УДК 536.24

Производство энтропии при смешанной конвекции наножидкости в квадратной полости

И. Зегбид, Р. Бессаи

Университет братьев Ментури, Константина, Алжир

E-mail: leap.mechanical@gmail.com

Выполнено численное моделирование производства энтропии при двумерной смешанной конвекции наножидкостей на основе воды и Cu, Ag, Al₂O₃ и TiO₂ в квадратной полости с подвижной верхней стенкой и двумя источниками тепла. На верхней крышке и нижней стенке полости поддерживалась низкая температура $T_{\rm C}$. Определяющие уравнения с граничными условиями решались методом конечных объемов. Сравнение с предыдущими результатами показало хорошее согласование. В работе исследуется влияние объемной доли твердой фазы ($0 \le \phi \le 0.10$), чисел Рэлея ($10^3 \le \text{Ra} \le 10^5$) и Рейнольдса ($1 \le \text{Re} \le 500$) и разных видов наножидкости на общую энтропию S_t и производство энтропии за счет теплообмена S_h , а также влияние положения источников тепла на производство общей энтропии и число Бежана. Установлено, что S_t и S_h уменьшается с увеличением ϕ , Ra, и Re.

Ключевые слова: смешанная конвекция, наножидкости, квадратная полость, производство энтропии.

Введение

Наножидкости — это взвеси наноразмерных частиц (наночастиц), диспергированных в базовой жидкости для улучшения определенных свойств. При теплопереносе важную роль играет теплопроводность. Наиболее широко используемые жидкости, такие как вода, масло и этиленгликоль (ЭГ), имеют низкую теплопроводность по сравнению с кристаллическими веществами, поэтому с целью повышения эффективной теплопроводности в базовую жидкость добавляются наночастицы [1]. В работах о производстве энтропии (см., например, [2]) изучалась смешанная конвекция наножидкости Си-вода в квадратной полости. Авторы работы [3] численно исследовали производство энтропии при смешанной магнитогидродинамической (МГД) конвекции течения наножидкости в вертикальном канале. Было установлено, что магнитное поле увеличивает число Нуссельта и уменьшает производство энтропии. В работе [4] изучались смешанная МГД-конвекция и производство энтропии в наножидкости в вертикальном пористом канале. Было обнаружено улучшение в производстве энтропии за счет пористой среды, наножидкости и магнитного поля. Авторами работы [5] было проанализировано влияние магнитного поля

© Зегбид И., Бессаи Р., 2018

Зегбид И., Бессаи Р.

на производство энтропии в трехмерном микроканале. Результаты показали, что увеличение напряженности магнитного поля уменьшает производство энтропии. В работе [6] численно исследовались смешанная конвекция и производство энтропии в наножидкости Си-вода в дифференциально нагретой асимметричной камере. Было обнаружено, что интенсивность теплопередачи увеличивается за счет добавления наночастиц. Авторы [7] показали, что поля течения, распределения температуры и степени необратимости в производстве энтропии в значительной степени зависят от угла наклона. В работе [8] было обнаружено, что максимальное производство энтропии имеет место в чистой жидкости при низких числах Рейнольдса и Рэлея, а в [9] было показано, что наличие препятствий внутри полости, наполненной наножидкостью, ухудшает процесс теплопередачи. В работе [10] было обнаружено, что увеличение объемной доли наножидкости улучшает производство энтропии за счет теплообмена и трения жидкости. Авторы [11] моделировали смешанную конвекцию и производство энтропии в квадратной камере. Они обнаружили, что минимальное производство энтропии и значительное тепловое перемешивание при разумной интенсивности теплообмена получаются, когда левая стенка движется вдоль вертикальной оси. Авторы [12] установили, что добавление наночастиц значительно увеличивает теплообмен. Анализ производства энтропии показал, что для низких значений Re производство энтропии за счет необратимости теплообмена является доминирующим. В работе [13] изучалась естественная конвекция в квадратной камере, синусоидально нагретой и наполненной наножидкостью вода-Al₂O₃ в присутствии магнитного поля. Результаты показали, что добавление наночастиц уменьшает производство энтропии. В работе [14] было проведено численное исследование смешанной конвекции в квадратной полости, заполненной наножидкостью. Результаты показали, что при нахождении источника тепла в ее середине эффект добавления наночастиц увеличивается с ростом числа Рейнольдса. Авторами [15] было продемонстрировано термическое поведение наножидкости (SiO₂-вода) для различных углов наклона двухсторонней полости с подвижной верхней стенкой с использованием модели двухфазной смеси. Авторы [16] численно моделировали смешанную конвекцию в горизонтальных и наклонных трубах с равномерным тепловым потоком наножидкости. Результаты показали, что коэффициент теплоотдачи является максимальным, когда угол наклона равен 45°. В работе [17, 18] изучалось влияние таких параметров, как число Рэлея, объемная доля твердой фазы наночастиц, а также влияние расположения источников тепла на течение жидкости с различными наночастицами (Cu, Ag, Al₂O₃ и TiO₂) с естественной конвекцией в частично нагретой полости. Было обнаружено, что увеличение теплоотдачи возрастает с увеличением числа Рэлея и концентрацией наночастиц. В работе [19] рассматривался синусоидальный нагрев стенки полости, заполненной наножидкостью.

Авторы работы [20] показали, что наночастицы оказывают существенное влияние на течение и температурные поля. В работе [21] были представлены результаты численного исследования смешанной конвекции в полости, заполненной наножидкостью. Было показано, что теплоотдача увеличивается с увеличением числа Рэлея и длины источника тепла. Авторами [22] проводилось численное исследование производства энтропии при возникновении естественной конвекции. Было обнаружено, что общее производство энтропии имеет максимальное значение в начале переходного режима. Кроме того, число Бежана в переходном состоянии имеет минимальное значение. В работе [23] изучался ламинарный режим смешанной конвекции в различных полостях, заполненных наножидкостью Сu-вода. Было установлено, что число Нуссельта возрастает с увеличением числа Рэлея, объемной доли твердой фазы и соотношения сторон полости.

Целью представленной работы является исследование ламинарного режима смешанной конвекции и производства энтропии в наножидкости в квадратной полости с двумя источниками тепла. В работе также изучается влияние объемной доли твердой фазы, чисел Рэлея и Рейнольдса и разных наножидкостей на общее производство энтропии и производство энтропии за счет теплообмена. Кроме того, исследуется влияние положения двух источников тепла и объемной доли твердой фазы на число Бежана.

Геометрические условия и определяющие уравнения

Рассматриваемые в настоящем исследовании полости изображены на рис. 1. Два источника тепла длиной b расположены на вертикальных стенках квадратной полости длиной L, наполненной наножидкостью. На верхней крышке и нижней стенке поддерживается низкая температура $T_{\rm C}$, а вертикальные стенки, соответственно, являются адиабатическими. Верхняя крышка движется с равномерной скоростью U_0 . Наножидкости считаются ньютоновскими, несжимаемыми и ламинарными. Наночастицы имеют однородные форму и размер и находятся в тепловом равновесии с базовой жидкостью. Тепловые свойства воды и наночастиц (Cu, Ag, Al₂O₃, TiO₂) представлены в таблице.

Определяющие уравнения для установившейся двумерной смешанной конвекции с вышеуказанными допущениями имеют следующий вид:

— уравнение сохранения массы (неразрывности):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \tag{1}$$

уравнения сохранения импульса:

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{\rm nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{\rm nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right],\tag{2}$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{\rm nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{\rm nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right] + \left(\rho\beta\right)_{\rm nf} g\left(T - T_{\rm C}\right),\tag{3}$$



Рис. 1. Две рассматриваемые полости и граничные условия. *а* — вариант 1, *b* — вариант 2.

Таблица

 ρ , кг·м⁻³ β, K^{-1} $C_{\rm p}$, Дж·кг⁻¹·K⁻¹ Вещество $K, BT \cdot M^{-1} \cdot K^{-1}$ Вода без примесей 997,1 0,613 4179 $21 \cdot 10^{-5}$ Серебро (Ад) 10,500 429 235 1,89.10 Медь (Си) 8933 401 385 1,67.10 3970 Оксид алюминия (Al₂O₃) 3970 $0,85 \cdot 10^{-5}$ 40 Оксид титана (TiO₂) 4250 8,9538 686,2 $0,9.10^{-5}$

Теплофизические свойства воды и наночастиц

уравнение сохранения энергии:

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{\rm nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),\tag{4}$$

где эффективная плотность наножидкости $ho_{
m nf}$ может быть выражена как

$$\rho_{\rm nf} = (1 - \phi) \rho_{\rm f} + \phi \rho_{\rm p}. \tag{5}$$

Коэффициент температуропроводности наножидкости α_{nf} может быть получен следующим образом:

$$\alpha_{\rm nf} = k_{\rm nf} / \left(\rho C_{\rm p}\right)_{\rm nf}.$$
(6)

Теплоемкость жидкости может быть определена как

$$\left(\rho C_{\rm p}\right)_{\rm nf} = (1-\phi)\left(\rho C_{\rm p}\right)_{\rm f} + \phi\left(\rho C_{\rm p}\right)_{\rm p}.$$
(7)

Коэффициент теплового расширения наножидкости имеет вид

$$\left(\rho\beta\right)_{\rm nf} = (1-\phi)\left(\rho\beta\right)_{\rm f} + \phi\left(\rho\beta\right)_{\rm p}.$$
(8)

Динамическая вязкость наножидкости на основе соотношения Бринкмана [24] определяется как

$$\mu_{\rm nf} = \mu_{\rm f} / (1 - \phi)^{2,5} \,. \tag{9}$$

Теплопроводность наножидкости k_{nf} принята такой же, как в других исследованиях (см., например, [20]):

$$k_{\rm nf} = k_{\rm f} \left(\frac{\left(k_{\rm p} + 2k_{\rm f}\right) - 2\phi\left(k_{\rm f} - k_{\rm p}\right)}{\left(k_{\rm p} + 2k_{\rm f}\right) + \phi\left(k_{\rm f} - k_{\rm p}\right)} \right),\tag{10}$$

где $k_{\rm p}$ — коэффициент теплопроводности дисперсных наночастиц, а $k_{\rm f}$ — коэффициент теплопроводности чистых жидкостей.

Используя безразмерные переменные X = x/L, Y = y/L, $U = u/U_0$, $V = v/U_0$, $P = p/\rho_{nf} U_0^2$, $\theta = T - T_C /\Delta T (\Delta T = q'' L/k_f$, где q'' — поток тепла, k_f — коэффициент теплопроводности чистых жидкостей, определяющие уравнения (неразрывности, импульса и энергии) в безразмерной форме можно записать в виде

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0, \tag{11}$$

$$U\frac{\partial U}{\partial X} + V\frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\rho_{\text{f}}}{\rho_{\text{nf}}} \cdot \frac{1}{(1-\phi)^{2,5}} \left[\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right],\tag{12}$$

$$U\frac{\partial V}{\partial X} + V\frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\rho_{\text{f}}}{\rho_{\text{nf}}} \cdot \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \left[\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right] + \frac{(\rho\beta)_{\text{nf}}}{\rho_{\text{nf}}\beta_{\text{f}}} \cdot \frac{\text{Ra}}{\text{Pr}\,\text{Re}^2}\theta, \quad (13)$$

$$U\frac{\partial\theta}{\partial X} + V\frac{\partial\theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{\rm nf}}{\alpha_{\rm f}} \frac{1}{\operatorname{Re}\operatorname{Pr}} \left[\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2} \right],\tag{14}$$

где Re = $\rho_{\rm f} U_0 L/\mu_{\rm f}$ — число Рейнольдса, Ra = $g\beta_{\rm f} \Delta T L^3/(\alpha_{\rm f} v_{\rm f})$ — число Рэлея, и Pr = $v_{\rm f}/\alpha_{\rm f}$ — число Прандтля.

Уравнение для производства энтропии включает два члена, определяющих необратимость. В результате локальное производство энтропии, иначе называемое числом производства энтропии, будет иметь вид

$$s_{\text{gen}} = \frac{k_{\text{nf}}}{T_0^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\mu_{\text{nf}}}{T_0} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}.$$
 (15)

При использовании безразмерных параметров, введенных выше, обезразмеренное локальное производство энтропии запишется следующим образом:

$$S_{\text{gen}} = \frac{k_{\text{nf}}}{k_{\text{f}}} \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right] + \varphi \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 \right\} = S_{\text{h}} + S_{\text{f}}.$$
(16)

Коэффициент распределения необратимости (irreversibility distribution ratio) φ определяется как

$$\varphi = \frac{\mu_{\rm nf} T_0}{k_{\rm f}} \left(\frac{U_0}{\Delta T} \right)^2. \tag{17}$$

Обезразмеренное общее производство энтропии S_t получается в результате интегрирования уравнения (16) по всей вычислительной области:

$$S_t = \int S_{\text{gen}} dV. \tag{18}$$

Граничные условия представлены в безразмерной форме следующим образом:

при
$$X = 0$$
 и $0 \le Y \le (D - 0.5B)$: $U = V = 0$, $\partial \theta / \partial X = 0$;
при $X = 0$ и $(D - 0.5B) \le Y \le (D + 0.5B)$: $U = V = 0$, $\partial \theta / \partial X = -k_f / k_{nf}$;
при $X = 0$ и $(D + 0.5B) \le Y \le 1$: $U = V = 0$, $\partial \theta / \partial X = 0$;
при $X = 1$ и $0 \le Y \le (D - 0.5B)$: $U = V = 0$, $\partial \theta / \partial X = 0$;
при $X = 1$ и $(D - 0.5B) \le Y \le (D + 0.5B)$: $U = V = 0$, $\partial \theta / \partial X = -k_f / k_{nf}$;
при $X = 1$ и $(D + 0.5B) \le Y \le 1$: $U = V = 0$, $\partial \theta / \partial X = 0$;
при $Y = 1$ и $(D + 0.5B) \le Y \le 1$: $U = V = 0$, $\partial \theta / \partial X = 0$;
при $Y = 0$ и $0 \le X \le 1$: $U = V = 0$, $\theta = 0^{\circ}$;
при $Y = 1$ и $0 \le X \le 1$: $U = 1$, $V = 0$, $\theta = 0$.

Верификация численного метода и кода

Определяющие уравнения (1-4) решались с использованием метода конечных объемов [25]. Горизонтальная и вертикальная скорости (U и V) располагались в шахматном порядке, а скалярные величины (P и θ) находились в центре данных объемов. Для членов конвекции и диффузии применялись центрально-разностные схемы — степенная и второго порядка [25] соответственно. Численная процедура, называемая SIMPLER [25], использовалась для установления связи для пары давление-скорость. Дискретные алгебраические уравнения решались методом построчной прогонки (TDMA). Сходимость достигалась, когда энергетический баланс между источниками тепла и холодными стенками получался меньше определенного значения точности, т.е. менее 0,2 %. Число узлов сетки 122×122 достаточно для получения решения, независящего от сетки, поэтому она использовалась во всех случаях численного моделирования.



Рис. 2. Верификация расчетного кода на численных результатах работы [21] для вертикальной скорости V в зависимости от X в среднем участке квадратной полости, заполненной наножидкостью Cu-вода $(\phi = 0,10)$ при Re = 1 и Ra = 10^5 . I — данные работы [21], 2 — результаты настоящих расчетов; безразмерная длина источника тепла B = 0,40, безразмерное расстояние источника тепла от левой стенки D = 0,50.



Рис. 3. Изменение обезразмеренного общего производства энтропии в зависимости от числа Рэлея при $\varphi = 3 \cdot 10^{-3}$. Сравнение результатов настоящей работы (1) и работы [22] (2).

Для проверки точности данного численного моделирования численный код верифицировался на основе работ [21] и [22]. Как показано на рис. 2, 3, численные результаты настоящей работы хорошо согласуются с численными результатами этих работ.

Результаты и обсуждение

В настоящей работе получены данные для разных объемных долей твердой фазы $(0 \le \phi \le 0,10)$, чисел Рэлея $(103 \le \text{Ra} \le 105)$ и Рейнольдса $(1 \le \text{Re} \le 500)$ и различных типов наножидкостей (вода-(Cu, Ag, Al2O₃, TiO₂)). Значения параметра распределения φ равно 10^{-4} согласно работе [22]. Все результаты представлены в безразмерных величинах.

Влияние числа Рэлея

Влияние числа Рэлея Ra на изолинии локального производства энтропии (S_{gen}) в квадратной полости с подвижной верхней стенкой для наножидкости Cu-вода ($\phi = 0,10$), чистой воды ($\phi = 0$) и двух значений Ra (10^3 и 10^4) при фиксированном числе Рейнольдса Re = 10 изображено на рис. 4a, 4b. Два источника тепла установлены в середине стенок (вариант 1) и по диагонали в верхней и нижней частях стенок (вариант 2) в полости. Видно, что распределение локального производства энтропии сконцентрировано рядом с верхней крышкой и двумя источниками тепла для обеих полостей. Причиной этому служат высокие температурные градиенты в этих областях. Локальное производство энтропии за счет жидкостного трения является максимальным вблизи верхней крышки, это связано с ее движением. В другой части полости локальным производством энтропии в результате жидкостного трения можно пренебречь. Для Ra = 10^4 изменение локального производства энтропии невелико (рис. 4b).

На рис. 5 представлены изменения общего производства энтропии S_t как функции объемной доли твердой фазы ϕ для двух значений числа Рэлея (Ra = 10³, 10⁴) и двух положений источников тепла при Re = 10. Результаты показывают, что с увеличением Ra общее производство энтропии S_t уменьшается в обеих конфигурациях. Однако отметим, что уменьшение общего производства энтропии больше в полости 1, чем в полости 2. Это связано с наличием высоких температурных градиентов вблизи двух источников



тепла в первом случае. Кроме того, видно, что производство общей энтропии уменьшается с увеличением объемной доли твердой фазы *ф*.

Рисунок 6 отображает изменение производства энтропии за счет теплопередачи $S_{\rm h}$ как функцию объемной доли твердой фазы ϕ для двух значений числа Рэлея (Ra = 10^3 , 10^4)



Puc. 5. Изменение общего производства энтропии как функция ϕ для наножидкости вода-си при Ra = 10³ (1), 10⁴ (2) для двух положений источников тепла при Re = 10.



Рис. 6. Изменение производства энтропии за счет теплопереноса как функция ϕ для наножидкости вода-Си при Ra = $10^{3}(1)$, $10^{4}(2)$ и двух положениях источников тепла при Re = 10.

и двух положений источников тепла при Re = 10. Результаты показывают, что S_h качественно подобно общему производству энтропии, поскольку результаты демонстрируют одинаковую тенденцию. Видно, что добавление в наножидкость объемной доли твердой фазы наночастиц ϕ от 0 до 0,10 повышает ее вязкость и теплопроводность, что вызывает интенсификацию теплопередачи и нарушает общее производство энтропии.



Рис. 7. Изолинии локального производства энтропии для наножидкости вода-Cu ($\phi = 0, 10$) (*I*) и воды без примесей ($\phi = 0$) (*2*) при значениях Re = 10 (*a*), 100 (*b*) и двух положениях источника тепла при фиксированном Ra = 10⁵.



Рис. 8. Изменение общего производства энтропии как функция *ф* для наножидкости вода-Си при разных значениях Re для двух положений источника тепла при Ra = 10⁴. Re = 1 (*I*), 10 (*2*), 50 (*3*), 100 (4), 500 (5).

Влияние числа Рейнольдса

Влияние числа Рейнольдса на изолинии локального производства энтропии в квадратной полости с подвижной верхней стенкой для наножидкости Си-вода ($\phi = 0,10$) и чистой воды ($\phi = 0$) для двух положений источников тепла (варианты 1 и 2) при фиксированном числе Рэлея (Ra = 10^5) показано на рис. 7*a*, 7*b*. Распределение локального производства энтропии внутри полости для Re = 10 дает более низкое значение производства энтропии. Однако в случае Re = 100 влиянием числа Рейнольдса можно пренебречь. Этот интересный результат определяет выбор значений параметров для достижения более высокой скорости передачи тепла с более низким производством энтропии в наножидкости.

На рис. 8 изображено изменение общего производства энтропии как функции ϕ для различных значений числа Рейнольдса (Re = 1, 10, 100, 500) и двух положений источника тепла при Ra = 10^4 . Видно, что при увеличении числа Рейнольдса общее производство энтропии уменьшается до минимальных значений; и это уменьшение больше в полости 2.

Изменение производства энтропии за счет теплообмена как функции ϕ для двух положений источников тепла при различных значениях Рейнольдса (Re = 1, 10, 50, 100, 500) при Ra = 10⁴ показано на рис. 9. Видно, что при увеличении числа Рейнольдса энтропия,



Рис. 9. Изменение производства энтропии за счет теплообмена как функций ϕ для наножидкости вода-Си при разных значениях Re и двух положениях источника тепла при Ra = 10^4 . Re = 1 (1), 10 (2), 50 (3), 100 (4), 500 (5).



Рис. 10. Изменение общего производства энтропии как функции ϕ для наножидкостей вода-Сu (1), вода-Al₂O₃ (2), вода-Ag (3), вода-TiO₂ (4) и двух положений источников тепла при Ra = 10³ и Re = 10.

произведенная тепловой диффузией, уменьшается. Анализ этой энтропии показал, что при низком значении числа Re производство энтропии за счет теплообмена является доминирующим.

Влияние наножидкости

На рис. 10 показано влияние наножидкости вода-(Cu, Ag, Al₂O₃, TiO₂) на общее производство энтропии как функции ϕ для двух положений источника тепла при Ra = 10³. Установлено, что с повышением концентрации наножидкости общее производство энтропии уменьшается для различных типов наножидкости. Для полости 2 S_t имеет значение меньше единицы, а для полости 1 — больше единицы. Авторы пришли к выводу, что присутствие наночастиц играет важную роль в снижении общего производства энтропии. Эти наночастицы обеспечивает лучшую передачу тепла.

Рисунок 11 иллюстрирует изменение общего производства энтропии как функции ϕ для двух положений источников тепла и для наножидкости вода-(Cu, Ag, Al₂O₃, TiO₂) при разных числах Рейнольдса и Ra = 10⁵. Добавление различных наножидкостей в чистую воду



Рис. 11. Изменение общего производства энтропии как функции ϕ для наножидкостей вода-Си (1), вода-Al₂O₃ (2), вода-Ag (3), вода-TiO₂ (4) при разных значениях Re и двух положений источника тепла при Ra = 10⁵.



Рис. 12. Изменение числа Бежана (Ве) как функции ϕ для наножидкости вода-Си при значениях Ra = 10³ (1), 10⁴ (2) и двух положениях источников тепла при Re = 10.

приводит к ухудшению производства энтропии. Кроме того, при увеличении числа Рейнольдса с 1 до 100 общее производство энтропии *S*_t становится ниже.

Число Бежана

На рис. 12 показано влияние объемной доли твердой фазы ϕ на число Бежана, определяемое как Ве = $S_h/S_{произв.}$, для двух значений числа Рэлея (Ra = 10^3 , 10^4) и двух положений источников тепла при Re = 10. Для обеих полостей число Ве имеет значения больше 0,9. Это означает, что необратимость теплообмена преобладает. Кроме того, установлено, что значение Ве уменьшается с увеличением объемной доли твердой фазы ϕ наножидкости Cu-вода. Однако увеличение числа Рэлея уменьшает производство энтропии из-за необратимости жидкостного трения. Это является причиной уменьшения числа Бежана при увеличении числа Рэлея.

Заключение

Численно исследовано производство энтропии при смешанной конвекции различных наножидкостей в квадратной полости с подвижной верхней стенкой и двумя источниками тепла. Для решения уравнений использован метод конечных объемов. Изучено влияние объемной доли твердой фазы, чисел Рэлея и Рейнольдса и различных видов наножидкости на общее производство энтропии, производство энтропии за счет теплообмена и на число Бежана.

Получены следующие результаты.

• При увеличении числа Рэлея локальное и тепловое производство энтропии в полости уменьшается, а максимальное общее производство энтропии имеет место в чистой жидкости.

• При увеличении концентрации наножидкости общее производство энтропии уменьшается.

• При увеличении числа Рейнольдса общее производство энтропии уменьшается.

 Тип наножидкости и положение источников тепла внутри полости с подвижной верхней крышкой существенно влияют на изменение производства энтропии.

• Число Бежана уменьшается с увеличением числа Рэлея при фиксированном числе Рейнольдса.

Список обозначений

- *b* длина источника тепла, м,
- В безразмерная длина источника тепла,
- Ве число Бежана,
- C_{p} теплоемкость, Дж·кг⁻¹·К⁻¹,
- *d* расстояние до источника тепла, м,
- *D* безразмерное расстояние до источника тепла,
- g ускорение силы тяжести, м·c⁻²,
- k теплопроводность, Вт·м⁻¹·K,
- *L* длина полости, м,
- *p* давление, Па,
- Р безразмерное давление,
- Pr число Прандтля,
- q'' тепловой поток, $BT \cdot M^{-2}$,
- Ra число Рэлея,
- Re число Рейнольдса,

- S_{gen} обезразмеренное производство локальной энтропии,
- обезразмеренное производство общей энтропии,
- S_h обезразмеренное производство энтропии за счет теплообмена,
- обезразмеренное производство энтропии за счет S. --жидкостного трения,
- Т-температура, К,
- ΔT разность температур, К,

координаты.

- U, V безразмерные компоненты горизонтальной и вертикальной скорости,
- *и*, *v* компоненты горизонтальной и вертикальной скорости, м $\cdot c^{-1}$,
- U_0 скорость верхней крышки, м·с⁻¹,
- *х*, *у* горизонтальные и вертикальные координаты, м,
- Х, У безразмерные горизонтальные и вертикальные

Греческие символы

 ρ — плотность, кг·м⁻³, ϕ — объемная доля твердой фазы, α — температуропроводность, м²·c⁻¹, θ — безразмерная температура, v — кинематическая вязкость, м²·c⁻¹, β — коэффициент теплового расширения, K⁻¹, *ф* — параметр распределения необратимости. μ — динамическая вязкость, кг·м⁻¹·c⁻¹

Индексы

с — холодная стенка,

f — чистая жидкость,

nf — наножидкость,

s — твердая фаза, р — наночастица.

Список литературы

- 1. Choi U.S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticules // ASME Fluids Engng Division. 1995. Vol. 231. P. 99-105.
- 2. Selimefendigil F., Oztop H.F., Chamkha A. MHD mixed convection and entropy generation of nanofluid filled lid driven cavity under the influence of inclined magnetic fields imposed to its upper and lower diagonal triangular domains // J. Magnetism and Magnetic Materials. 2016. Vol. 406. P. 266-281.
- 3. Chen C., Chen B., Liu C. Entropy generation in mixed convection magnetohydrodynamic nanofluid flow in vertical channel // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. Vol. 91. P. 1026-1033.
- 4. Fersadou I., Kahalerras H., El. Ganaoui M. MHD mixed convection and entropy generation of a nanofluid in a vertical porous channel // Computers and Fluids. 2015. Vol. 121. P. 164-179.
- 5. Hajialigol N., Fattahi A., Haji Ahmadi M., Qomi M.E., Kakoli E. MHD mixed convection and entropy generation in a 3-D micro channel using Al2O3-water nanofluid // J. of Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2015, Vol. 46, P. 30-42,
- 6. Nayak R.K., Bhattacharyya S., Pop I. Numerical study on mixed convection and entropy generation of Cu-water nanofluid in a differentially heated skewed enclosure // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. Vol. 85. P. 620-634.
- 7. Mehrez Z., Cafsi A., Belghith A., Le Quéré P. The entropy generation analysis in the mixed convection assisting flow of Cu-water nanofluid in a inclined open cavity // Advanced Powder Technology. 2015. Vol. 26. P. 1442-1451.
- 8. Khorasanizadeh H., Nikfar M., Amani J. Entropy generation of Cu-water nanofluid mixed convection in a cavity // European J. of Mechanics - B/Fluids. 2013. Vol. 37. P. 143-152.
- 9. Selimefendigil F., Oztop H.F. Natural convection and entropy generation of nanofluid filled cavity having. Different shaped obstacles under the influence of magnetic field and internal heat generation // J. of Taiwan Institute of Chemical Engng. 2015. Vol. 56. P. 42-56.
- 10. Kefayati G.H.R. FDLBM Simulation of entropy generation due to natural convection in an enclosure filled with non-Newtonian nanofluid // Powder Technology. 2015. Vol. 273. P. 176-190.
- 11. Roy M., Roy S., Bassak T. Analysis of entropy generation on mixed convection in square enclosures for various horizontal or vertical moving wall(s) // Int. Communications in Heat Mass Transfer. 2015. Vol. 68. P. 258-266.

- 12. Bianco V., Nardini S., Manca O. Enhancement of heat transfer and entropy generation analysis of nanofluids turbulent convection flow in square section tubes // Nanoscale Research Letters. 2011. Content/6/1/252.
- Mejri I., Mahmoudi A., Abbasi M.A., Omri A. Effet du champ magnétique sur la génération d'entropie dans une cavité remplie de nanofluide et sinusoïdalement chauffée // Research Gate. 2014. Publication/280134544.
- Sebdania S.M., Mahmoodia M., Hashemi S.M. Effect of nanofluid variable properties on mixed convection in a square cavity // Int. J. Thermal Sci. 2012. Vol. 52. P. 112–126.
- Alinia M., Ganji D.D., Gorji-Bandpy M. Numerical study of mixed convection in an inclined two-sided lid-driven cavity filled with nanofluid using two-phase mixture model // Int. Communication in Heat Mass Transfer. 2011. Vol. 38. P. 1428–1435.
- Akbari M., Behzadmehr A., Shahraki F. Fully developed mixed convection in horizontal and inclined tubes with uniform heat flux using nanofluid // Int. J. Heat Fluid Flow. 2008. Vol. 29. P. 545–556.
- Jmai R., Ben-Beya B., Lili T. Heat transfer and fluid flow of nanofluid-filled enclosure with two partially heated sidewalls and different nanoparticules // Superlattices and Microstructures. 2013. Vol. 53. P. 130–154.
- Mahmoodi M., Hashemi S.M. Numerical study of natural convection of a nanofluid in C-shaped enclosures // Int. J. Therm. Sci. 2012. Vol. 55. P. 76–89.
- Arani A.A., Sebdani S.M., Mahmoodi M. Numerical study of mixed convection flow in a lid-driven cavity with sinusoidal heating on sidewalls using nanofluid // Superlattices and Microstructures. 2012. Vol. 51. P. 893–911.
- Rahman M.M., Billah M.M., Hasanuzzaman M., Saidur R., Rahim N.A. Heat transfer enhancement of nanofluid in a lid-driven square enclosure // Numerical Heat Transfer. 2012. P. 973–991.
- Salari M., Tabar M.M., Tabar A.M., Danesh H.A. Mixed convection of nanofluid flows in a square lid-driven cavity heated partially from both the bottom and side walls // Numerical Heat Transfer. 2012. P. 158–177.
- Magherbi M., Abbassi H., Ben Brahim A. Entropy generation at the onset of natural convection // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. P. 3441–3450.
- Zeghbid I., Bessaïh R. Mixed convection in lid-driven cavities filled with a nanofluid // Int. J. Heat and Technology. 2015. Vol. 33, No. 4. P. 77–84.
- Brinkman H.C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions // J. Chemical Physics. 1952. Vol. 20, No. 4. P. 571–581.
- **25.** Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.

Статья поступила в редакцию 17 марта 2016 г., после переработки — 14 ноября 2016 г.