УДК 532.54+536.75

Изучение теплопередачи и генерации энтропии в потоке наножидкости вода/TiO₂ в канале волнистой формы с использованием модели двухфазной смеси

Б. Будраа, Р. Бессаих

Университет Братьев Ментури, Константин 1, Алжир

E-mail: leap.mechanical@gmail.com; bouziane.boudraa@umc.edu.dz

В настоящем исследовании с использованием модели двухфазной смеси численно анализируется генерация энтропии наножидкости «вода-TiO₂» в волнистом канале при постоянном тепловом потоке (q"). Анализ проводится для ламинарного вынужденного конвективного течения. Рассматриваются числа Рейнольдса Re в диапазоне $50 \le \text{Re} \le 600$ при объемной доле наночастиц φ в диапазоне 1 % $\le \varphi \le 5$ %. Определяющие уравнения решаются с помощью программного обеспечения Ansys-Fluent 14.5. Верификация демонстрирует отличное совпадение результатов с данными литературных источников. Исследуется влияние различных Re, φ и амплитуд волнистых стенок α на поведение потока и теплопередачу. Кроме того, представлены и изучены распределение статической температуры, линии тока, генерация полной энтропии ($\dot{S}_{g,t}$) и контуры числа Бежана (Be). Результаты показывают, что скорость теплопередачи возрастает при увеличении φ , Re и α . При использовании волнистой стенки теплопередача усиливается по сравнению с прямой стенкой. Критерий оценки эффективности (PEC) увеличивается с ростом φ и Re, поэтому с инженерной и экономической точек зрения рекомендуется использовать бо́льшие значения для φ и Re в канале волнистой формы. Что касается $\dot{S}_{g,t}$, $\dot{S}_{g,t,h}$ и Be, то эти параметры

уменьшаются при увеличении φ и Re, за исключением $\dot{S}_{g,v}$, которое увеличивается вместе с φ и Re.

Ключевые слова: модель смеси, волнистая стенка, ламинарное течение, вынужденная конвекция.

Введение

Волнистая геометрия поверхности является одним из многих факторов, за счет которых можно повысить скорость теплопередачи в промышленных устройствах [1]. В отличие от плоских каналов, синусоидальные волнистые каналы однозначно показывают лучшую тепловую эффективность [2] в различных системах, таких как теплообменники [3, 4], радиаторы [5, 6], солнечные коллекторы [7–9], а также при охлаждении лопаток газовых турбин [10, 11]. Соответственно, анализ свойств теплопередачи и потока жидкости в волнистых каналах является важной и интересной темой. Помимо использования гофрированных стенок, для повышения теплопередачи применяются наножидкости [12, 13].

© Будраа Б., Бессаих Р., 2022

Будраа Б., Бессаих Р.

В литературе в последние годы появился ряд вычислительных исследований, где рассматривались гофрированные стенки [14-20], в большинстве из них использовались однофазные модели. В работе [21] численно изучалось течение жидкости и теплопередача в волнистом канале и было обнаружено, что с увеличением Re и φ увеличивается скорость теплопередачи. В работе [22] исследовалось влияние различных наножидкостей на поля скорости и тепловые поля. Анализ показал, что наножидкость «SiO₂-вода» с пластинчатой формой наночастиц обеспечивает наилучшую эффективность теплопередачи по сравнению с другими формами наночастиц. Численное моделирование на стенках различных форм проводилось авторами [23]. Результаты показали, что волнистая синусоидальная форма, как правило, имеет самые высокие значения Nu по сравнению с другими формами. В работе [24] исследовались теплопередача и генерация энтропии в наножидкости. Было обнаружено, что увеличение @ приводит к росту Nu . Кроме того, было указано, что общая скорость генерации энтропии снижается по мере увеличения числа Ричардсона. В работе [25] были проанализированы характеристики теплопередачи в гофрированном канале. Результаты анализа показали, что увеличение Re приводит к снижению критерия оценки эффективности (РЕС). Авторы [26] экспериментально изучили влияние магнитного поля на эффективность наножидкости «Fe₃O₄-вода». Их данные показали, что увеличение напряженности магнитного поля, Re и φ приводит к увеличению Nu. Taкже утверждалось, что тепловая эффективность в случае гофрированной трубы лучше, чем в случае гладкой трубы. В работе [27] изучались характеристики теплопередачи в полукруглом гофрированном канале с наножидкостью «SiO2-вода». Было замечено, что скорость теплопередачи возрастает с увеличением Re и отношения высоты гофрированного листа к ширине. Авторы [28] с использованием модели смеси провели численное моделирование течения наножидкости «Al₂O₃-вода» через нагретые гофрированные каналы. Трапециевидные волны стенки канала показали самый высокий Nu, после чего следуют треугольные и синусоидальные волны. В работе [29] изучалось влияние магнитного поля на теплопередачу синусоидального канала. Результаты показали, что наличие магнитного поля значительно улучшает теплопередачу и, следовательно, повышает эффективность охлаждения синусоидального канала. Авторами [30] было проведено численное моделирование для сравнения тепловой эффективности различных гофрированных каналов, показавшее, что канал с трапециевидными волнами обеспечивает максимальную тепловую эффективность. В работе [31] численно исследовалось поле потока и эффективность теплопередачи в стационарных и вращающихся каналах с волнистыми стенками. Было обнаружено, что вращение оказывает мощное влияние на эффективность поля потока и теплопередачу. Авторами [32] проводилось численное исследование производства энтропии, и было показано, что при увеличении φ возрастает \dot{S}_{gv} , но уменьшается \dot{S}_{gth} . В работе [33] численно изучались вынужденная конвекция потока жидкости и теплообмен наножидкости в микроканале с синусоидально-волнистой стенкой при изменении фазы стенки и переменной длиной волны с использованием различных форм наночастиц. Результаты показали, что максимальный PEC получен для $\varphi = 4$ % при использовании сферических наночастиц размером d_{пp} = 20 нм. Вычислительный анализ усиления теплопередачи в волнистом канале с использованием наножидкостей проводился в работе [34]. Было получено, что тепловое усиление может достигать 15 и 24 % в потоке в волнистом канале при использовании наножидкости «Си–вода» соответственно с $\varphi = 3$ % и $\varphi = 5$ % по сравнению с чистой жидкостью. Авторы [35] провели экспериментальный анализ теплопередачи в волнистом канале с использованием наножидкостей в качестве охлаждающей среды. Данные продемонстрировали улучшение скорости теплопередачи в случае синусоидального гофрированного канала по сравнению со случаем плоского канала. Авторы [36] провели вычислительный анализ гидротермальных и необратимых характеристик вынужденного теплопереноса через синусоидальный теплообменник. Было получено подтверждение, что повышение Re и φ приводит к улучшению теплопередачи.

Целью настоящей работы является изучение вынужденного конвективного потока и генерации энтропии наножидкости «TiO₂-вода» в волнистом канале с использованием модели двухфазной смеси для оценки влияния различных параметров, таких как Re, φ и α , на теплопередачу. Также исследуются локальное число Нуссельта Nu, коэффициент поверхностного трения \overline{C}_{f} , PEC и генерация энтропии за счет теплопередачи, трение потока и число Бежана Be. Анализируется влияние волнистой стенки по сравнению с ровной стенкой.

1. Геометрия канала и математическая модель

1.1. Описание геометрии канала

Основываясь на предыдущих исследованиях [37, 38], можно заключить, что синусоидальные волнистые стенки вызывают более высокую теплопередачу, чем другие формы гофрированных стенок, например, треугольные и квадратные. Выбранная в настоящем исследовании геометрия представляет собой канал с синусоидальной волнистой стенкой общей длиной L ($L = L_1 + L_2 + L_3$) и высотой H. Принципиальная схема течения приведена на рис. 1. Видно, что канал состоит из трех частей. Первая часть L_1 характеризуется прямыми стенками и адиабатическим условием (q'' = 0). Средняя часть L_2 представляет собой синусоидальную стенку при постоянном тепловом потоке (q'' = 1000 BT/m²). Заключительная часть L_3 имеет гладкие стенки, и ей соответствует адиабатическое условие (q'' = 0). Длины первой, средней и заключительной частей составляют: $L_1 = 4H$, $L_2 = 6H$ и $L_3 = 8H$ соответственно, где H = 0,05 м. Волнистая часть имеет амплитуду волны α , которая лежит в диапазоне $0 \le \alpha \le 0,015$, и длину волны $\lambda = 0,0375$ м, а число длин волн принимается равным 4.

Чтобы построить синусоидальные кривые, образующие волнистые стенки, используем следующие уравнения:

для верхней стенки:

для нижней стенки:

$$Y = a\sin\left(\pi x/\lambda\right);\tag{1}$$

$$Y = -\alpha \sin(\pi r/\lambda)$$



Рис. 1. Графическое представление анализируемой задачи.

619

(2)

1.2. Граничные условия

Граничные условия, применяемые в данном исследовании, обобщены в табл. 1. На входе в волнистый канал скорость жидкости предполагается равномерной, а ее температура постоянной, на выходе все градиенты равны нулю. Волнистая стенка подвергается воздействию теплового потока, и все остальные стенки адиабатичны. Модель смеси устанавливает относительную скорость (скорость скольжения) между частицами TiO₂ и основной жидкостью (водой). В табл. 2 обобщены основные свойства воды и наночастиц при 300 К.

Таблица 1

Граничные условия	<i>U</i> , м/с	<i>V</i> , м/с	Т, К	<i>q</i> ", Вт/м ²
Вход	$U_{\rm i}$	0	300	-
Волнистая стенка	0	0	_	1000
Прямая стенка	0	0	_	0
Выход	$\frac{\partial U}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$	_

Граничные условия

Таблица 2	
-----------	--

Физические свойства воды и наночастиц

Свойства	Вода	TiO ₂
<i>ρ</i> , кг/м ³	997,1	4250
<i>С_p</i> , Дж/(кг·К)	4179	686,2
<i>µ</i> , кг/(м·с)	0,001003	-
<i>К</i> , Вт/(м·К)	0,6	8,9538

1.3. Определяющие уравнения

Модель многофазной смеси

Течение жидкости и теплопередача в наножидкости «вода-TiO₂» при движении по волнистому каналу моделируются с использованием модели двухфазной смеси. Модель смеси, по существу, представляет собой подход, в котором используется одна жидкость с двухфазным поведением. Это означает, что взаимодействие между базовой жидкостью (первая фаза) и наночастицами (вторая фаза) является сильным. Наночастицы движутся с той же скоростью, что и базовая жидкость. Модель смеси может имитировать несколько фаз (движение жидкости или наночастиц) путем решения уравнений сохранения импульса, неразрывности и энергии для смеси, уравнений объемной доли для вторичных фаз и алгебраических выражений для относительных скоростей. Значением силы сопротивления оценивается влияние первичной фазы на вторичную фазу. Аналогично влияние вторичной фазы на первичную может определяться из средней потери импульса.

В исследовании делаются следующие предположения:

— течение считается ламинарным, несжимаемым и ньютоновским;

 предполагается, что наночастицы имеют сферическую форму и однородны по размеру и форме;

- скорость наночастиц совпадает со скоростью базовой жидкости;
- вязкая диссипация и влияние сил плавучести являются незначительными.

С учетом указанных предположений определяющие уравнения для двухфазной смеси могут быть выражены следующим образом:

— уравнение неразрывности [39] для наножидкости (смеси) может быть записано в виде

$$\frac{\partial(\rho_{\rm m})}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_{\rm m} \vec{V}_{\rm m}\right) = 0, \tag{3}$$

где $\rho_{\rm m}$ — объемная масса наножидкости, $\vec{V}_{\rm m}$ — усредненная по массе скорость наножидкости, которая определяется как

$$\vec{V}_{\rm m} = \sum_{\rm np=1}^{n} \frac{\varphi_{\rm np} \rho_{\rm np} \vec{V}_{\rm np}}{\rho_{\rm np}},\tag{4}$$

здесь \vec{V}_{np} — скорость наночастицы, φ_{np} — объемная доля наночастиц, n — количество фаз, np — твердая наночастица;

— уравнение импульса [40]:

$$\frac{\partial \left(\rho_{\rm m} V_{\rm m}\right)}{\partial t} + \nabla \left(\rho_{\rm m} \vec{V}_{\rm m} \vec{V}_{\rm m}\right) = -\nabla P + \nabla \left(\mu_{\rm m} \left(\nabla \vec{V}_{\rm m} + \nabla \vec{V}_{\rm m}^{\rm T}\right)\right) + \nabla \sum_{\rm np=l}^{n} \left(\varphi_{\rm np} \rho_{\rm np} \vec{V}_{\rm dr,np} \vec{V}_{\rm dr,np}\right), \quad (5)$$

где $\mu_{\rm m}$ — динамическая вязкость наножидкости, $\vec{V}_{\rm dr,np}$ — скорость дрейфа наночастицы, которая записывается в виде

$$\vec{V}_{\rm dr,np} = \vec{V}_{\rm np} - \vec{V}_{\rm m},\tag{6}$$

— уравнение энергии [41]:

$$\frac{\partial(\rho_{\rm np}C_{\rho_{\rm np}}T)}{\partial t} + \nabla \sum_{\rm np=1}^{n} \left(\rho_{\rm np}\varphi_{\rm np}\vec{V}_{\rm m}C_{\rho_{\rm np}}T\right) = \nabla\left(k_{\rm m}\nabla T\right),\tag{7}$$

где $k_{\rm m}$ — эффективная теплопроводность наножидкости;

— уравнение для объемной доли вторичной фазы [42] может быть получено из уравнения неразрывности вторичной фазы, записанного в виде

$$\nabla \cdot \left(\varphi_{\rm np}\rho_{\rm np}\vec{V}_{\rm m}\right) = -\nabla \left(\varphi_{\rm np}\rho_{\rm np}\vec{V}_{\rm dr,np}\right). \tag{8}$$

Скорость смеси наножидкости описывается выражением

$$\vec{V}_{\rm m} = \sum_{\rm np=1}^{n} \frac{\varphi_{\rm np} \rho_{\rm np} \vec{V}_{\rm np}}{\rho_{\rm m}}.$$
(9)

Скорость дрейфа для вторичной фазы определяется следующим образом:

$$\vec{V}_{\rm dr,np} = \vec{V}_{\rm np} - \vec{V}_{\rm m}.$$
 (10)

Скорость скольжения (относительная скорость) определяется как скорость вторичной фазы (пр) по отношению к скорости первичной фазы (f):

$$\vec{V}_{\rm np,f} = \vec{V}_{\rm np} - \vec{V}_{\rm f},$$
 (11)

где $\vec{V}_{\rm np}$ и $\vec{V}_{\rm f}$ — скорости вторичной и первичной фаз соответственно.

Скорость дрейфа и скорость скольжения могут быть связаны следующим образом:

$$\vec{V}_{\rm dr,np} = \vec{V}_{\rm np,f} - \sum_{\rm np=1}^{n} \frac{\varphi_{\rm np} \rho_{\rm np} \vec{V}_{\rm np,f}}{\rho_{\rm m}},$$
 (12)

где $\vec{V}_{np,f}$ — это скорость и первичной (жидкости), и вторичной (наночастицы) фаз.

Уравнение для расчета скорости скольжения $(\vec{V}_{np,f})$, аппроксимированное в работе [43], имеет вид:

$$\vec{V}_{\rm np,f} = \frac{\rho_{\rm np} d_{\rm np}^2}{18\mu_{\rm f} f_{\rm drag}} \frac{\left(\rho_{\rm np} - \rho_{\rm m}\right)}{\rho_{\rm np}} \vec{a},$$
(13)

где $d_{\rm np}$ и \vec{a} — это диаметр и ускорение наночастиц соответственно, при этом последнее определяется как

$$\vec{a} = \vec{g} - \left(\vec{V}_{\rm m} \nabla\right) \vec{V}_{\rm m}.\tag{14}$$

Коэффициент сопротивления (f_{drag}) также может быть рассчитан с помощью корреляции, предложенной авторами [44]:

$$f_{\rm drag} = \begin{cases} 1+0.15\,{\rm Re}^{0.687}, & {\rm Re} \le 1000, \\ 0.0183\,{\rm Re}, & {\rm Re} > 1000, \end{cases}$$
(15)

где $\operatorname{Re}_{np} = \frac{V_{m}d_{n}}{v_{m}}$, v_{m} — кинематическая вязкость наножидкости.

Однофазная модель

В настоящей работе дисперсными наночастицами в базовой жидкости являются TiO2. Поэтому для оценки различных теплофизических характеристик наножидкости была использована однофазная модель, основанная на однородной модели. Теплофизические характеристики базовой жидкости и наночастиц, использованных в данном исследовании, представлены в табл. 2. Для определения диаметра наночастиц применялись формулы для расчета физических свойств наножидкости, на которые, по мнению авторов, можно полагаться при всех диаметрах менее 100 нм. Тем не менее, в настоящей работе решено опираться на исследование [45]. В нем экспериментально была проанализирована теплопередача наножидкостей «TiO₂-вода» с диаметром наночастиц 21 нм, а значения как теплопроводности, так и динамической вязкости, полученные в эксперименте, были сопоставлены с данными, рассчитанными с использованием других корреляций. Результаты, полученные с помощью корреляций, использованных в этом исследовании, хорошо согласуются с результатами эксперимента. Таким образом, можно оценить, что в рассматриваемом здесь случае диаметр наночастиц составляет 21 нм. В приведенных ниже уравнениях индексы p, f и m относятся к наночастицам, базовой жидкости и наножидкостям соответственно.

Установлено, что плотность наножидкостей связана с φ и рассчитывается по уравнению, которое в предыдущих исследованиях использовалось для оценки течения и теплопередачи наножидкостей [46]:

$$\rho_{\rm m} = (1 - \varphi) \rho_{\rm f} + \varphi \rho_{\rm np}. \tag{16}$$

Удельную теплоемкость наножидкостей можно оценить с помощью уравнения, которое также применялось в других работах [47]:

Теплофизика и аэромеханика, 2022, том 29, № 4

$$C_{p_{\rm m}} = \frac{(1-\varphi)C_{p_{\rm f}}\rho_{\rm f} + \varphi C_{p_{\rm np}}\rho_{\rm np}}{\rho_{\rm m}}.$$
 (17)

Динамическая вязкость наножидкостей оценивается по соотношению из исследования [48]:

$$\mu_{\rm m} = \left(1 + 7, 3\varphi + 123\varphi^2\right)\mu_{\rm f}.$$
(18)

Теплопроводность наножидкостей k_m рассчитывается и определяется следующим образом [49]:

$$k_{\rm m} = k_{\rm f} \left[\frac{k_{\rm p} + 2k_{\rm f} + 2\varphi(k_{\rm p} - k_{\rm f})}{k_{\rm p} + 2k_{\rm f} - \varphi(k_{\rm p} - k_{\rm f})} \right].$$
(19)

1.4. Анализ генерации энтропии

В работе также исследовалась генерация энтропии для канала с волнистыми стенками. Как правило, полная скорость генерации энтропии ($\dot{S}_{g,t}$) при вынужденной конвекции состоит из двух частей [50, 51]: скорости генерации энтропии за счет теплопередачи ($\dot{S}_{g,th}$) и за счет трения жидкости ($\dot{S}_{g,v}$).

Объемное производство энтропии за счет теплопередачи запишется как

$$\dot{S}_{\rm g,th} = \frac{k_{\rm m}}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right],\tag{20}$$

а объемное производство энтропии за счет трения жидкости будет иметь вид:

$$\dot{S}_{g,v} = \frac{\mu_{m}}{T} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^{2} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]^{2} \right\}.$$
(21)

Скорости объемного производства энтропии интегрируются по всей области (уравнения (20) и (21)): $\dot{S}_{g,t} = \iiint \dot{S}_{g,v}^{m} dv$, $\dot{S}_{g,v} = \iiint \dot{S}_{g,v}^{m} dv$,

и затем добавляются для расчета полной скорости генерации энтропии:

$$\dot{S}_{g,t} = \dot{S}_{g,th} + \dot{S}_{g,v},$$
 (22)

$$Be = \dot{S}_{g,th} / \dot{S}_{g,t} .$$
⁽²³⁾

2. Вычислительная модель

Уравнения неразрывности, импульса и энергии дискретизируются и решаются в двумерной вычислительной области с использованием метода конечных объемов при помощи программного обеспечения ANSYS Fluent 14.5 [52]. Для дискретизации конвективных членов используется схема QUICK третьего порядка точности. Алгоритм SIMPLE [53] применяется для связи давления и скорости при решении уравнения коррекции давления. Все уравнения решаются путем последовательной итерации для получения сходящегося решения. Критерии сходимости для всех уравнений и уравнения энергии установлены при 10^5 и 10^6 соответственно.

Что касается нестационарной части, интегрирование по времени выполняется по неявной схеме второго порядка. Временной шаг (Δt) равен 3,2 $\cdot 10^{-4}$ с при численном расчете.

Будраа Б., Бессаих Р.



Рис. 2. Конфигурация сетки.

Время выборки для статистики составляет 3,2 с (или 10000 шагов во времени). Через 2,5 с никаких существенных изменений для переменных выборки не наблюдалось, что указывает на достаточность её продолжительности.

2.1. Изучение независимости решения от сетки

Чувствительность решения для течения жидкости изучалась путем оптимизации сетки в целях поиска наилучшей вычислительной сетки и обеспечения независимости результатов от ее разрешения. Детальное изображение выбранной для данного исследования сетки приведено на рис. 2. Оценка независимости решения от сетки проводилась с использованием наножидкости «TiO₂-вода» при Re =100 и φ = 3 %. Были рассмотрены четыре отдельные сетки с разным количеством элементов — 15000, 30000, 55000 и 80000, и затем сравнивалось полученное локальное число Нуссельта (Nu) вдоль волнистой стенки, как показано на рис. 3. Видно, что разница между кривыми 3 и 4 несущественна, поэтому для достижения хорошего решения с учетом времени расчета для всех рассмотренных случаев была выбрана сетка 3, состоящая из 55000 элементов.

3. Результаты и обсуждение

В представленной работе проведен двумерный численный анализ теплопередачи и генерации энтропии на наножидкости «TiO₂-вода» внутри канала с волнистыми стенками с использованием модели двухфазной смеси для Re, изменяемом в диапазоне от 50 до 600, φ — в диапазоне от 0 (вода) до 5 % и амплитудой волнистости стенки $0 \le \alpha \le 0,015$. В данном разделе показано влияние α , φ и Re на Nu, а также рассмотрены вариации $\dot{S}_{g,t}, \dot{S}_{g,v}$, Be и PEC относительно Re при различных φ . Представлены и проанализированы линии тока, температура, $\dot{S}_{g,v}$ и контуры Be.

3.1 Валидация

Численный код верифицируется с помощью данных, обнаруженных в литературе. Для первой проверки используются численные результаты [54], полученные для следующих параметров: рабочая жидкость — наножидкость «вода-Al₂O₃», Re = 300, φ = 5 %. На рис. 4*a* показано сравнение локального числа Нуссельта (Nu) по координате вдоль

Рис. 3. Выбор сетки для обеспечения независимости результатов от ее разрешения. 1-4 — сетки 1-4 соответственно.



Расстояние вдоль волнистой стенки, м



Рис. 4. Верификация настоящей работы с результатами работ [53] и [54]. *а: 1* — результаты работы [54], 2 — данные настоящей работы; *b: 1, 2* — результаты работы [55] при $\varphi = 2$ и 4 % соответственно, *3, 4* — данные настоящей работы при $\varphi = 2$ и 4 % соответственно.

второго блока X_p с численными результатами [54]. Была достигнута хорошая согласованность результатов. Что касается второй верификации, то здесь сравниваются полученные результаты с численными результатами [55], где в качестве рабочей жидкости использовалась наножидкость «TiO₂-вода», отношение радиусов *RR* равнялось 0,2 и $\varphi = 2$ % и 4 % при разных Re. Рис. 4*b* демонстрирует хорошую согласованность с результатами работы [55] при сравнении Nu. Проведенное сравнение дает уверенность в правильности результатов настоящего исследования.

3.2. Сравнение однофазной и двухфазной моделей

На рис. 5. приведено сравнение $\overline{\text{Nu}}$ для $\varphi = 5$ % в зависимости от значений Re, полученных по однофазной модели и модели смеси. Результаты показали, что увеличение Re может значительно улучшить $\overline{\text{Nu}}$ при использовании обеих моделей за счет увеличения интенсивности и длины вихревых структур. В однофазной модели скорость дрейфа между частицами и базовой жидкостью пренебрежимо мала и находится в тепловом равновесии. В модели смеси, напротив, скорость дрейфа и тепловое взаимодействие между базовой жидкостью и частицами требует определения. Вследствие этого значения $\overline{\text{Nu}}$ отличаются в двух моделях, а именно: в двухфазной модели смеси обеспечивает более надежные результаты, чем однофазная модель, и более точное представление двухфазной смеси. Этот метод применялся к результатам, описанным в остальных частях статьи.

3.3. Влияние числа Рейнольдса

На рис. 6 показано влияние Re (Re = 50, 100, 200, 400 и 600) на распределение температуры для $\varphi = 3 \%$ и $\alpha = 0,01$. Можно отметить, что изотермы занимают значительную часть между волнами при малых Re из-за того, что

Рис. 5. Сравнение $\overline{\text{Nu}}$ для смешанной и однофазной моделей в зависимости от Re при $\varphi = 5$ %.



625





Рис. 6. Влияние Re на контуры изотерм при $\varphi = 3$ %.

импульс жидкости недостаточен для уменьшения теплового пограничного слоя. По мере роста Re обнаруживается обратное: импульс приводит к увеличению градиентов температуры и скорости. Таким образом, можно сделать вывод, что скорость теплопередачи растет с увеличением Re.

На рис. 7 приведены линии тока наножидкости «TiO₂-вода» при $\varphi = 3 \%$ и $\alpha = 0,01$ для различных Re (Re = 50, 100, 200, 400). Результаты показывают, что скорость наножидкости внутри канала с волнистыми стенками увеличивается в сходящихся областях и уменьшается в расходящихся областях. Соответственно, можно видеть, что интенсивность и длина зон рециркуляции, образованных между волнами (расходящиеся области), возрастает с увеличением Re.

С целью получения более объективных данных о поведении течения наножидкости авторы применили нестационарную модель для отслеживания формирования вихревых структур во времени внутри канала с волнистыми стенками. На рис. 8 показана эволюция линий тока от входа канала с волнистой формой стенок к выходу вычислительной области при различных временах выборки или временных шагах с Re = 400 и φ = 4 %. Отметим, что при t = 0,1 с вихри в расходящихся областях еще не сформировались, но затем заметно начало формирования небольших зон рециркуляции на входе в области расхождения.



Рис. 7. Линии тока при различных Re с $\varphi = 3$ %.



Теплофизика и аэромеханика, 2022, том 29, № 4

Рис. 8. Линии тока в разные моменты времени при Re = 400 и $\varphi = 3$ %.

Эти вихри постепенно развиваются с течением времени, что приводит к увеличению их размера и интенсивности.

На рис. 9 показано изменение локального числа Нуссельта вдоль волнистой стенки при различных Re с $\varphi = 3$ % и $\alpha = 0,01$. Результаты показали, что значения Nu выше









в начале волнистой стенки при всех значениях Re, а затем начинают уменьшаться по мере приближения к её концу. Кроме того, можно наблюдать, что Nu растет при увеличении Re. Это объясняется тем, что увеличение Re приводит к увеличению импульса жидкости, а это в значительной степени способствует увеличению длины и интенсивности зон рециркуляции, образованных в расходящихся областях вдоль волнистой стенки (см. рис. 7), вследствие чего уменьшается толщина теплового пограничного слоя и соответственно увеличиваются градиенты температуры и скорости, поэтому скорость теплопередачи возрастает. Такие же результаты были получены в [24].

На рис. 10 отображено изменение локального коэффициента поверхностного трения (C_f) вдоль волнистой стенки при различных Re с $\varphi = 3 \%$ и $\alpha = 0,01$. Результаты показали, что C_f уменьшается при увеличении Re в силу того, что, как известно, увеличение Re в значительной степени способствует увеличению длины и интенсивности зон рециркуляции, образованных в областях расходимости волнистой стенки (см. рис. 7). Последнее способствует уменьшению толщины пограничного слоя, вследствие чего значения C_f уменьшаются.

3.4. Влияние объемной доли



Рисунок 11 демонстрирует влияние φ на $\overline{\text{Nu}}$ вдоль волнистой стенки. Расчеты проводились при различных Re и $\alpha = 0,01$. Из полученных результатов видно, что все наножидкости имеют более высокое значение $\overline{\text{Nu}}$ по сравнению с чистой водой ($\varphi = 0$), так как увеличение φ улучшает теплофизические свойства (теплопроводность и вязкость) жидкости. Результаты также показывают, что увеличение Re наножидкостей способствует

Рис. 11. Влияние φ на Nu вдоль волнистой стенки при различных Re. $\varphi = 0$ (1), 1 (2), 3 (3), 5 (4) %.

<i>Рис.</i> 12. Изменение Nu вдоль волнистой		
стенки при разных φ и Re = 200.		
Обозначение см. на рис. 11.		

увеличению $\overline{\text{Nu}}$ за счет большого обмена энергией, возникающего в результате хаотического движения наночастиц. Таким образом, теплопередача улучшается с увеличением Re и φ . Влияние φ на $\overline{\text{Nu}}$ проявляется заметнее с увеличением Re. Например, при $\varphi = 5 \%$ скорость теплопередачи при Re = 600 увеличивается на 19 %, а при Re = 50



скорость теплопередачи увеличивается на 11 %. Такие же результаты были получены в работе [26].

3.5. Влияние волнистой стенки

На рис. 12 показано воздействие амплитуды волнистой стенки на Nu в сравнении с ровной стенкой при Re = 200 и φ = 0,03. Можно видеть, что Nu возрастает с увеличением α . Кроме того, значения для волнистой стенки оказались больше оных для плоской стенки. Волнистая стенка по сравнению с прямой стенкой позволяет формировать зоны рециркуляции в сходящихся областях. Это увеличивает взаимодействие между наножидкостью «вода-TiO₂» и стенкой горячего канала и более эффективно подавляет пограничные слои. Последнее приводит к улучшению значений Nu. Можно сделать вывод, что скорость теплопередачи в случае волнистой стенки выше, чем в случае плоской стенки, и она увеличивается с возрастанием α . Например, при φ = 5 % и α = 0,015 скорость теплопередачи становится больше на 20 %.

На рисунке 13 представлены профили $\overline{C_f}$ в зависимости от α при различных φ с Re = 200. Результаты показали, что значения $\overline{C_f}$ возрастают с увеличением φ . Данный рост обусловлен более высоким напряжением сдвига стенки при бо́льшем φ . Это объясняется тем, что свойства наножидкостей, такие как плотность и вязкость, возрастают с увеличением φ . Например, для $\varphi = 5 \% \overline{C_f}$ увеличивается на 30 % по сравнению с базо-



вой жидкостью. Также можно отметить, что $\overline{C_f}$ увеличивается с ростом α . Например, на волнистой стенке с $\alpha =$ = 0,015 $\overline{C_f}$ увеличивается в два раза по сравнению с ровной стенкой, так как увеличение α приводит к затруднению движения наножидкости в расходящихся областях и, соответственно,

Рис. 13. Изменение $\overline{\text{Nu}}$ в зависимости от α при разных ϕ и Re = 200. Обозначение см. на рис. 11.

к увеличению значения $\overline{C_{\rm f}}$, а следовательно, и к увеличению мощности накачки на входе в канал. Для канала с прямыми стенками значения $\overline{C_{\rm f}}$ малы по сравнению с каналами с волнистыми стенками, и жидкость движется легко и беспрепятственно.

3.6. Оценка эффективности системы

Эффективность системы при добавлении наночастиц в базовую жидкость может оцениваться на основе первого и второго законов термодинамики путем определения коэффициента эффективности РЕС [54]. Наибольшее усиление теплопередачи с минимальной относительной генерацией энтропии показывает наилучшую эффективность, доступную за счет добавления наночастиц. Поэтому РЕС определяется для оценки эффективности в различных случаях следующим образом:

$$PEC = \frac{\overline{Nu_{nf}}/Nu_{f}}{\dot{S}_{g,tnf}/\dot{S}_{g,tf}},$$
(24)

где $\overline{\text{Nu}}_{\text{m}}$ и $\overline{\text{Nu}}_{\text{f}}$ — это средние числа Нуссельта для наножидкостей и базовой жидкости соответственно; $\dot{S}_{\text{g,t}}$ и $\dot{S}_{\text{g,t,f}}$ представляют собой полную генерацию энтропии для наножидкостей и базовой жидкости соответственно. Таким образом, РЕС — это критерий, который может использоваться для оценки общей энергетической эффективности наножидкостей. Для подтверждения влияния, оказываемого добавлением наночастиц в базовую жидкость, на увеличение скорости теплопередачи при различных температурах на рис. 14 представлен РЕС в зависимости от Re при различных φ . Результаты показывают, что для достижения наилучшей эффективности системы необходимо увеличить Re и φ .

3.7. Производство энтропии

На рис. 15 показано влияние $\varphi(\varphi=1, 3 \text{ и } 5 \%)$ на $\dot{S}_{g,th}$ и $\dot{S}_{g,v}$ при разных Re. Видно, что в случае постоянного Re и изменения φ значения $\dot{S}_{g,th}$ и $\dot{S}_{g,v}$ меняются линейно. На рис. 15*a* можно видеть, что значения $\dot{S}_{g,th}$ уменьшаются с увеличением Re и φ . На рис. 15*b* отме-



чается обратное: значения $\dot{S}_{g,v}$ увеличиваются из-за возрастания градиента скорости с увеличением значений Re и φ .

Рис. 16*а* иллюстрирует влияние φ на $\dot{S}_{g,t}$ при разных Re. Результаты показывают, что значения $\dot{S}_{g,t}$ уменьшаются с увеличением Re и φ . Можно сделать вывод, что для минимизации $\dot{S}_{g,t}$ необходимо увеличить значения Re и φ .

Рис. 14. Оценка эффективности в зависимости от Re при разных φ . $\varphi = 1$ (*1*), 3 (*2*), 5 (*3*) %.



Рис. 15. Влияние φ на $\dot{S}_{g,th}$ (*a*) и $\dot{S}_{g,v}$ (*b*) при разных Re. Обозначение см. на рис. 14.

Рис. 16*b* демонстрирует влияние φ на число Бежана при разных Re. Результаты показывают, что увеличение φ и Re приводит к уменьшению значений Be, и это уменьшение связано с ростом $\dot{S}_{g,v}$ и снижением $\dot{S}_{g,th}$ при увеличении Re и φ (см. рис. 16*a* и 16*b*). Возвращаясь к результатам, ранее представленным на рис. 15*a* и 15*b*, и опираясь на определение Be (Be = $\dot{S}_{g,th}$ / $\dot{S}_{g,t}$), можно объяснить более низкие полученные значения тем, что значения $\dot{S}_{g,th}$ намного больше $\dot{S}_{g,v}$ ($\dot{S}_{g,th}$ доминирует над $\dot{S}_{g,v}$).

На рис. 17 показан контур скорости генерации полной энтропии $\dot{S}_{g,t}$ для $\alpha = 3$ % и $\alpha = 0,01$ при различных Re. Максимум $\dot{S}_{g,t}$ сосредоточен вблизи волнистой стенки и удаляется от стенки в направлении оси волнистого канала. Значения $\dot{S}_{g,t}$ уменьшаются из-за уменьшения градиентов скорости и температуры, а также они уменьшаются с увеличением Re, что подтверждают результаты, приведенные выше (см. рис. 15).



Рис. 16. Влияние φ на $\dot{S}_{g,t}(a)$ и Ве (*b*) при разных Re. Обозначение см. на рис. 14.

Будраа Б., Бессаих Р.



Рис. 17. Контуры $\dot{S}_{g,t}$ при различных Re с $\alpha = 0.01$ и $\varphi = 3$ %.



Рис. 18. Контуры Ве при различных Re c $\alpha = 0,01$ и $\varphi = 3$ %.

На рис. 18. изображены контуры числа Бежана (Ве) при различных Re с $\alpha = 0,01$ и $\varphi = 3$ %. Согласно полученным результатам и с учетом уравнения (23), наиболее высокие значения Be относятся к Re = 50 в значительной части области решения и особенно вблизи стенки из-за доминирования $\dot{S}_{g,th}$. Можно видеть, что с увеличением Re значения Be постепенно уменьшаются от стенок к середине канала. Это означает, что процент $\dot{S}_{g,th}$ также уменьшается и около середины канала $\dot{S}_{g,v}$ также является доминирующим слагаемым.

Заключение

Численное исследование с использованием моделей двухфазной смеси определило влияние нескольких параметров на течение и теплопередачу в наножидкости «TiO₂-вода». Приведем наиболее важные выводы:

- модель смеси дает более высокие значения Nu, чем однофазная модель;
- увеличение α , Re и ϕ улучшает скорость теплопередачи;
- при увеличении Re и ϕ улучшается эффективность системы (PEC);

— тепловое повышение может достигать 22 % в волнистом канале при использовании $\varphi = 5$ % наножидкости «TiO₂-вода» по сравнению с чистой водой;

— скорость теплопередачи при использовании волнистой стенки с $\alpha = 0,015$ увеличивается на 20 % по сравнению с прямой стенкой;

— для $\varphi = 5 \%$ и $\alpha = 0,015 \ \overline{C_{\rm f}}$ увеличивается в два раза по сравнению с прямой стенкой и на 37 % по сравнению с базовой жидкостью ($\varphi = 0$);

— PEC с Re = 600 и φ = 5 % увеличивается на 60 % по сравнению с чистой водой;

— увеличение значений Re и φ приводит к увеличению и уменьшению $\dot{S}_{g,v}$ и $\dot{S}_{g,th}$ соответственно;

 $-\dot{S}_{g,t}$ уменьшается с увеличением φ и Re;

— Ве примерно равно единице во всех случаях из-за доминирования $\dot{S}_{\sigma th}$.

Обозначения

\vec{a} — ускорение, м/с ² ,	Nu — среднее число Нуссельта,
Ве — число Бежана,	P — давление, H/M^2 ,
C_{f} — локальный коэффициент	q'' — тепловой поток, BT/M^2 ,
поверхностного трения,	<i>U</i> , <i>V</i> — скорость, м/с,
$\overline{C_{\rm f}}$ — средний коэффициент поверхностного трения,	Re — число Рейнольдса, $\dot{S}_{\rm g,th}$ — генерация тепловой энтропии, Bt/(м ³ ·K),
\vec{g} — ускорение свободного падения, м/с ² ,	$\dot{S}_{\rm g,v}$ — производство энтропии трением, Вт/(м ³ ·K)
 <i>H</i> — высота канала, м, <i>k</i> — теплопроводность, Вт/(К⋅м), Nu — локальное число Нуссельта, 	$\dot{S}_{\rm g,t}$ — общее производство энтропии, Вт/(м ³ ·K), T — температура, К.

Греческие символы

φ — объемная доля наночастиц,	λ — длина волны волнистой стенки, м,
lpha — амплитуда волнистой стенки, м,	μ — динамическая вязкость, кг/(м·с),
ho — плотность, кг/м ³ ,	ν — кинематическая вязкость, м/c ² .
	Индексы
<i>п</i> — номер фазы,	f — базовая жидкость,

np — наночастица,

f — базовая жидкость, m — смесь.

Список литературы

- Ajeel R.K., Saiful-Islam W., Hasnan K.B. Thermal and hydraulic characteristics of turbulent nanofluids flow in trapezoidal-corrugated channel: Symmetry and zigzag shaped // Case Studies in Thermal Engng. 2018. Vol. 12. P. 620–635.
- Ahmadpour A., Noori Rahim Abadi S.M.A. Thermal-hydraulic performance evaluation of gas-liquid multiphase flows in a vertical sinusoidal wavy channel in the presence/absence of phase change // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol 138. P. 677–689.
- Wen Z.X., Lv Y.G., Li Q., Zhou P. Numerical study on heat transfer behavior of wavy channel supercritical CO2 printed circuit heat exchangers with different amplitude and wavelength parameters // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 147. P. 118922.
- 4. Khoshvaght-Aliabadi M., Davoudi S., Dibaei M.H. Performance of agitated-vessel U tube heat exchanger using spiky twisted tapes and water based metallic nanofluids // Chem. Eng. Res. Des. 2018. Vol. 133. P. 26–39.
- Khoshvaght-Aliabadi M., Hassani S.M., Mazloumi S.H. Performance enhancement of straight and wavy miniature heat sinks using pin-fin interruptions and nanofluids // Chem. Eng. Process. Process Intensif. 2017. Vol. 122. P. 90–108.
- 6. Abdulhaleem A.A., Jaffal H.M., Khudhur D.S. Performance optimiation of a cylindrical mini-channel heat sink using hybrid straight–wavy channel // Int. J. Thermal Sci. 2019. Vol. 146. P. 106111-1–106111-16.
- Khoshvaght-Aliabadi M., Tatari M., Salami M. Analysis on Al₂O₃/water nanofluid flow in a channel by inserting corrugated/perforated fins for solar heating heat exchangers // Renew. Energy. 2018. Vol. 115. P. 1099–1108.

- Hatami M., Jing D. Evaluation of wavy direct absorption solar collector (DASC) performance using different nanofluids // J. Molecular Liquids. 2017. Vol. 229. P. 203–211.
- Hatami M., Jing D. Optimization of wavy direct absorber solar collector (WDASC) using Al₂O₃-water nanofluid and RSM analysis // Appl. Therm. Eng. 2017. Vol. 121. P. 1040–1050.
- Chang S.W., Lees A.W., Chou T.C. Heat transfer and pressure drop in furrowed channels with transverse and skewed sinusoidal wavy walls // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. Vol. 52, Iss. 19. P. 4592–4603.
- Chang S.W., Lees A.W., Liou T.M., Hong G.F. Heat transfer of a radially rotating furrowed channel with two opposite skewed sinusoidal wavy walls // Int. J. Therm. Sci. 2010. Vol. 49, Iss. 5. P. 769–785.
- 12. Зегбид И., Бессаи З. Производство энтропии при смешанной конвекции наножидкости в квадратной полости // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 25, № 2. С. 255–267.
- Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Ч. 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 2. С. 173–188.
- 14. Перепелица Б.В. Пространственная структура потока в канале с гофрированной стенкой // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 4. С. 595–600.
- Ajeel R.K., Salim W.I., Hasnan K. Impacts of corrugation profiles on the flow and heattransfer characteristics in trapezoidal corrugated channel using nanofluids // Experimental Thermal and Fluid Sci. 2018. Vol. 49, Iss. 2. P. 170–179.
- 16. Naphon P., Wiriyasart S. Pulsating flow and magnetic field effects on the convectiveheat transfer of TiO₂-water nanofluids in helically corrugated tube // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 125. P. 1054–1060.
- Rostami J. Convective heat transfer in a wavy channel utilizing nanofluids // J. Enhanced Heat Transfer. 2007. Vol. 14, Iss. 4. P. 333–352.
- Ma T., Du L., Sun N., Zeng M., Sunden B., Wang Q. Experimental and numerical study on heat transfer and pressure drop performance of Cross-Wavy primary surface channel // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 125. P. 80–90.
- Rostami J., Abbassi A., Harting J. Heat transfer by nanofluids in wavy microchannels // Advanced Powder Technology. 2018. Vol. 29. P. 925–933.
- 20. Zhu X.W., Fu Y.H., Zhao J.Q. A novel wavy-tape insert configuration for pipe heat transfer augmentation // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 127. P. 140–148.
- Manavi S.A., Ramiar A., Ranjbar A.A. Turbulent forced convection of nanofluid in a wavy channel using two phase model // Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 50, Iss. 3. P. 661–671.
- 22. Vanaki S.M., Mohammed H.A., Abdollahi A., Wahid M.A. Effect of nanoparticle shapes on the heat transfer enhancement in a wavy channel with different phase shifts // J. Molecular Liquids. 2014. Vol. 196. P. 32–42.
- 23. Ferley D.M., Ormiston S.J. Numerical analysis of laminar forced convection in corrugated-plate channels with sinusoidal, ellipse, and rounded-vee wall shapes // Numerical Heat Transfer. 2013. Vol. 63, Iss. 8. P. 563–589.
- 24. Dormohammadi R., Farzaneh-Gord M., Ebrahimi-Moghadam A., Ahmadi M.H. Heat transfer and entropy generation of the nanofluid flow inside sinusoidal wavy channels // J. Molecular Liquids. 2018. Vol. 69. P. 229–240.
- 25. Садрипу С. Исследование теплопереноса при течении наножидкости в канале с оребренными стенками // Прикл. механ. и технич. физика. 2018. Т. 59, № 6. С. 102–111.
- 26. Mei S., Qi C., Luo T., Zhai X., Yan Y. Effects of magnetic field on 634hermos-hydraulic performance of Fe₃O₄-water nanofluids in a corrugated tube // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 128. P. 24–45.
- Ajeel R.K., Salim W.S.-I.W., Hasnan K. Design characteristics of symmetrical semicircle-corrugated channel on heat transfer enhancement with nanofluid // Int. J. Mechanical Sci. 2019. Vol. 151. P. 236–250.
- Salami M., Khoshvaght-Aliabadi M., Feizabadi A. Investigation of corrugated channel performance with different wave shapes // J. Thermal Analysis and Calorimetry. 2019. Vol. 138. P. 3159–3174.
- 29. Mousavi S.V., Gerdroodbary M.B., Sheikholeslami M., Ganji D.D. The influence of a magnetic field on the heat transfer of a magnetic nanofluid in a sinusoidal channe // European Physical J. Plus. 2016. Vol. 131, Iss. 9. P. 1–12.
- 30. Ajeel R.K., Salim W.S.-I.W., Hasnan K. Thermal performance comparison of various corrugated channels using nanofluid: Numerical study // Alexandria Engng J. 2019. Vol. 58. P. 75–87.
- Al-Zurfi N., Alhusseny A., Nasser A. Effect of rotation on forced convection in wavy wall channels // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2020.Vol. 149. P. 119177.
- 32. Fadodun O.G., Amosun A.A., Okoli N.L., Olaloye D.O., Ogundeji J.A., Durodola S.S. Numerical investigation of entropy production in SWCNT/H₂O nanofluid flowing through inwardly corrugated tube in turbulent flow regime // J. Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. Vol. 144, Iss. 4. P. 1451–1466.
- 33. Arani A.A.A., Sadripour S., Kermani S. Nanoparticle shape effects on thermal-hydraulic performance of boehmite alumina nanofluids in a sinusoidal–wavy mini-channel with phase shift and variable wavelength // Int. J. Mechanical Sci. 2017. Vol. 128. P. 550–563.
- 34. Yue-Tzu Y., Yi-Hsien W., Po-Kai T. Numerical optimization of heat transfer enhancement in a wavy channel using nanofluids // Int. Communications in Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 51. P. 9–17.

- **35. Singh V., Haridas D., Srivastava A.** Experimental study of heat transfer performance of compact wavy channel with nanofluids as the coolant medium: Real time non-intrusive measurements // Int. J. Thermal Sci. 2019. Vol. 145, Iss. 4. P. 105993.
- 36. Li Z., Shahsavar A., Niazi K., Al-Rashed A.A.A., Rostami S. Numerical assessment on the hydrothermal behavior and irreversibility of MgO-Ag/water hybrid nanofluid flow through a sinusoidal hairpin heat exchanger // Int. Communications in Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 115, Iss. 6. P. 104628.
- 37. Akbarzadeh M., Rashidi S., Esfahani J.A. Influences of corrugation profiles on entropy generation, heat transfer, pressure drop, and performance in a wavy channel // Appl. Therm. Eng. 2017. Vol. 116. P. 278–291.
- 38. Ahmed M.A., Yusoff M.Z., Ng K.C., Shuaib N.H. The effects of wavy-wall phase shift on thermal-hydraulic performance of Al₂O₃-water nanofluid flow in sinusoidalwavy channel // Case Stud. Therm. Eng. 2014. Vol. 4. P. 153–165.
- 39. Shahsavar A., Rashidi M., Mosghani M.M., Toghraie D., Talebizadehsardari P. A numerical investigation on the influence of nanoadditive shape on the natural convection and entropy generation inside a rectangle shaped finned concentric annulus filled with boehmite alumina nanofluid using two phase mixture model // J. Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. Vol. 141. P. 915–930.
- 40. Siavashi M., Reza TaleshBahrami H., Saffari H. Numerical investigation of flow characteristics, heat transfer and entropy generation of nanofluid flow inside an annular pipe partially or completely filled with porous media using two-phase mixture model // Energy. 2015. Vol. 93. P. 2451–2466.
- 41. Shariat M., Akbarinia A., Nezhad A.H., Behzadmehr A., Laur R. Numerical study of two phase laminar mixed convection nanofluid in elliptic ducts // Appl. Therm. Engng. 2011. Vol. 31. P. 2348–2359.
- 42. Hejazian M., Moraveji M.K., Beheshti A. Comparative study of Euler and mixture models for turbulent flow of Al₂O₃ nanofluid inside a horizontal tube // Int. Communications in Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 52. P. 152–158.
- **43. Manninen M., Taivassalo V., Kallio S.** On the mixture model for multiphase flow // Technical Research Center of Finland. 1996. VTT Publications 288. 67 p.
- Schiller L., Naumann A. A drag coefficient correlation // Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure. 1935. Vol. 77. P. 318–320.
- **45. Duangthongsuk W., Wongwises S.** An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53. P. 334–344.
- 46. Pak B.C., Cho Y.I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles // Exp. Heat Transfer. 1998. Vol. 11, Iss. 2. P. 151–170.
- 47. Pak B.C., Cho Y.I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles // Exp. Heat Transfer. 1998. Vol. 11, Iss. 2. P. 151–170.
- Wang X., Xu X., Choi S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticles-fluid mixture // J. Thermophysics and Heat Transfer. 1999. Vol. 13, Iss. 4. P. 474–480.
- 49. Wasp F.J., Kenny J.P., Gandhi R.L. Solid-liquid slurry pipeline transportation. Berlin: Trans. Tech., 1977. 224 p.
- 50. Bejan A. Entropy generation minimization. Boca Raton: CRC Press, 1995. 400 p.
- 51. Bejan A. Entropy generation through heat and fluid flow. New York: Wiley, 1982. 248 p.
- 52. AnsysInc, Fluent User Guide and Fluent Theory Guide, version 14.5.
- 53. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. Washington: Hemisphere, 1980. 197 p.
- 54. Paulraj M.P., Sahu S.K. Conjugate heat transfer enhancement of laminar slot jets with various nanofluids on an array of protruding hot sources using MPM approach // Numerical Heat Transfer. 2019. Vol. 76, Iss. 4. P. 232–253.
- 55. Siavashi M., Jamali M. Heat transfer and entropy generation analysis of turbulent flow of TiO2-water nanofluid inside annuli with different radius ratios using two-phase mixture model // Applied Thermal Engng. 2016. Vol. 100. P. 1149–1160.
- 56. Laur R., Akbarinia A. Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach // Int. J. Heat Fluid Flow. 2009. Vol. 30. P. 706–713.
- 57. Behzadmehr A., Saffar-Avval M., Galanis N. Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach // Int. J. Heat Fluid Flow. 2007. Vol. 28. P. 211–219.
- 58. Ghale Z.Y., Haghshenasfard M., Esfahany M.N. Investigation of nanofluids heat transfer in a ribbed microchannel heat sink using single-phase and multiphase CFD models // Int. Communications in Heat and Mass Transfer. 2015.Vol. 68. P. 122–129.

Статья поступила в редакцию 5 июля 2020 г.,

после доработки — 4 марта 2021 г.,

принята к публикации 23 марта 2021 г.,

после дополнительной переработки — 5 августа 2021 г.