

УДК 536.2

СМЕШАННАЯ КОНВЕКЦИЯ НАНОЖИДКОСТИ Al_2O_3 — ВОДА В КАВЕРНЕ С ДВИЖУЩЕЙСЯ КРЫШКОЙ И НАГРЕТЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

М. Хеммат Эсфе, М. Акбари, А. Каримипур

Филиал Исламского университета Азад в г. Наджаф Абад, Наджаф Абад, Иран
E-mails: M.hemmatesfe@gmail.com, M.akbari1983@gmail.com, arashkarimipour@gmail.com

Исследована задача о смешанном конвективном течении жидкости и теплообмене наножидкости Al_2O_3 — вода с теплопроводностью и эффективной вязкостью, зависящими от температуры и концентрации наночастиц, в каверне с движущейся крышкой и нагретым прямоугольным препятствием. Управляющие уравнения дискретизированы с помощью метода конечного объема, для связи полей скорости и давления применялся алгоритм Simple. С использованием разработанного кода изучено влияние числа Ричардсона, диаметра и объемной доли твердой фазы наночастиц Al_2O_3 на течение, тепловые поля и теплообмен в каверне. Показано, что во всем диапазоне значений объемной доли твердой фазы с увеличением числа Ричардсона и диаметра наночастиц среднее число Нуссельта уменьшается. Также установлено, что добавление в жидкость наночастиц Al_2O_3 приводит к значительному увеличению скорости теплообмена по сравнению со случаем чистой жидкости.

Ключевые слова: наножидкость, объемная доля твердой фазы, теплообмен, диаметр наночастиц.

Введение. Наножидкости создаются путем суспензирования наноразмерных частиц (менее 100 нм) в чистых жидкостях, таких как вода, этиленгликоль или пропиленгликоль. Термин “наножидкости” впервые предложен в работе [1]. Большая теплопроводность металлических наночастиц (например, меди, алюминия, серебра и титана) обуславливает увеличение теплопроводности смесей жидкостей с наночастицами металла, а следовательно, и скорости теплообмена [2]. В последнее время наножидкости используются в качестве жидких теплоносителей в различных нагревателях, теплообменниках, заводских и автомобильных системах охлаждения. Преимуществами применения наножидкостей являются улучшенный теплообмен, уменьшение геометрических размеров системы теплообмена, минимальное засорение микроканалов и т. д. [1].

Существует большое количество работ, посвященных изучению теплофизических свойств наножидкостей (эффективной динамической вязкости, теплопроводности и т. д.) и процесса переноса энергии в них (см., например, [3–6]). Также проведены теоретические, численные и экспериментальные исследования влияния наночастиц на теплоотдачу.

Течение чистой жидкости и теплообмен в каверне, заполненной этой жидкостью, обусловленные наличием силы плавучести, изучались во многих работах. Смешанная конвекция используется в различных отраслях промышленности (резервуары [7], ряд технологий пищевой промышленности, выращивание кристаллов [8], электронные устрой-

ства охлаждения, технологии сушки [9], солнечные коллекторы [10], производство флоат-стекла [11]).

Проведены исследования смешанной конвекции в камере с одной или двумя движущимися крышками для камерн различной формы, различных жидкостей и граничных условий [12–20].

В работе [21] изучена естественная конвекция в квадратной камере, заполненной наножидкостью Al_2O_3 — вода. Горизонтальные стенки камерны теплоизолированы, на левой и правой волнистых боковых стенках поддерживалась высокая и низкая постоянная температура. Показано, что при увеличении объемной доли наночастиц среднее число Нуссельта на нагретой стенке также увеличивается.

В [22] численно исследованы свободноконвективное течение наножидкости вода — медь и теплообмен в квадратной камере с кубическими телами в центре при условии адиабатичности их поверхностей. Показано, что в широком диапазоне чисел Рэлея с увеличением объемной доли наночастиц число Нуссельта увеличивается. Кроме того, при малых числах Рэлея с увеличением размера препятствия скорость теплообмена уменьшается, а при больших — увеличивается.

В работе [23] численно исследована смешанная конвекция наножидкости Al_2O_3 — вода в камере с движущейся нагретой нижней стенкой и холодными правой, левой и верхней стенками. В [24] проведен анализ влияния свойств наножидкости на смешанную конвекцию в прямоугольной камере.

Целью данной работы является исследование смешанноконвективного течения наножидкости Al_2O_3 — вода в квадратной камере с нагретым препятствием и верхней крышкой, равномерно движущейся в горизонтальной плоскости, а также изучение влияния числа Ричардсона, диаметра и объемной доли твердых наночастиц Al_2O_3 на течение, тепловые поля и теплообмен в камере.

1. Физическая и математическая модели течения. На рис. 1 показана двумерная квадратная камера с движущейся крышкой и нагретым препятствием. Высота и ширина квадратной камерны равны L . Камера заполнена водной суспензией наночастиц Al_2O_3 . Дно и вертикальные стенки теплоизолированы, на верхней движущейся стенке поддерживается низкая температура T_c . Для создания плавучести на нижней стенке камерны было размещено препятствие с температурой T_h , превышающей температуру жидкости.

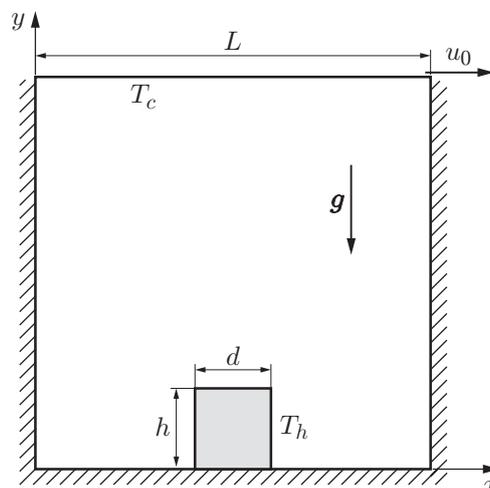


Рис. 1. Схема камерны

Таблица 1

Теплофизические характеристики воды и наночастиц при $T = 25^\circ\text{C}$

Компонент наножидкости	c_p , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	K , Вт/(м·К)	$\beta \cdot 10^{-5}$, К ⁻¹	$\mu \cdot 10^{-4}$, кг/(м·с)
Жидкая фаза (вода)	4179	997,1	0,6	21,00	8,9
Твердая фаза (Al ₂ O ₃)	765	3970,0	25,0	0,85	—

Предполагается, что наножидкость в камере является ньютоновской и несжимаемой, а течение — ламинарным, жидкая фаза и наночастицы находятся в состоянии теплового равновесия и движутся с одной и той же скоростью. Уравнение импульса записано в приближении Буссинеска. В табл. 1 приведены теплофизические характеристики наночастиц и воды при $T = 25^\circ\text{C}$ (c_p — теплоемкость; ρ — плотность; K — теплопроводность; β — коэффициент температурного расширения; μ — динамическая вязкость).

Теплопроводность и вязкость наножидкости зависят от объемной доли и температуры наночастиц. С учетом введенных выше предположений система управляющих уравнений имеет вид

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \\
 u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{nf} \nabla^2 u, \\
 u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_{nf} \nabla^2 v + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}} g \Delta T, \\
 u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} &= \alpha_{nf} \nabla^2 T,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где ρ_{nf} , ν_{nf} , α_{nf} — плотность, кинематическая вязкость и температуропроводность наножидкости соответственно.

Введем следующие безразмерные параметры:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad V = \frac{v}{u_0}, \quad U = \frac{u}{u_0}, \quad \Delta T = T_h - T_c, \quad \theta = \frac{T - T_c}{\Delta T}, \quad P = \frac{p}{\rho_{nf} u_0^2}.$$

При переходе к безразмерным переменным в качестве масштаба скорости используется скорость крышки u_0 . При этом критерии подобия имеют вид

$$\text{Re} = \frac{\rho_f u_0 L}{\mu_f}, \quad \text{Ri} = \frac{\text{Ra}}{\text{Pr Re}^2}, \quad \text{Ra} = \frac{g \beta_f \Delta T L^3}{\nu_f \alpha_f}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu_f}{\alpha_f}.$$

В безразмерной форме управляющие уравнения (1) записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} &= 0, \\
 U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} &= -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\nu_{nf}}{\nu_f} \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 U, \\
 U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} &= -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\nu_{nf}}{\nu_f} \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 V + \frac{\text{Ri}}{\text{Pr}} \frac{\beta_{nf}}{\beta_f} \Delta \theta, \\
 U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} &= \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \nabla^2 \theta.
 \end{aligned}$$

Граничные условия имеют вид:

- на левой стенке $\partial\theta/\partial X = 0, U = V = 0$;
- на правой стенке $\partial\theta/\partial X = 0, U = V = 0$;
- на нижней стенке $\partial\theta/\partial Y = 0, U = V = 0$;
- на верхней стенке $\theta = 0, U = 1, V = 0$;
- на стенках препятствия $\theta = 1, U = 0, V = 0$.

Температуропроводность и эффективная плотность наножидкости определяются по формулам

$$\alpha_{nf} = k_{nf}/(\rho c_p)_{nf}, \quad \rho_{nf} = \varphi\rho_s + (1 - \varphi)\rho_f,$$

где φ — объемная доля наночастиц в жидкости.

Выражения для теплоемкости $(\rho c_p)_{nf}$ и коэффициента теплового расширения $(\rho\beta)_{nf}$ наножидкости имеют вид

$$(\rho c_p)_{nf} = \varphi(\rho c_p)_s + (1 - \varphi)(\rho c_p)_f, \quad (\rho\beta)_{nf} = \varphi(\rho\beta)_s + (1 - \varphi)(\rho\beta)_f.$$

Эффективная вязкость наножидкости вычисляется по формуле

$$\mu_{eff} = \mu_f(1 + 2,5\varphi)[1 + \eta(d_p/L)^{-2\varepsilon}\varphi^{2/3}(\varepsilon + 1)],$$

где d_p — диаметр наночастиц. Данная модель была предложена в [25] для жидкости, содержащей суспензию небольших твердых сферических частиц. Эмпирические постоянные ε и η для Al_2O_3 равны 0,25 и 280 соответственно.

Предполагается, что вязкость основной жидкости (воды) зависит от температуры, поэтому для вычисления вязкости воды используется уравнение

$$\mu_{H_2O} = (1,2723T_{rc}^5 - 8,736T_{rc}^4 + 33,708T_{rc}^3 - 246,6T_{rc}^2 + 518,78T_{rc} + 1153,9) \cdot 10^6,$$

где $T_{rc} = \log(T - 273)$.

Эффективная теплопроводность наночастиц в покоящейся жидкости вычисляется по модели Гамильтона — Кроссера [26]:

$$\frac{k_{st}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)}.$$

Здесь k_s — теплопроводность диспергируемой наночастицы.

Полная безразмерная теплопроводность наножидкости равна

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_{st}}{k_f} + \frac{k_c}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)} + c \frac{Nu_p d_f (2 - D_f) D_f [(d_{max}/d_{min})^{1-D_f} - 1]^2}{Pr (1 - D_f)^2} \frac{1}{(d_{max}/d_{min})^{2-D_f} - 1} \frac{1}{d_p}.$$

Эта модель, предложенная в [27], используется в данной работе для определения теплопроводности наножидкостей. Здесь c — эмпирическая постоянная (например, для деионизированной воды $c = 85$, для этиленгликоля $c = 280$), не зависящая от наличия наночастиц; Nu_p — число Нуссельта для жидкости, обтекающей сферическую частицу (в данной работе для одиночной частицы $Nu_p = 2$). Диаметр молекулы жидкости (воды) равен $d_f = 4,5 \cdot 10^{-10}$ м. Фрактальная размерность D_f определяется по формуле

$$D_f = 2 - \ln(\varphi)/\ln(d_{p,min}/d_{p,max}),$$

где $d_{p,max}$, $d_{p,min}$ — максимальный и минимальный диаметры наночастиц соответственно:

$$d_{p,max} = d_p \frac{D_f - 1}{D_f} \left(\frac{d_{p,min}}{d_{p,max}} \right)^{-1}, \quad d_{p,min} = d_p \frac{D_f - 1}{D_f}.$$

Число Нуссельта, зависящее от ширины каверны, вычисляется по соотношению

$$Nu = h_{nf}L/k_f, \tag{2}$$

где

$$h_{nf} = \frac{q}{T_h - T_c}, \quad q = -k_{nf} \frac{T_h - T_c}{L} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=1}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в уравнение (2), получаем уравнение для числа Нуссельта

$$\text{Nu} = -\frac{k_{nf}}{k_f} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=1}. \quad (4)$$

Среднее число Нуссельта вычисляется путем интегрирования уравнения (4) вдоль верхней стенки.

2. Численный метод. Уравнения неразрывности, импульса и энергии вместе с граничными условиями были проинтегрированы численно методом конечного объема на связанной системе подвижных сеток. Для решения связанной системы управляющих уравнений использовался алгоритм Simple. Конвективные члены аппроксимировались гибридной схемой, что обеспечивало устойчивость решения. Диффузионные члены аппроксимировались центральными разностями второго порядка. Алгебраическая система, полученная в результате численной дискретизации, решалась с помощью метода TDMA.

Чтобы проверить независимость решения от количества узлов расчетной сетки, численный расчет проводился для нескольких размеров ячеек сетки. Получено среднее значение Nu на нагретой стенке препятствия при $d = 0,2L$, $\text{Ri} = 1$, $h = 0,1L$, $dp = 40$ нм, $T = 320$ К, $\varphi = 0,03$ для различного количества узлов сетки (рис. 2). На рис. 2 N — число узлов сетки по оси x . Видно, что при размере расчетной сетки 101×101 достигается необходимая точность, поэтому данная сетка использовалась во всех модельных расчетах, выполненных в настоящей работе.

Для проверки предлагаемой модели проведен анализ квадратной каверны, заполненной жидкостью с $\text{Pr} = 0,7$, при различных числах Рэлея Ra. В табл. 2 приведены результаты расчетов, выполненных с использованием предлагаемой модели, а также данные [28–30]. Из табл. 2 следует, что все результаты хорошо согласуются.

3. Результаты исследования и их обсуждение. Тепловая конвекция и характеристики течения в заполненной наножидкостью квадратной каверне с квадратным нагретым препятствием и движущейся крышкой исследовались путем численного моделирования с использованием метода конечного объема. Изучено также влияние на линии тока и изотермы таких параметров, как объемная доля твердой фазы наножидкости, диаметр наночастиц и число Ричардсона. На движущейся крышке каверны поддерживалась низкая

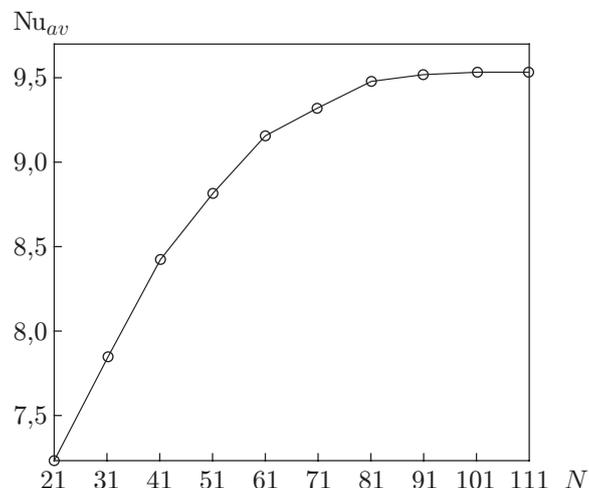


Рис. 2. Сеточная сходимость среднего числа Нуссельта

Таблица 2

Результаты расчета течения в каверне с использованием различных моделей

Модель	Ra	u_{\max}	Y	v_{\max}	X	Nu_{av}
Предлагаемая модель	10^4	16,052 00	0,817	19,528	0,110	2,215
Модель [28]		16,158 00	0,819	19,648	0,112	2,243
Модель [29]		16,143 90	0,822	19,665	0,110	2,195
Модель [30]		15,995 00	0,814	18,894	0,103	2,290
Предлагаемая модель	10^5	36,812 00	0,856	68,7910	0,062 00	4,517
Модель [28]		36,732 00	0,858	68,2880	0,063 00	4,511
Модель [29]		34,300 00	0,856	68,7646	0,059 35	4,450
Модель [30]		37,144 00	0,855	68,9100	0,061 00	4,964
Предлагаемая модель	10^6	66,445 00	0,873 00	221,748 00	0,039 80	8,795 000
Модель [28]		66,469 87	0,868 51	222,339 50	0,038 04	8,757 933
Модель [29]		65,586 60	0,839 00	219,736 10	0,042 37	8,803 000
Модель [30]		66,420 00	0,897 00	226,400 00	0,020 60	10,390 000

температура, в то время как другие стенки были теплоизолированы. Влияние плавучести, обусловленной перепадом температур и наличием силы сдвига, появляющейся при движении крышки, приводило к возникновению течения и теплообмена в каверне. Следует отметить, что в данной работе численное моделирование проводилось при переменном числе Ричардсона Ri и постоянном значении числа Грасгофа $Gr = 10^4$.

На рис. 3 показаны линии тока и изотермы при $T = 320$ К, $h = 0,2L$, $\varphi = 0,05$, $Ri = 1$, $d = 0,2L$ и различных значениях диаметра наночастиц, диспергированных в воде. В этом случае выше препятствия формируется основная (вихревая) ячейка, вращающаяся по часовой стрелке и занимающая значительную часть каверны. Также в пространстве между препятствием и левой стенкой формируется небольшой вихрь. Вблизи изотермических стенок изотермы сгущаются, в то время как в центральной области каверны наблюдается их разрежение.

С увеличением диаметра наночастиц значительного изменения характера течения в каверне не происходит, но завихренность в основной ячейке постепенно уменьшается. Увеличение диаметра наночастиц вызывает уменьшение степени сгущения изотерм вблизи нагретых стенок, что свидетельствует об уменьшении температурного градиента. Следовательно, при увеличении диаметра наночастиц скорость теплообмена в каверне незначительно уменьшается.

На рис. 4 показаны изотермы и линии тока при $d_p = 20$ нм, $Ri = 1$, $T = 320$ К, $h = 0,2L$, $d = 0,2L$ и различных значениях объемной доли твердой фазы наночастиц. Видно, что в каверне формируются основной вихрь, вращающийся по часовой стрелке, и небольшой периферийный вихрь. Результаты анализа линий тока позволяют сделать вывод, что увеличение объемной доли твердой фазы наночастиц приводит к уменьшению завихренности в основной ячейке, но не приводит к существенному изменению характера течения. Изотермы сгущаются вблизи нагретых стенок, но разрежены в центральной области каверны. Увеличение объемной доли твердой фазы наночастиц вызывает незначительное уменьшение степени сгущения изотерм вблизи неадиабатических поверхностей. Уменьшение градиента температуры с увеличением объемной доли твердой фазы наночастиц обусловлено увеличением теплопроводности наножидкости. Теплообмен в каверне не может быть описан с помощью изотерм, поскольку он зависит от градиента температуры и теплопроводности жидкости, в свою очередь зависящих от объемной доли твердой фазы. Поэтому скорость теплообмена должна определяться на основе диаграмм Нуссельта.

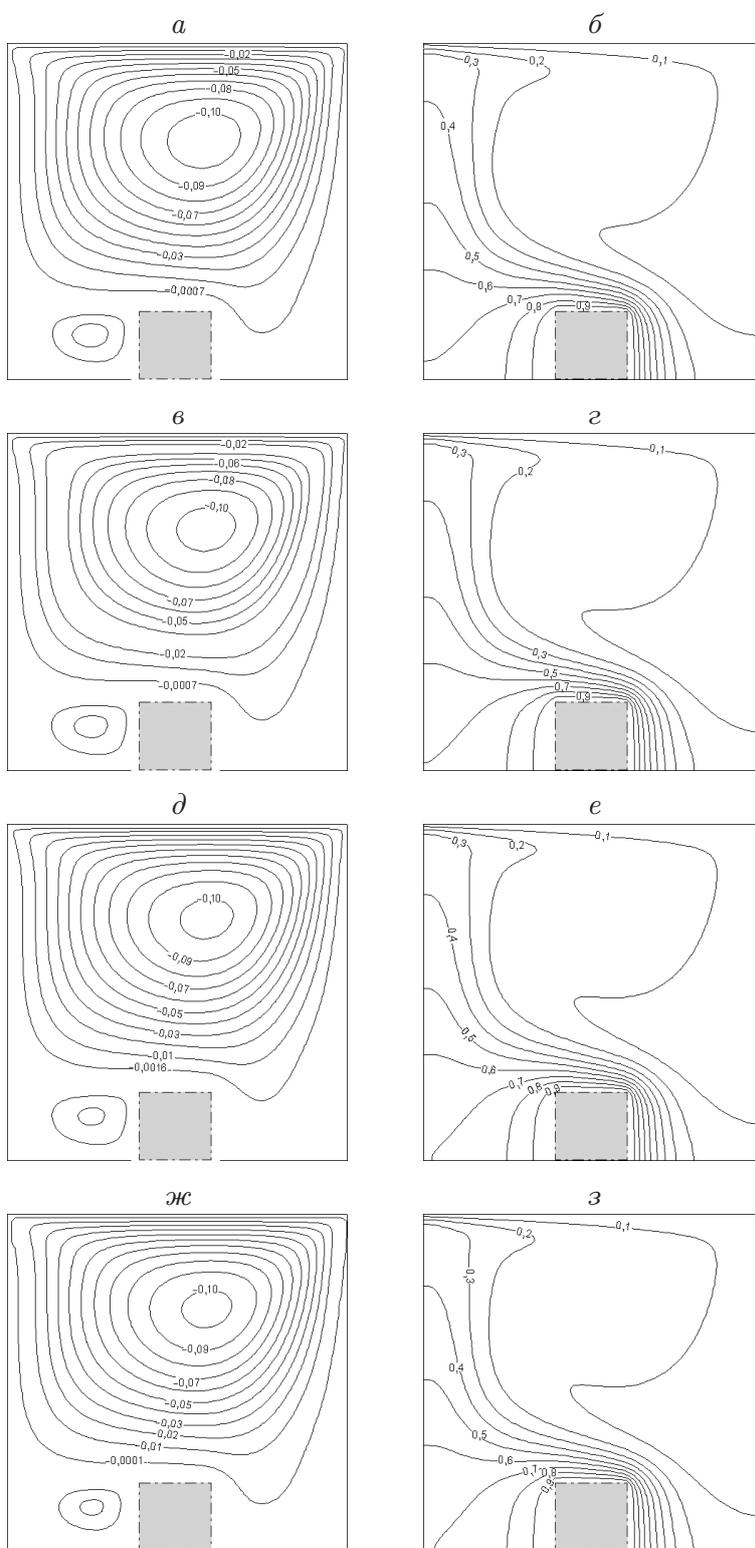


Рис. 3. Линии тока (*а, в, д, ж*) и изотермы (*б, г, е, з*) при $T = 320$ К, $h = 0,2L$, $\varphi = 0,05$, $Ri = 1$, $d = 0,2L$ и различных диаметрах наночастиц:
а, б — $d_p = 20$ нм, *в, г* — $d_p = 40$ нм, *д, е* — $d_p = 60$ нм, *ж, з* — $d_p = 80$ нм

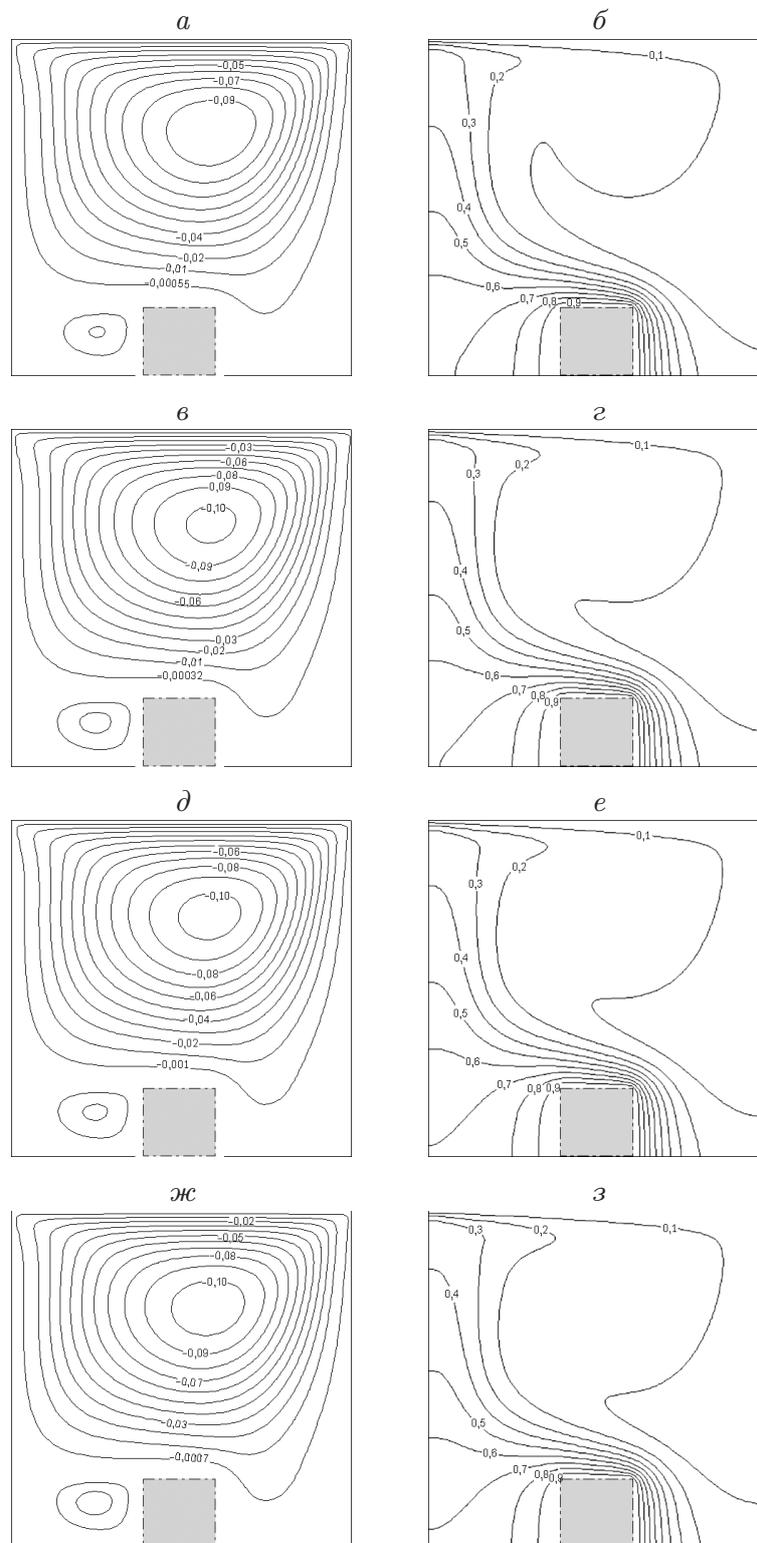


Рис. 4. Линии тока (*а, в, д, ж*) и изотермы (*б, г, е, з*) при $d_p = 20$ нм, $Ri = 1$, $T = 320$ К, $h = 0,2L$, $d = 0,2L$ и различных значениях объемной доли твердой фазы:

а, б — $\varphi = 0$, *в, г* — $\varphi = 0,01$, *д, е* — $\varphi = 0,03$, *ж, з* — $\varphi = 0,05$

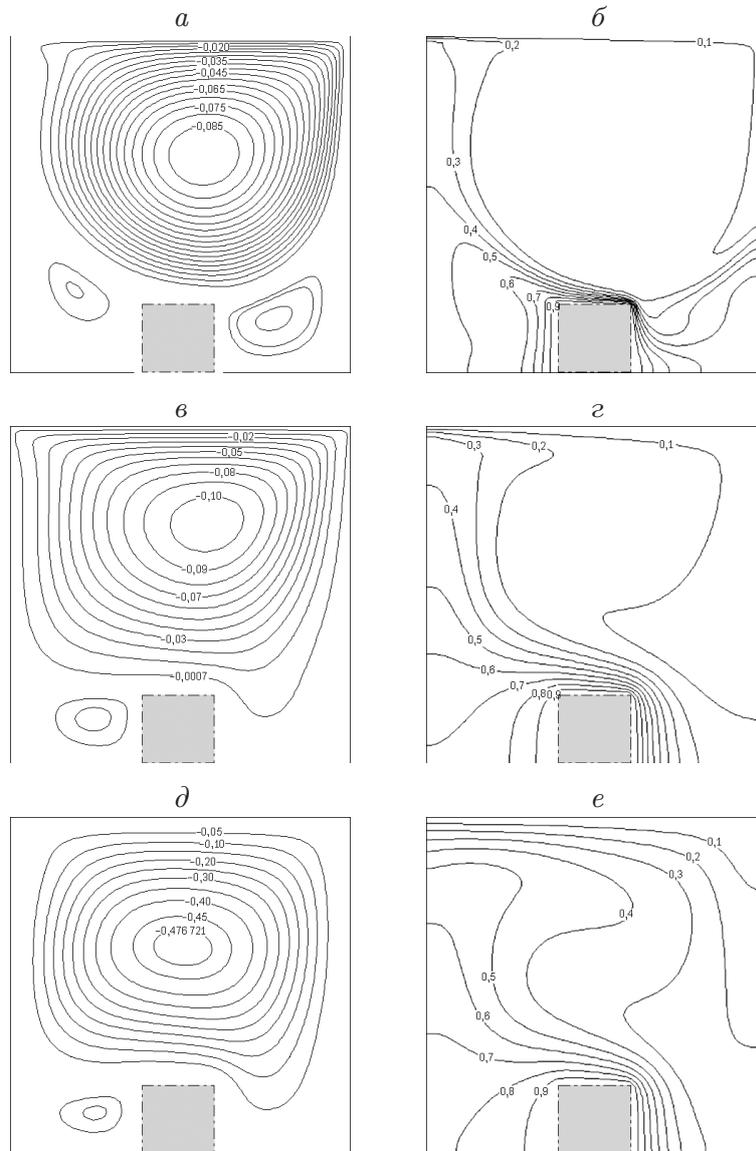


Рис. 5. Линии тока (*a*, *в*, *д*) и изотермы (*б*, *з*, *е*) при $d = 0,2L$, $d_p = 20$ нм, $h = 0,2L$, $\varphi = 0,05$, $T = 320$ К и различных значениях числа Ричардсона: *a*, *б* — $Ri = 0,01$, *в*, *з* — $Ri = 1$, *д*, *е* — $Ri = 100$

На рис. 5 показаны линии тока и изотермы при $d = 0,2L$, $d_p = 20$ нм, $h = 0,2L$, $\varphi = 0,05$, $T = 320$ К и различных значениях числа Ричардсона. При $Ri = 0,01$ основной вихрь формируется вследствие движения крышки, когда сила сдвига преобладает над силой плавучести. Кроме того, по обе стороны от нагретого препятствия формируются два небольших вихря. На рис. 5 видно, что вблизи движущейся крышки линии тока сгущаются, следовательно, скорость потока жидкости в этой области очень велика. При $Ri = 0,01$ наблюдается сгущение изотерм, а также формирование теплового пограничного слоя вблизи нагретых стенок. Большой градиент температуры свидетельствует о большой скорости теплопереноса в этой области каверны. При $Ri = 1$ возрастает влияние силы плавучести, поэтому центральная ячейка расширяется и занимает большую область в каверне. При этом уменьшаются степень сгущения изотерм вблизи нагретых стенок и градиент температуры. В этом случае скорость теплообмена существенно меньше, чем в случае $Ri = 0,01$.

При увеличении числа Ричардсона до значения $Ri = 100$ сила плавучести преобладает над силой сдвига, поэтому основная ячейка формируется в центре каверны. Из рис. 5 следует, что с увеличением числа Ричардсона основная ячейка отделяется от крышки и располагается в центральной области каверны. Это свидетельствует об уменьшении влияния движения крышки на ячейку. Характер изотерм также свидетельствует о существенном уменьшении температурного градиента по сравнению со случаями $Ri = 0,01; 1,00$. Следовательно, с увеличением числа Ричардсона скорость теплообмена в каверне уменьшается. Заметим, что во всех случаях, исследованных в данной работе, силы плавучести и сдвига действуют в одном направлении, усиливая действие друг друга.

На рис. 6 представлена зависимость среднего числа Нуссельта от числа Ричардсона при различных диаметрах наночастиц. Видно, что с уменьшением диаметра наночастиц скорость теплообмена увеличивается. Увеличение числа Нуссельта при увеличении диаметра наночастиц в диапазоне $20 \div 30$ нм составляет приблизительно 11,4 %.

На рис. 7 показана зависимость числа Нуссельта от числа Ричардсона при различных значениях объемной доли твердой фазы. Видно, что с увеличением объемной доли твердой фазы наночастиц число Нуссельта и соответственно скорость теплообмена в каверне увеличиваются. При этом с увеличением числа Ричардсона скорость теплообмена увеличивается более существенно.

Заключение. В работе численно исследовано влияние свойств наножидкости Al_2O_3 — вода на смешанноконвективный теплообмен и течение жидкости в двумерных квадратных кавернах с движущейся крышкой и нагретым препятствием на нижней стенке. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Во всех рассмотренных диапазонах чисел Ричардсона и объемных долей наночастиц наножидкость опускается вдоль правой стенки, движется горизонтально выше препят-

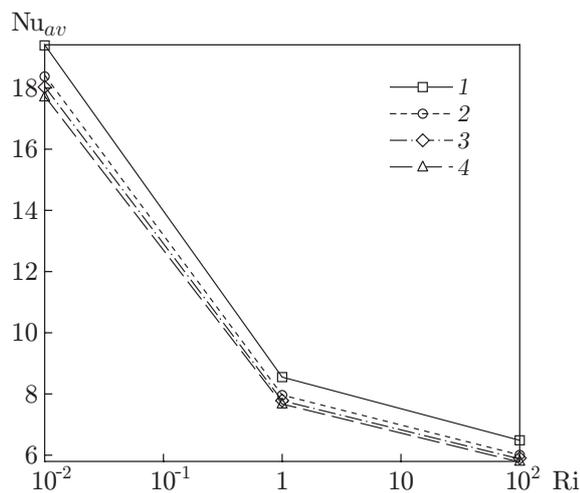


Рис. 6

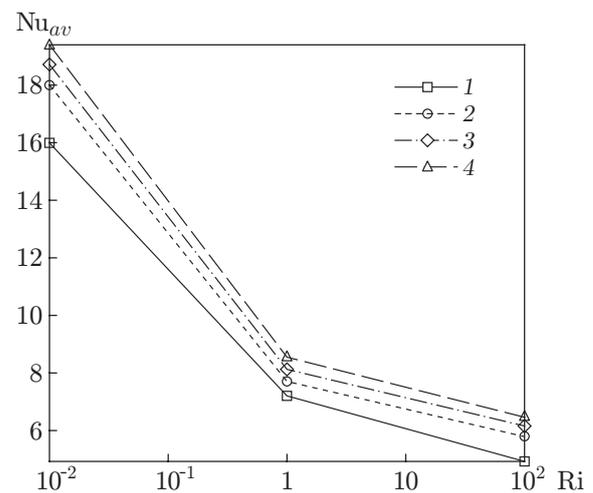


Рис. 7

Рис. 6. Зависимость числа Нуссельта от числа Ричардсона при $\varphi = 0,05$, $T = 320$ К, $h = 0,2L$ и различных диаметрах наночастиц:

1 — $d_p = 20$ нм, 2 — $d_p = 40$ нм, 3 — $d_p = 60$ нм, 4 — $d_p = 80$ нм

Рис. 7. Зависимость числа Нуссельта от числа Ричардсона при $d_p = 20$ нм, $h = 0,2L$, $T = 320$ К и различных значениях объемной доли твердой фазы наножидкости:

1 — $\varphi = 0$, 2 — $\varphi = 0,01$, 3 — $\varphi = 0,03$, 4 — $\varphi = 0,05$

ствия к левому углу каверны, а затем перемещается вверх, формируя вихрь. С увеличением числа Ричардсона размеры вихревой ячейки, вращающейся по часовой стрелке, увеличиваются вследствие влияния нагретого препятствия.

При постоянных числе Ричардсона и объемной доле твердой фазы и увеличении диаметра наночастиц от 20 до 80 нм характер течения и форма изотерм в каверне меняются незначительно.

С увеличением числа Ричардсона среднее число Нуссельта уменьшается.

Добавление в жидкость наночастиц Al_2O_3 приводит к существенному увеличению скорости теплообмена по сравнению со случаем чистой жидкости.

При всех рассмотренных значениях числа Ричардсона с увеличением среднего диаметра наночастиц скорость течения, а следовательно, и скорость теплообмена уменьшаются.

Авторы выражают благодарность С. Сайдодину, Х. Хаджмохаммаду и С. Х. Растаману за полезные обсуждения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Choi S. U. S.** Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles // *Developments and applications of non-Newtonian flows* / Ed. by D. A. Siginer, H. P. Wang. N. Y.: ASME, 1995. FED-V. 231/MD-V. 66. P. 99–105.
2. **Xuan Y., Li Q.** Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids // *J. Heat Transfer*. 2003. V. 125. P. 151–155.
3. **Lee S., Choi S. U. S., Li S., Eastman J. A.** Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2001. V. 121. P. 280–289.
4. **Xie H. Q., Wang J. C., Xi T. G., et al.** Dependence of the thermal conductivity of nanoparticle — fluid mixture on the base fluid // *J. Mater. Sci. Lett.* 2002. V. 21. P. 1469–1471.
5. **Patel H. E., Pradeep T., Sundararajan T., et al.** A micro convection model for thermal conductivity of nanofluid // *Pramana-J. Phys.* 2005. V. 65. P. 863–869.
6. **Chang H., Jwo C. S., Lo C. H., et al.** Rheology of CuO nanoparticle suspension prepared by ASNSS // *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2005. V. 10. P. 128–132.
7. **Imberger J., Hamblin P. F.** Dynamics of lakes, reservoirs, and cooling ponds // *Annual Rev. Fluid Mech.* 1982. V. 14. P. 153–187.
8. **Moallemi M. K., Jang K. S.** Prandtl number effects on laminar mixed convection heat transfer in a lid-driven cavity // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 1992. V. 35. P. 1881–1892.
9. **Cha C. K., Jaluria Y.** Recirculating mixed convection flow for energy extraction // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 1984. V. 27. P. 1801–1810.
10. **Ideriah F. J. K.** Prediction of turbulent cavity flow driven by buoyancy and shear // *J. Mech. Engng Sci.* 1980. V. 22. P. 287–295.
11. **Pilkington L. A. B.** Review lecture: the float glass process // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A.* 1969. V. 314. P. 1–25.
12. **Talebi F., Mahmoudi A. H., Shahi M.** Numerical study of mixed convection flows in a square lid-driven cavity utilizing nanofluid // *Intern. Comm. Heat Mass*. 2010. V. 37. P. 79–90.
13. **Abu-Nada E., Chamkha A. J.** Mixed convection flow in a lid driven square enclosure filled with a nanofluid // *Eur. J. Mech. B. Fluid*. 2010. V. 29. P. 472–482.
14. **Mahmoodi M.** Mixed convection inside nanofluid filled rectangular enclosures with moving bottom wall // *Thermal Sci.* 2011. V. 15. P. 889–903.
15. **Arefmanesh A., Mahmoodi M.** Effects of uncertainties of viscosity models for Al_2O_3 — water nanofluid on mixed convection numerical simulations // *Intern. J. Thermal Sci.* 2011. V. 50. P. 1706–1719.

16. **Hemmat Esfe M., Ghadak F., Haghiri A., Mirtalebi S.** Numerical study of mixed convection flows in a two-sided inclined lid-driven cavity utilizing nano-fluid with various inclination angles and ununiformed temperature // *Aerospace Mech. J.* 2012. V. 8, N 2. P. 69–83.
17. **Fereidoon A., Saedodin S., Hemmat Esfe M., Noroozi M. J.** Evaluation of mixed convection in inclined square lid driven cavity filled with Al_2O_3 /water nanofluid // *Engng Appl. Comput. Fluid Mech.* 2013. V. 7. P. 55–65.
18. **Zarei H., Rostamian S. H., Hemmat Esfe M.** Heat transfer behavior of mixed convection flow in lid driven cavity containing hot obstacle subjected to nanofluid with variable properties // *J. Basic. Appl. Sci. Res.* 2013. V. 3. P. 713–721.
19. **Ghadi A. Z., Noroozi M. J., Hemmat Esfe M.** Nanofluid implementation for heat transfer augmentation of magneto hydrodynamic flows in a lid-driven cavity using experimental-based correlations // *Intern. J. Appl. Electromagnetics Mech.* 2013. V. 42, N 4. P. 589–602.
20. **Heidari M. R., Hemmat Esfe M., Hajmohammad H., Akbari M.** Mixed convection heat transfer in a double lid-driven inclined square enclosure subjected to Cu — water nanofluid with partiracle diameter of 90 nm // *Heat Transfer Res.* 2014. V. 45, iss. 1. P. 75–95.
21. **Nikfar M., Mahmoodi M.** Meshless local Petrov — Galerkin analysis of free convection of nanofluid in a cavity with wavy side walls // *Engng Anal. Boundary Elements.* 2012. V. 36. P. 433–445.
22. **Mahmoodi M., Mazrouei Sebdani S.** Natural convection in a square cavity containing a nanofluid and an adiabatic square block at the center // *Superlattices Microstruct.* 2012. V. 52. P. 261–275.
23. **Mahmoodi M.** Mixed convection inside nanofluid filled rectangular enclosures with moving bottom wall // *Thermal Sci.* 2011. V. 15, N 3. P. 889–903.
24. **Mazrouei Sebdani S., Mahmoodi M., Hashemi S. M.** Effect of nanofluid variable properties on mixed convection in a square cavity // *Intern. J. Thermal Sci.* 2012. V. 52. P. 112–126.
25. **Jang S. P., Lee J. H., Hwang K. S., Choi S. U. S.** Particle concentration and tube size dependence of viscosities of Al_2O_3 — water nanofluids flowing through micro- and minitubes // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. P. 24–31.
26. **Hamilton R. L., Crosser O. K.** Thermal conductivity of heterogeneous two component systems // *Indust. Engng Chem. Fundam.* 1962. V. 1. P. 187–191.
27. **Xu J., Yu B., Zou M., Xu P.** A new model for heat conduction of nanofluids based on fractal distributions of nanoparticles // *J. Phys. D.* 2006. V. 39. P. 4486–4490.
28. **Lin K. C., Violi A.** Natural convection heat transfer of nanofluids in a vertical cavity: Effects of non-uniform particle diameter and temperature on thermal conductivity // *Intern. J. Heat Fluid Flow.* 2010. V. 31. P. 236–245.
29. **Tiwari R. K., Das M. K.** Heat transfer augmentation in a two-sided lid-driven differentially heated square cavity utilizing nanofluids // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2007. V. 50. P. 2002–2018.
30. **Hadjisophocleous G. V., Sousaand A. C. M., Venart J. E. S.** Predicting the transient natural convection in enclosures of arbitrary geometry using a nonorthogonal numerical model // *Numer. Heat Transfer. A.* 1998. V. 13. P. 373–392.

*Поступила в редакцию 24/XII 2012 г.,
в окончательном варианте — 31/VIII 2013 г.*