористый материал. Моделирование показало, что увеличение числа Дарси и пористости среды приводит к интенсификации конвективного теплообмена. Вертикальный кольцевой канал, заполненный наножидкостью “вода с наночастицами меди”, использовался для исследования естественной конвекции под воздействием двух нагревателей в [5]. Результаты численных экспериментов показали, что снижению температуры способствует увеличение числа Рэлея и объемной доли наночастиц.

Расчеты для прямоугольных областей также проводятся во многих работах. Например, естественная конвекция наножидкости “вода с наночастицами меди” под действием однородного магнитного поля в полости с криволинейной границей моделируется в [6]. Вертикальная и горизонтальная стенки считаются изотермическими, а криволинейная граница — адиабатической. В результате моделирования получены рост среднего числа Нуссельта с увеличением объемной доли наночастиц, а также повышение скорости теплообмена с уменьшением угла раствора полости. Численное исследование в [7] проведено для оценки влияния размера квадратной дифференциально-обогреваемой полости, числа Рэлея и объемной доли наночастиц на режимы естественной конвекции гибридной наножидкости “вода с наночастицами оксида железа и многостенными углеродными нанотрубками”. Установлено, что конвективный теплообмен усиливается с увеличением объемной доли наночастиц и числа Рэлея, а увеличение геометрического параметра полости приводит к ослаблению теплообмена. В [8] изучалась естественная конвекция неньютоновской наножидкости в прямоугольном дифференциально-обогреваемом корпусе под действием наклонного однородного магнитного поля. В ходе исследования максимальное значение среднего числа Нуссельта получено при $n = 1$, что соответствует ньютоновской среде. Моделирование конвективного теплообмена наножидкости “вода с наночастицами меди” в квадратной пористой полости проведено в [9]. Обнаружено, что интенсивность конвективного механизма теплообмена снижается с увеличением объемной доли наночастиц и числа Гартмана. В [10] проведен численный анализ свободной конвекции наножидкости “вода с наночастицами оксида титана” в замкнутой квадратной полости с охлаждаемой стенкой. Моделирование показало, что при малых числах Рэлея и объемной доле наночастиц 6% средний коэффициент

конвективного теплообмена увеличился на 21% по сравнению со случаем чистой базовой жидкости.

Иногда исследователи выбирают полости со сложной геометрией и нерегулярными границами. Например, работа [11] посвящена анализу свободно-конвективного тепломассопереноса в гибридной наножидкости “вода с наночастицами меди и оксида титана” в С-образной полости с двумя волнистыми перегородками. Результаты показали, что скорость теплообмена растет с увеличением амплитуды волнистых перегородок и числа Рэлея. Анализ влияния внутреннего тепловыделения и теплопоглощения на режимы естественной конвекции наножидкости “вода с наночастицами меди” в условиях воздействия однородного магнитного поля проведен в [12]. Исследуемая область представляет собой полость с волнистыми холодными стенками, в центре которой расположен горячий цилиндр. Установлено, что при больших числах Рэлея увеличение числа Гартмана приводит к ослаблению конвективного теплообмена. В [13] исследование посвящено возможности описания задач естественно-конвективного теплообмена в наножидкостях “вода с наночастицами меди” и “вода с наночастицами серебра” вдоль бесконечной пластины с использованием подхода, основанного на применении производных дробных порядков. Установлено, что интенсивность конвективного теплообмена ослабевает с увеличением дробного параметра. В [14] проведено численное исследование естественной конвекции в наножидкости “вода с наночастицами меди” в U-образной пористой полости. Нижняя стенка имела температуру, изменяющуюся по синусоидальному закону. Обнаружено, что увеличение чисел Рэлея и Дарси, а также объемной доли наночастиц интенсифицирует конвективный теплообмен. Естественная конвекция наножидкости “вода с частицами оксида алюминия” в трапециевидной полости численно изучена в [15]. Анализ показал, что увеличение угла наклона боковых стенок в двумерном случае приводит к снижению значений числа Нуссельта. Работа [16] посвящена исследованию обтекания усеченного конуса тремя видами наножидкостей. Авторы выявили, что использование рабочей жидкости “вода с частицами меди” интенсифицирует теплообмен на 31.74% по сравнению с другими наножидкостями.

Представленный краткий обзор опубликованных работ иллюстрирует актуальность и практическую значимость исследований конвективного тепломассопереноса в наножидкостях. Однако многие аспекты, отражающие неньютоновский характер базовой жидкости, возможное наличие теплопроводной подложки и источника энергии объемного тепловыделения, освещены не в полной мере. Исходя из этого, целью настоящей работы является математическое моделирование естественно-конвективного тепломассопереноса в замкнутой квадратной

полости, заполненной псевдопластичной наножидкостью, при наличии локального источника объемного тепловыделения и теплопроводной подложки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Псевдопластичная наножидкость “карбоксилметилцеллюлоза–вода” (КМЦ–вода) с наночастицами меди заполняет замкнутую квадратную полость размером L , вертикальные и верхняя горизонтальная стенки которой являются охлаждающими с постоянной температурой T_c (рис. 1). На нижней стенке расположена теплопроводная медная подложка толщиной h . Внешние границы подложки являются адиабатическими. На подложке расположен источник с постоянной плотностью объемного тепловыделения Q . Расстояние от левой стенки полости до левой границы источника – a . Сила тяжести, определяемая ускорением свободного падения g , направлена вертикально вниз. Теплофизические свойства использованных материалов (теплоемкость c , плотность ρ , теплопроводность λ и термический коэффициент объемного расширения β) представлены в таблице.

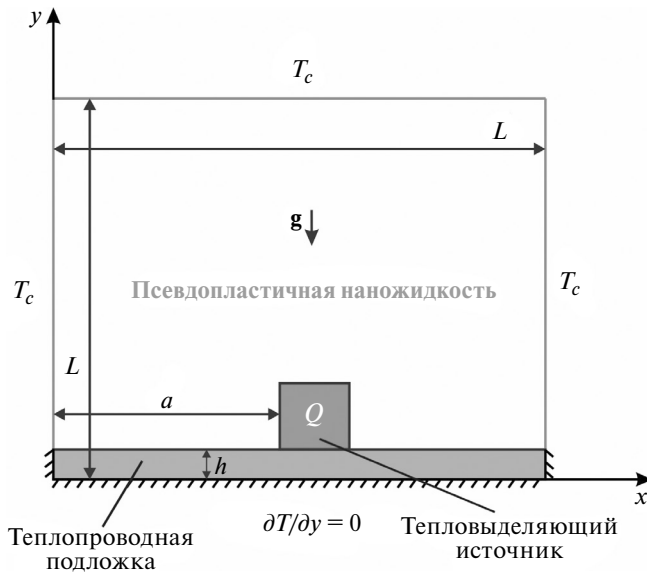


Рис. 1. Область решения.

Свойства материалов [13, 17, 18]

Свойства	c , Дж/(кг К)	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м К)	β , 1/К
Базовая жидкость КМЦ (0.1%)–вода	4179	997.1	0.613	21×10^{-5}
Наночастицы меди	385	8933	400	16.7×10^{-6}
Тепловыделяющий элемент (кремний)	710	2330	150	–

Дифференциальные уравнения, описывающие процесс нестационарного конвективного теплопереноса, в приближении Обербека–Буссинеска в преобразованных безразмерных переменных “функция тока–завихренность” имеют следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = H_1(\phi) \left(\frac{Ra}{Pr} \right)^{\frac{n-2}{2}} \left[\nabla^2 (\bar{M}\Omega) + S_\Omega \right] + H_2(\phi) \frac{\partial \Theta}{\partial X}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Theta}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{H_3(\phi)}{\sqrt{RaPr}} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} \frac{\partial \Theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} \right) \right]. \quad (3)$$

Здесь Ψ – безразмерная функция тока; X , Y – безразмерные декартовы координаты; Ω – безразмерная завихренность; τ – безразмерное время;

$Ra = \frac{g\beta_{bf}\Delta TL^3}{\tilde{\nu}_{bf}\alpha_{bf}}$ – число Рэлея; $Pr = \frac{\tilde{\nu}_{bf}}{\alpha_{bf}}$ – число

Прандтля; ∇^2 – безразмерный оператор Лапласа; Θ – безразмерная температура; ϕ – объемная доля наночастиц меди; λ_{bf} , λ_{nf} – коэффициенты теплопроводности базовой жидкости и наножидкости; β_{bf} – термический коэффициент объемного расширения базовой жидкости; ΔT – температурный напор; α_{bf} – коэффициент температуропроводности

базовой жидкости; $\tilde{\nu}_{bf} = \left(\frac{K_{bf}}{\rho_{bf}} \right)^{\frac{1}{2-n}} L^{\frac{2-2n}{2-n}}$ – кинематический коэффициент эффективной вязкости базовой жидкости, K_{bf} – коэффициент плотности потока базовой жидкости, n – показатель поведения базовой жидкости.

Уравнения теплопроводности для источника энергии и внутри нижней теплопроводной подложки:

$$\frac{\partial \Theta_{hs}}{\partial \tau} = \frac{\alpha_{hs}/\alpha_{bf}}{\sqrt{RaPr}} \left(\frac{\partial^2 \Theta_{hs}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{hs}}{\partial Y^2} + 1 \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Theta_w}{\partial \tau} = \frac{\alpha_w / \alpha_{bf}}{\sqrt{\text{RaPr}}} \left(\frac{\partial^2 \Theta_w}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_w}{\partial Y^2} \right), \quad (5)$$

где Θ_{hs} – безразмерная температура источника энергии; Θ_w – безразмерная температура внутри теплопроводной подложки; α_{hs} , α_w – коэффициенты температуропроводности материала источника энергии и материала подложки.

Вспомогательные функции:

$$\bar{M} = \left[4 \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X \partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}},$$

$$S_\Omega = 2 \left[\frac{\partial^2 \bar{M}}{\partial X^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \bar{M}}{\partial Y^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} - 2 \frac{\partial^2 \bar{M}}{\partial X \partial Y} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X \partial Y} \right],$$

$$H_1(\phi) = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} = \frac{\mu_{nf} / \mu_{bf}}{(1 - \phi + \phi \rho_p / \rho_{bf})},$$

$$H_2(\phi) = \frac{(\rho\beta)_{nf}}{(\rho\beta)_{bf}} \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} = \frac{1 - \phi + \phi(\rho\beta)_p / (\rho\beta)_{bf}}{1 - \phi + \phi \rho_p / \rho_{bf}},$$

$$H_3(\phi) = \frac{(\rho c)_{bf}}{(\rho c)_{nf}} = \frac{1}{1 - \phi + \phi(\rho c)_p / (\rho c)_{bf}}.$$

Здесь μ_{nf} , μ_{bf} – динамические коэффициенты вязкости наножидкости и базовой жидкости; ρ_{nf} , ρ_{bf} , ρ_p – плотности наножидкости, базовой жидкости, меди; β_{nf} , β_p – термические коэффициенты объемного расширения наножидкости и меди; c_{nf} , c_{bf} , c_p – теплоемкости наножидкости, базовой жидкости, меди.

Для обезразмеривания уравнений использовались следующие безразмерные параметры:

$\sqrt{g\beta L \Delta T}$ – масштаб скорости, $\sqrt{L/g\beta \Delta T}$ – масштаб времени, $\sqrt{g\beta L^3 \Delta T}$ – масштаб функции тока, $\sqrt{g\beta \Delta T / L}$ – масштаб завихренности; $\Theta = (T - T_c) / \Delta T$ – безразмерная температура, где $\Delta T = T_h - T_c$.

Псевдопластичный характер течения жидкости описывается степенным законом Оствальда–де Вилиа [19]

$$\tau_{ij} = 2\mu_{nf} D_{ij}.$$

Здесь τ_{ij} – компоненты тензора напряжений;

$D_{ij} = 0.5(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$ – компоненты тензора скоростей деформации; u_i , u_j – компоненты

вектора скорости, соответствующие координатам x_i , x_j .

Эффективный коэффициент вязкости наножидкости вычисляется с помощью соотношения [20]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2 \right) \left(1 + 350 \frac{\phi}{d_p} \right),$$

где d_p – диаметр наночастиц.

Вязкость базовой жидкости в соответствии со степенным законом определялась следующим соотношением:

$$\mu_{bf} = K_{bf} (2D_{kl} D_{kl})^{\frac{n-2}{2}}.$$

Здесь K – коэффициент плотности потока; D_{kl} – компоненты тензора скорости деформации; n – индекс степенного закона, или показатель поведения жидкости, характеризующий взаимосвязь вязкости жидкости и скорости деформации. Если $n = 1$, то жидкость является ньютоновской и имеет линейную зависимость вязкости и скорости деформации. Случай $n > 1$ описывает поведение дилатантной жидкости, у которой вязкость возрастает при увеличении скорости деформации. При $n < 1$ описано поведение псевдопластичной жидкости, у которой вязкость уменьшается при увеличении скорости деформации. В данном исследовании используется именно псевдопластичная базовая среда, показатель поведения которой равен 0.91 [17].

Эффективная теплопроводность наносuspension вычислялась с помощью экспериментальной корреляции [21]

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} = (1 - \phi) + 0.01 \frac{\lambda_p}{\lambda_{bf}} \phi + \left(18 \times 10^6 \right) \frac{d_{bf}}{d_p} \text{Re}^2 \text{Pr} \phi.$$

Здесь λ_p – коэффициент теплопроводности меди; d_{bf} – размер молекулы базовой жидкости;

$\text{Re} = \frac{D_0 d_p}{l_{bf} \tilde{v}_{bf}}$ – число Рейнольдса, D_0 – коэффициент диффузии, l_{bf} – длина свободного пробега молекулы базовой жидкости.

Начальные и граничные условия для системы уравнений (1)–(5) в безразмерном виде выглядят следующим образом (где $\delta_1 = h/L$ – безразмерная толщина подложки):

$$\tau = 0 \quad \Psi = \Omega = 0, \quad \Theta = 0.0;$$

$$\tau > 0 \quad X = 0 \text{ и } X = 1, \quad 0 \leq Y \leq \delta_1, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial X} = 0;$$

$$X = 0 \quad X = 1, \quad \delta_1 \leq Y \leq 1, \quad \Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0, \quad \Theta = 0;$$

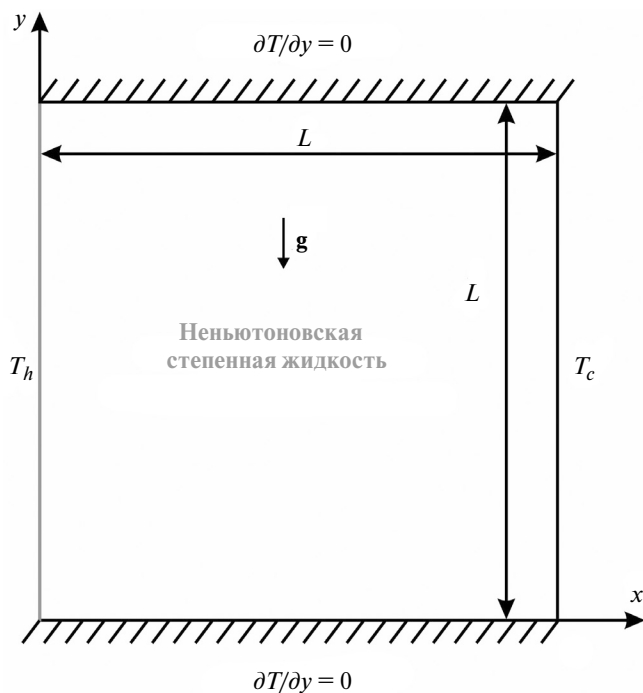


Рис. 2. Область решения тестовой задачи.

$$Y = 0, 0 \leq X \leq 1, \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = 0;$$

$$Y = 1, 0 \leq X \leq 1, \Psi = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = 0.$$

На поверхности источника энергии:

$$\Psi = 0, \Omega = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \bar{n}^2}, \begin{cases} \Theta_{hs} = \Theta_{nf}, \\ \lambda_{hs} \frac{\partial \Theta_{hs}}{\partial \bar{n}} = \frac{\partial \Theta_{nf}}{\partial \bar{n}}. \end{cases}$$

На поверхности подложки:

$$\Psi = 0, \Omega = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2}, \begin{cases} \Theta_w = \Theta_{nf}, \\ \lambda_w \frac{\partial \Theta_w}{\partial Y} = \frac{\partial \Theta_{nf}}{\partial Y}. \end{cases}$$

Для решения описанной системы нестационарных дифференциальных уравнений (1)–(5) с соответствующими начальными и граничными условиями применялись различные схемы на основе метода конечных разностей. Метод последовательной нижней релаксации был применен для решения разностного уравнения Пуассона для функции тока (1). Известно, что в случае псевдопластичной среды существует особенность в виде “бесконечной” величины эффективной вязкости. Для сохранения устойчивости расчетной схемы проводилась регуляризация степенной модели на основе подхода Берковера и Инглемана [22]. Локально-одномерная схема А.А. Самарского применялась для сведения двумерной задачи к системе одномерных задач. Далее конвективные слагаемые были дискретизованы на

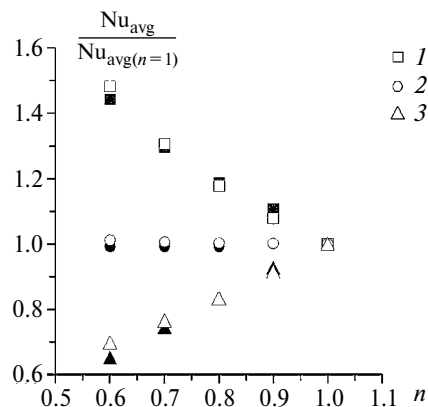


Рис. 3. Апробация вычислительного комплекса на основе сравнения с данными [23] при $Ra = 10^5$: 1 – $Pr = 10^2$, 2 – 10^3 , 3 – 10^4 .

основе схемы с донорными ячейками, диффузионные — с помощью центральных разностей. Полученная система линейных алгебраических уравнений решалась методом прогонки.

Разработанный алгоритм решения задачи и написанный программный код были апробированы на более простых задачах. На рис. 2 представлена геометрическая постановка тестовой задачи. Неньютоновская жидкость заполняет замкнутую квадратную дифференциально-обогреваемую полость. Горизонтальные стенки теплоизолированы. Сравнение результатов проводилось на основе нормированных значений среднего числа Нуссельта, вычисленного на горячей стенке, в зависимости от времени и показателя поведения жидкости n , по формуле

$$Nu_{avg} = \int_0^1 \left(-\frac{\partial \Theta}{\partial X} \right) dY.$$

Результаты данной работы обозначены белыми фигурами, работы [23] — черными фигурами. Сравнение, показанное на рис. 3, отражает работоспособность разработанного программного кода.

Отдельно проведен анализ влияния сеточных параметров (рис. 4) на профили температуры и скорости в горизонтальном сечении $Y = 0.5$ при $Ra = 10^5$, $\phi = 0.01$, $\delta_1 = 0.1$, $\delta_2 = 0.4$. Здесь $\delta_2 = a/L$ — безразмерное расстояние между левой стенкой полости и левой стенкой источника энергии. Видно, что сетки размерностей 300×300 и 400×400 элементов не привели к заметным расхождениям, поэтому последующие вычисления проводились на равномерной прямоугольной сетке размерностью 300×300 элементов для оптимизации времени вычислений.

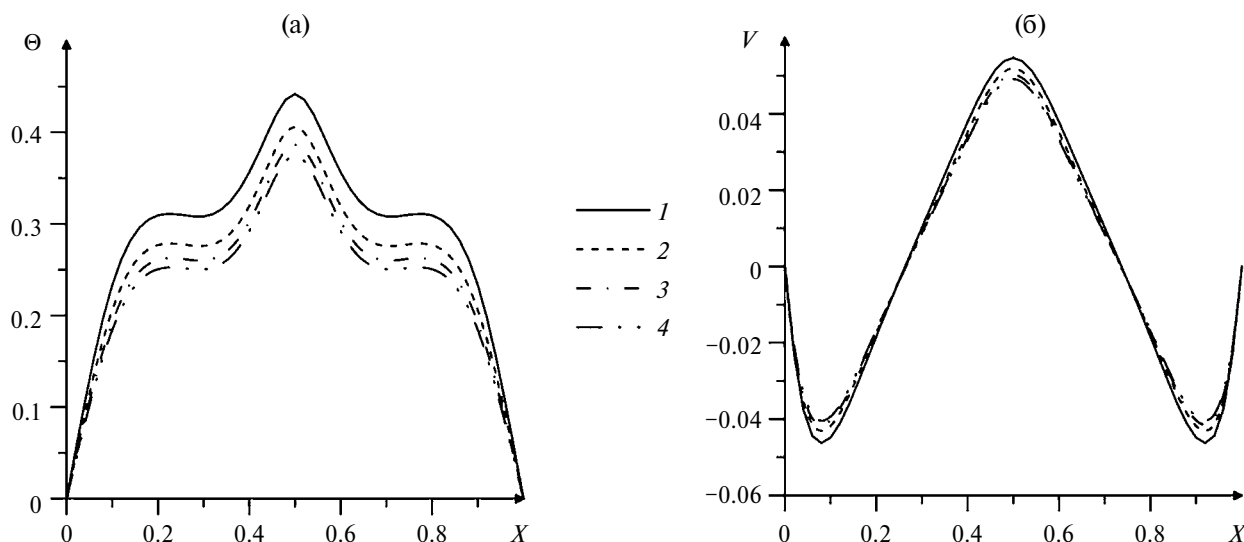


Рис. 4. Влияние сеточных параметров на профили температуры (а) и скорости (б) в горизонтальном сечении $Y = 0.5$: 1 – 100×100 , 2 – 200×200 , 3 – 300×300 , 4 – 400×300 .

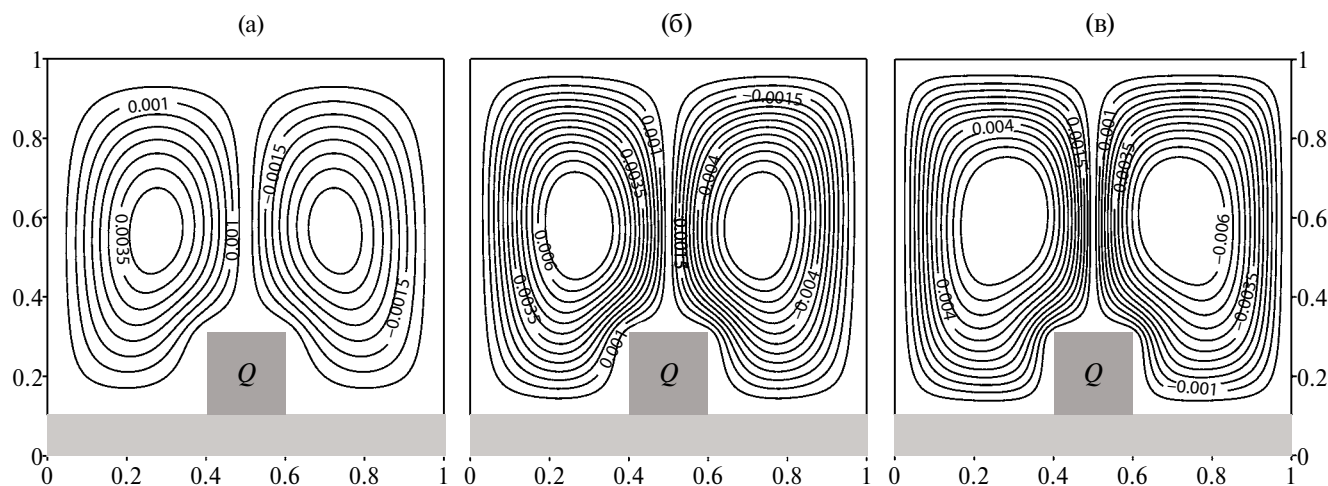


Рис. 5. Влияние числа Рэлея на изолинии функции тока Ψ при $\phi = 0.01$, $\delta_1 = 0.1$, $\delta_2 = 0.4$: (а) – $Ra = 10^3$, (б) – 10^4 , (в) – 10^5 .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В ходе исследования естественно-конвективного теплопереноса псевдопластичной наножидкостью в замкнутой полости с источником объемного тепловыделения и теплопроводной подложкой оценено влияние определяющих параметров, таких как число Рэлея, объемная доля наночастиц, толщина подложки и положение источника, на структуру течения, теплоперенос и интенсивность транспортных процессов. На следующих рисунках представлены результаты моделирования в зависимости от перечисленных параметров.

Влияние числа Рэлея на структуру течения псевдопластичной наножидкости в полости показано на рис. 5. Над источником образовалось

восходящее течение за счет нагрева жидкости, которое достигает верхней стенки, разделяется и ниспадает вдоль охлаждающих вертикальных границ. Таким образом, в полости сформировались две конвективные ячейки. Течение в правой ячейке происходит по часовой стрелке, а в левой – против. Отметим, что изменение Ra существенно не влияет на структуру течения – во всех случаях присутствуют две циркуляционные зоны. Однако можно заметить, что с ростом числа Рэлея плотность линий тока и размер ядер ячеек увеличиваются, что характеризует интенсификацию конвективного течения в полости. Также заметно изменение формы зон циркуляции жидкости внутри полости.

В ходе исследования оценено влияние объемной доли наночастиц на интегральные характеристики,

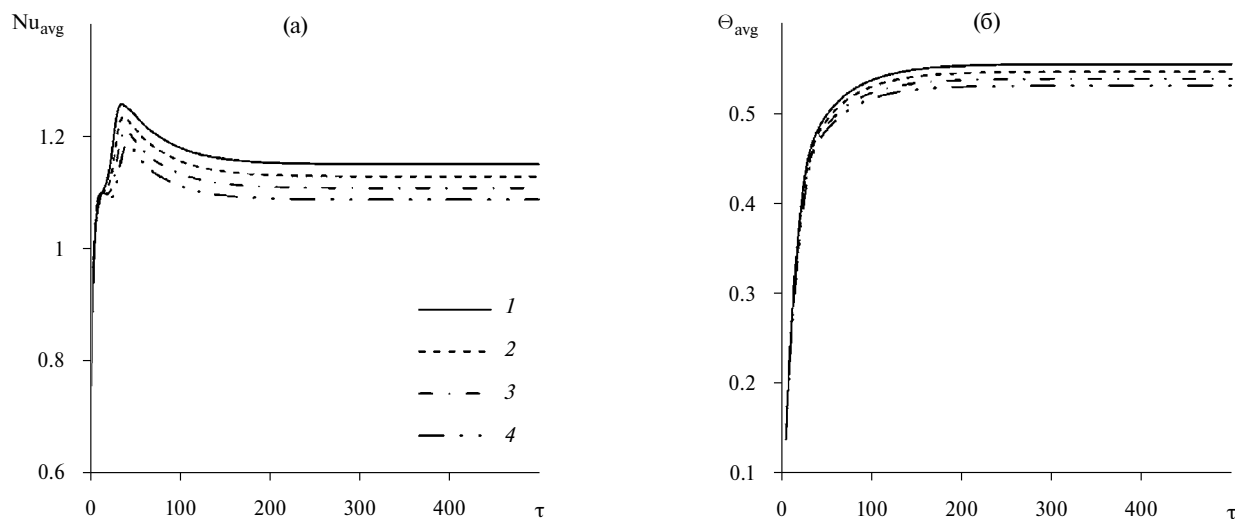


Рис. 6. Влияние объемной доли наночастиц на среднее число Нуссельта (а) и среднюю температуру (б) источника при $Ra = 10^5$, $\delta_1 = 0.1$, $\delta_2 = 0.4$: 1 – 0, 2 – 0.01, 3 – 0.02, 4 – 0.03.

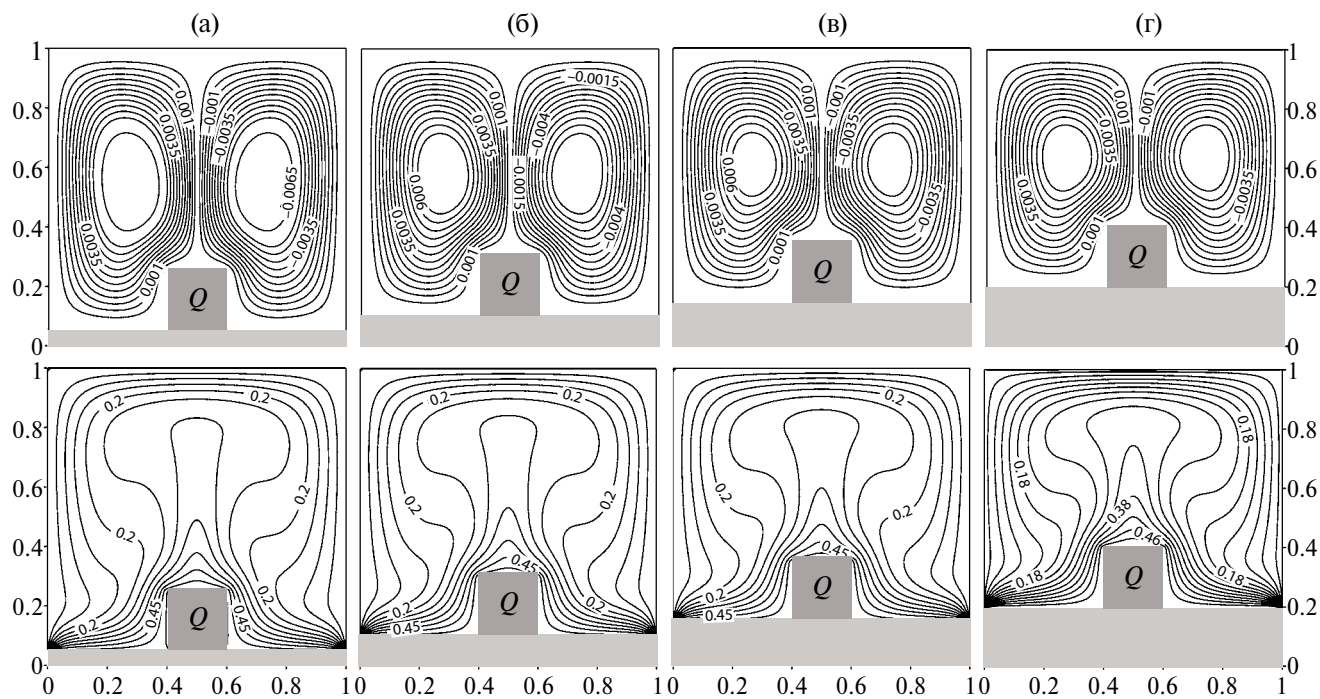


Рис. 7. Влияние толщины теплопроводной подложки на изолинии функции тока Ψ (верх) и температуры Θ (низ) при $Ra = 10^5$, $\phi = 0.01$, $\delta_2 = 0.4$: (а) – $\delta_1 = 0.05$, (б) – 0.1, (в) – 0.15, (г) – 0.2.

которые показаны на рис. 6. Среднее число Нуссельта вычислялось на поверхности источника энергии по следующей формуле:

$$Nu_{avg} = \frac{1}{0.6} \int_0^{0.6} \left(-\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} \frac{\partial \Theta}{\partial n} \right) d\zeta,$$

где ζ является естественной координатой вдоль поверхности источника. С увеличением ϕ значения

среднего числа Нуссельта уменьшаются, что означает ослабление конвективного теплообмена и преобладание кондуктивного механизма переноса тепла. За счет улучшенной теплопроводности базовой жидкости вследствие добавления наночастиц меди средняя температура в источнике снижается с ростом ϕ . Данный результат подтверждает эффективность использования наножидкостей с псевдопластичной базовой средой в системах пассивного охлаждения тепловыделяющих элементов.

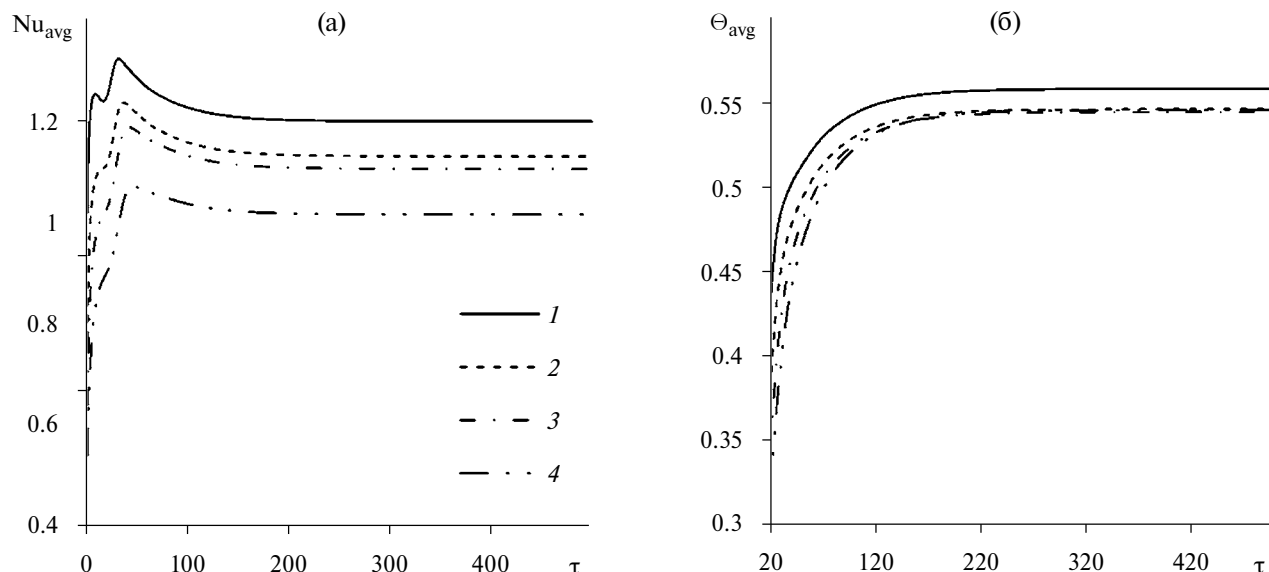


Рис. 8. Влияние толщины теплопроводной подложки на среднее число Нуссельта (а) и среднюю температуру (б) источника при $Ra = 10^5$, $\phi = 0.01$, $\delta_2 = 0.4$: 1 – $\delta_1 = 0.05$, 2 – 0.1, 3 – 0.15, 4 – 0.2.

Влияние толщины $\delta_1 = h/L$ теплопроводной медной подложки на распределение изолиний функции тока и температуры отражено на рис. 7. С изменением δ_1 структура течения не меняется, сохраняются две конвективные ячейки с противоположными направлениями циркуляции жидкости. Отметим только уменьшение размера циркуляционных зон с учетом уменьшения пространства, свободного для течения наножидкости. Изотермы также не имеют существенных изменений. С увеличением толщины подложки заметны более равномерный прогрев полости и незначительное расширение теплового факела, которое также связано с уменьшением свободного пространства.

На рис. 8 показано влияние толщины теплопроводной медной подложки на среднее число Нуссельта и среднюю температуру источника при $Ra = 10^5$, $\phi = 0.01$, $\delta_2 = 0.4$. Видно, что увеличение δ_1 приводит к ослаблению конвективного теплообмена в полости, заполненной наножидкостью. Интересный результат также показывают кривые средней температуры внутри источника энергии в случаях $\delta_1 = 0.1, 0.15, 0.2$, так как они практически совпадают после выхода на стационар. В то же время случай самой тонкой подложки соответствует самой высокой средней температуре источника.

Выполнены оценки влияния положения источника энергии на естественно-конвективный теплоперенос. На рис. 9 представлена зависимость распределения линий тока и изотерм от δ_2 . Стоит отметить, что поля распределяются симметрично относительно центрального положения источника. Видно, что структура течения

жидкости в полости терпит изменения. Так, например, в случаях $\delta_2 = 0.1$ и 0.7 в полости формируются две ячейки, из которых меньшим размером обладает ближайшая к охлаждающей стенке и расположенная прямо над источником. Восходящее течение также образуется над источником, но оно направлено не к верхней границе, а к центру полости.

В случаях $\delta_2 = 0.2$ и 0.6 существенно уменьшилась плотность линий тока, а также у меньшей конвективной ячейки внешняя линия тока изогнулась в пространство между левой стенкой полости и источником. Этот изгиб увеличился при $\delta_2 = 0.3$ и 0.5 , что привело к формированию симметрии при центральном расположении источника энергии. Изотермы на рис. 9 отражают сформированный тепловой факел, который направлен к центру полости, независимо от перемещения нагревателя вдоль нижней стенки полости. Сначала факел расширяется до случая центрального положения нагретого элемента, затем сужается. Это явление можно проследить по изотерме со значением 0.28 .

Рис. 10 отражает влияние положения нагревателя на среднее число Нуссельта и среднюю температуру в источнике энергии. Заметим, что кривые для $\delta_2 = 0.1$ и 0.7 , $\delta_2 = 0.2$ и 0.6 и $\delta_2 = 0.3$ и 0.5 наложились друг на друга, поэтому на рисунках приведены только случаи $\delta_2 = 0.1, 0.2, 0.3$ и 0.4 . В результате самые высокие значения Nu_{avg} достигаются при расположении источника вблизи боковых охлаждающих стенок, что говорит об интенсивном конвективном теплообмене. При $\delta_2 = 0.2$,

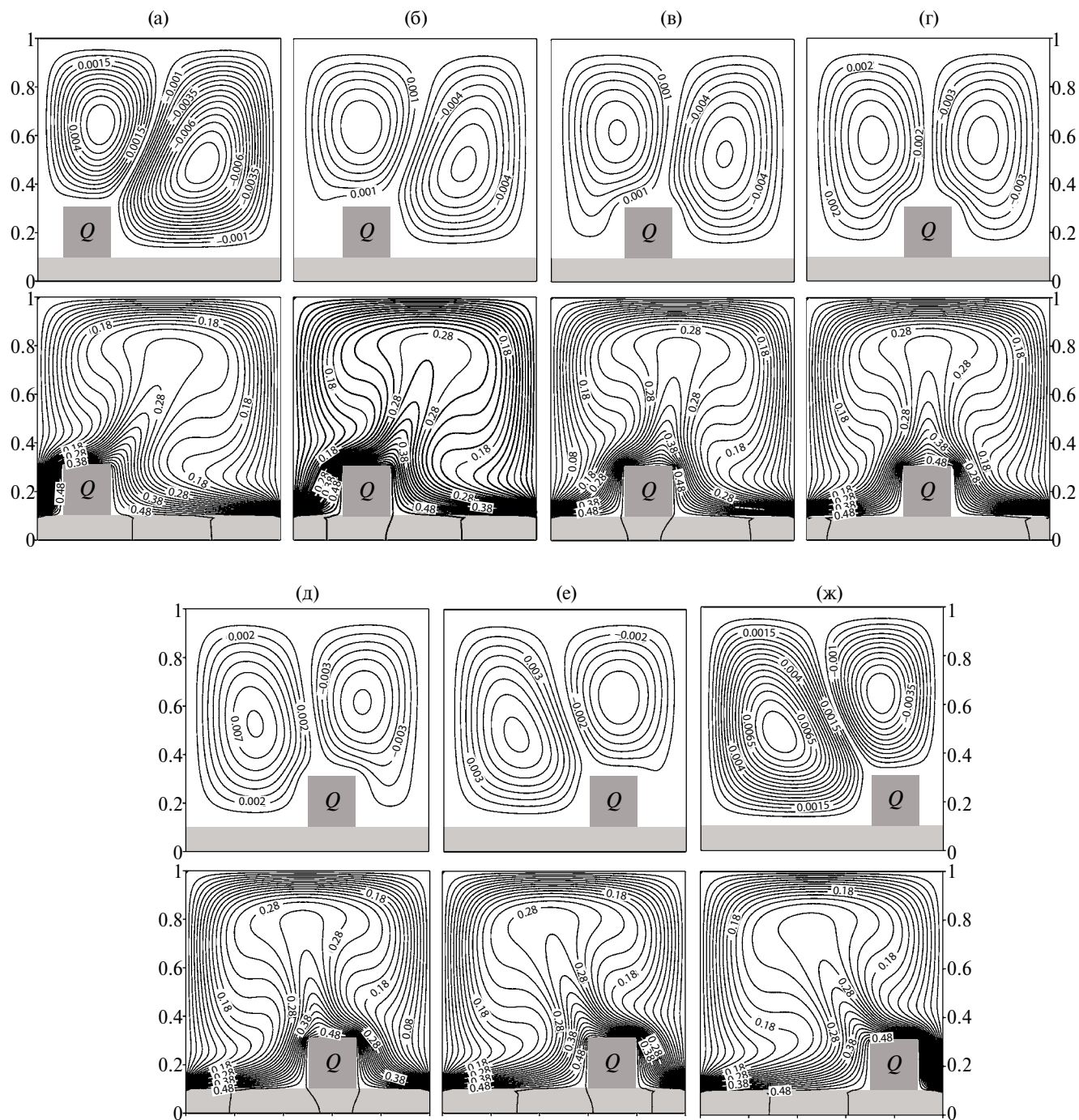


Рис. 9. Влияние положение источника энергии на изолинии функции тока Ψ (верх) и температуры Θ (низ) при $Ra = 10^5$, $\phi = 0.01$, $\delta_1 = 0.1$: (а) – $\delta_2 = 0.1$, (б) – 0.2 , (в) – 0.3 , (г) – 0.4 , (д) – 0.5 , (е) – 0.6 , (ж) – 0.7 .

0.6 и $\delta_2 = 0.3, 0.5$ кривые Nu_{avg} имеют меньшие значения. Случай центрального положения нагревателя соответствует самому слабому конвективному теплообмену в полости и самым низким значениям Nu_{avg} . В то же время средняя температура

источника не является самой высокой, как при $\delta_2 = 0.2, 0.6$ и $\delta_2 = 0.3, 0.5$. Меньшая средняя температура нагретого элемента достигается при $\delta_2 = 0.1$ и 0.7 , что также объясняется близостью охлаждающих вертикальных стенок.

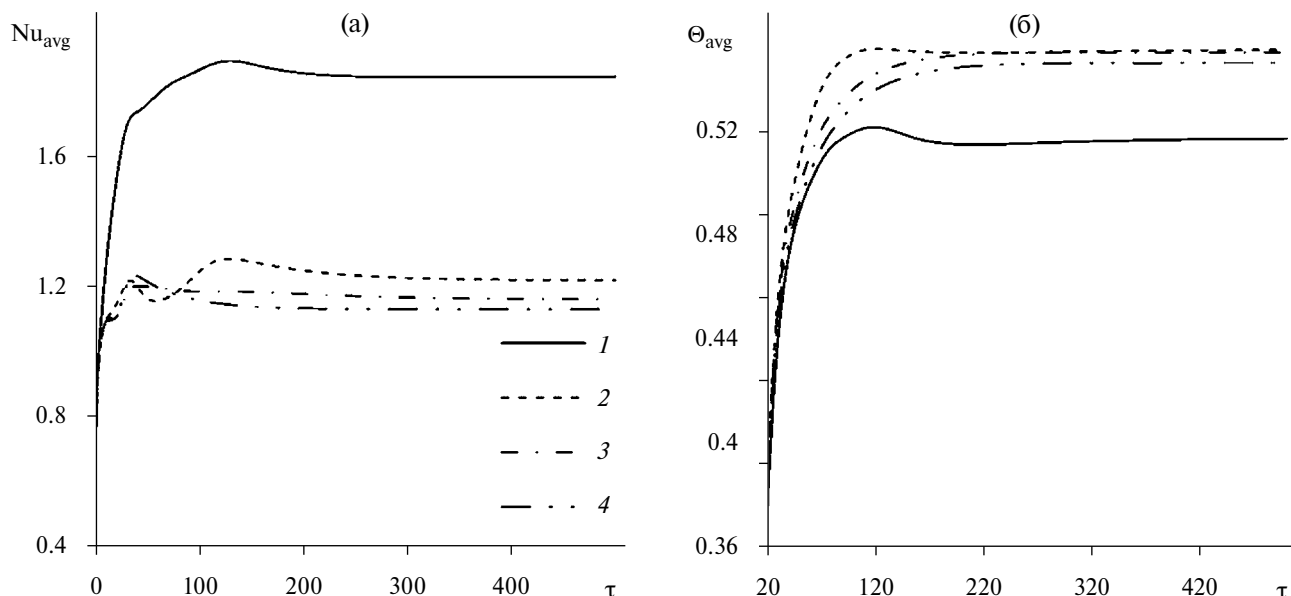


Рис. 10. Влияние положения источника энергии на среднее число Нуссельта (а) и среднюю температуру (б) источника при $Ra = 10^5$, $\phi = 0.01$, $\delta_1 = 0.1$: 1 – $\delta_2 = 0.1$, 2 – 0.2, 3 – 0.3, 4 – 0.4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние псевдопластичной наножидкости “карбоксилметилцеллюлоза–вода с наночастицами меди” на интенсивность теплоотвода от источника объемного тепловыделения в замкнутой квадратной полости при наличии теплопроводной подложки и охлаждающих стенок в условиях свободно-конвективного теплообмена. Проведена оценка влияния определяющих параметров: числа Рэлея $Ra = 10^4$ – 10^6 , объемной доли наночастиц $\phi = 0.0$ – 0.03 , толщины медной подложки $\delta_1 = 0.1$ – 0.2 , расположения источника энергии по отношению к левой вертикальной стенке $\delta_2 = 0.1$ – 0.7 на структуру течения и теплоперенос. Исследование проводилось с помощью анализа изолиний функции тока и температуры внутри полости, а также среднего числа Нуссельта на поверхности тепловыделяющего элемента и средней температуры внутри источника энергии.

В ходе анализа полученных результатов сделаны следующие выводы.

Увеличение числа Рэлея приводит к интенсификации конвективного теплообмена в полости.

Увеличение объемной доли наночастиц ослабляет конвективный теплообмен, но позволяет снизить среднюю температуру тепловыделяющего элемента.

Увеличение высоты подложки от 5 до 10% от размера полости приводит к снижению средней температуры источника энергии. При этом наибольшие изменения средней температуры имеют место на начальном временном этапе, а в стационарном режиме изменения δ_1 в диапазоне от 0.1

до 0.2 не проявляются в существенном снижении средней температуры.

Наиболее эффективное охлаждение нагретого элемента происходит, когда источник расположен максимально близко к охлаждающим стенкам. При этом увеличение δ_2 от 0.2 до 0.4 характеризует неравномерное изменение средней температуры источника энергии, что связано с наличием взаимодействия между тепловыми пограничными слоями, формирующимися вблизи изотермических вертикальных стенок, и тепловым факелом над источником энергии.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (“Приоритет-2030”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hu Y.-P., Wang F.-J., Zhang Y.-Ch., Li Y.-R., Li M.-H. Oscillatory Natural Convection of Al_2O_3 -Water Nanofluid near its Density Maximum in a Narrow Horizontal Annulus // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2020. V. 136. 106207.
2. Yousefzadeh Sh., Eskandari M., Montazerifar F., Akbari O.A., Kahbandeh F., Khalili M., Baghaei Sh. Natural Convection of Water/MWCNT Nanofluid Flow in an Enclosure for Investigation of the First and Second Laws of Thermodynamics // Alexandria Eng. J. 2022. V. 61. № 12. P. 11687.
3. Wu Y., Mansir I.B., Althobaiti A., Cao Y., Dahari M., Nguyen D.T., Mohamed A., Huynh Ph.H., Wae-hayee M. Employing Numerical Method for Evaluating the Heat Transfer Rate of a Hot Tube by

- Nanofluid Natural Convection // Case Studies in Thermal Engineering. 2020. V. 35. № 11. 102006.
4. *Tayebi T., Chamkha A.J.* Analysis of The Effects of Local Thermal Non-Equilibrium (LTNE) on Thermo-Natural Convection in an Elliptical Annular Space Separated by a Nanofluid-Saturated Porous Sleeve // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2021. V. 129. 105725.
 5. *Мебарек-Удина Ф., Бессау Р.* Численное моделирование естественного конвективного теплообмена в вертикально ориентированном цилиндрическом кольцевом канале с источниками тепла для наножидкости на основе воды с наночастицами меди // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 3. С. 351.
 6. *Dutta Sh., Pati S., Baranyi L.* Numerical Analysis of Magnetohydrodynamic Natural Convection in a Nanofluid Filled Quadrantal Enclosure // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. V. 28. 101507.
 7. *Khan N.H., Paswan M.K., Hassan M.A.* Natural Convection of Hybrid Nanofluid Heat Transport and Entropy Generation in Cavity by Using Lattice Boltzmann Method // J. Ind. Chem. Society. 2022. V. 99. № 3. 100344.
 8. *Rahman A., Redwan D.A., Thohura Sh., Kamrujjaman Md., Molla M.* Natural Convection and Entropy Generation of Non-newtonian Nanofluids with Different Angles of External Magnetic Field Using GPU Accelerated MRT-LBM // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. V. 30. 101769.
 9. *Reddy P.B.A., Salah T., Jakeer Sh., Mansour M.A., Rashad A.M.* Entropy Generation Due to Magneto-Natural Convection in a Square Enclosure with Heated Corners Saturated Porous Medium Using Cu/Water Nanofluid // Chin. J. Phys. 2022. V. 77. P. 1863.
 10. *Cao Y., Mansir I.B., Mouldi A., Gepreel Kh.A., Dahari M., Le T.H., Badran M.F., Nguyen V.N., Wae-Hayee M.* Using Natural Convection Mechanism of Nanofluid for Cooling an Embedded Hot Plate in Corner of a Square Enclosure: A Numerical Simulation // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. V. 33. 101926.
 11. *Nayak M.K., Karimi N., Chamkha A.J., Dogonchi A.S., El-Sapa Sh., Galal A.M.* Efficacy of Diverse Structures of Wavy Baffles on Heat Transfer Amplification of Double-Diffusive Natural Convection Inside a C-Shaped Enclosure Filled with Hybrid Nanofluid // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. V. 52. № B. 102180.
 12. *Abdulkadhim A., Hamzah H.K., Ali F.H., Yıldız Ç., Abed A.M., Abed E.M., Arici M.* Effect of Heat Generation and Heat Absorption on Natural Convection of Cu-Water Nanofluid in a Wavy Enclosure Under Magnetic Field // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2021. V. 120. 105024.
 13. *Geridonmez B.P., Oztop H.F.* The Effect of Inclined Periodic Magnetic Field on Natural Convection Flow of Al_2O_3 -Cu/Water Nanofluid Inside Right Isosceles Triangular Closed Spaces // Eng. Analysis Boundary Elements. 2022. V. 141. P. 222.
 14. *Raza A., Khan I., Farid S., My A., Khan A., Alotaibi H.* Non-singular Fractional Approach for Natural Convection Nanofluid with Damped Thermal Analysis and Radiation // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. V. 28. 101373.
 15. *Акбарзаде П., Фарди А.Х.* Теплоперенос при естественной конвекции в замкнутых двумерных и трехмерных камерах, заполненных наножидкостью // ПМИТФ. 2018. Т. 59. № 2. С. 121.
 16. *Ghozlani B., Hadj-Salah S., Bezj S., Souayah B.* Интенсификация теплообмена и характеристики потока наножидкости при обтекании усеченного конуса в неограниченной полости // ТВТ. 2023. Т. 61. № 2. С. 265.
 17. *Maleki H., Safaei M.R., Alrashed A.A., Kasaeian A.* Flow and Heat Transfer in Non-Newtonian Nanofluids Over Porous Surfaces // J. Thermal Analysis Calorimetry. 2019. V. 135. № 3. P. 1655.
 18. *Astanina M., Sheremet M., Mahabaleshwar U.S., Singh J.* Effect of Porous Medium and Copper Heat Sink on Cooling of Heat-Generating Element // Energies. 2020. V. 13. № 10. 2538.
 19. *Khezzar L., Siginer D., Vinogradov I.* Natural Convection of Power Law Fluids in Inclined Cavities // Int. J. Therm. Sci. 2012. V. 53. P. 8.
 20. *Guo S.S., Luo Z.Y., Tao W., Zhao J.F., Cen K.F.* Viscosity of Monodisperse Silica Nanofluids // Bull. Chin. Ceram. Soc. 2006. V. 25. № 5. P. 52.
 21. *Jang S.P., Choi S.U.S.* Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity // J. Heat Transfer. 2007. V. 129. № 5. P. 617.
 22. *Bercovier M., Engleman M.A.* A Finite-Element Method for Incompressible Non-Newtonian Flows // J. Comput. Phys. 1980. V. 36. № 3. P. 313.
 23. *Turan O., Sachdeva A., Poole R.J., Chakraborty N.* Laminar Natural Convection of Power-Law Fluids in a Square Enclosure with Differentially Heated Side Walls Subjected to Constant Temperatures // J. Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2011. V. 166. № 17–18. P. 1049.