

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В НАНОЖИДКОСТЯХ НА ПРИМЕРЕ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

О. В. Вдовин, Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов

Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В статье представлены основные математические модели для численного моделирования процессов теплообмена, протекающих в наножидкости, — однофазная и двухфазная модели. Дано описание устройства и принципа работы концентрирующего параболического солнечного коллектора. Выполнены расчетные исследования процессов теплообмена однофазным методом при ламинарном и турбулентном течении теплоносителей в гладкой поглощающей трубке и трубке с проволочным спиральным турбулизатором. В качестве теплоносителя использовалась чистая вода и наножидкость на основе воды с наночастицами Al_2O_3 объемной концентрацией 1 %. Размер наночастиц Al_2O_3 — 50 нм. Проведен анализ влияния применения проволочного спирального турбулизатора в солнечном коллекторе в комбинации с наножидкостью в качестве теплоносителя на температурное распределение в поглощающей трубке.

Ключевые слова: наножидкость; концентрирующий, параболический, солнечный коллектор; однофазная модель; двухфазная модель; турбулизатор.

Для цитирования: Вдовин О. В., Слободина Е. Н., Михайлов А. Г. Моделирование процессов теплообмена в наножидкостях на примере параболического солнечного коллектора // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 3. С. 47–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-47-56. EDN: KWUXBP.



© Вдовин О. В., Слободина Е. Н., Михайлов А. Г., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN NANOFLUIDS ON THE EXAMPLE OF A PARABOLIC SOLAR COLLECTOR

O. V. Vdovin, E. N. Slobodina, A. G. Mikhailov

Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article presents the main mathematical models for numerical simulation of heat transfer processes occurring in a nanofluid — single-phase and two-phase models. A description of the device and the principle of operation of a concentrating parabolic solar collector are demonstrated. The authors perform computational studies of heat transfer processes using the single-phase method with laminar and turbulent flow of heat transfer fluids in a smooth absorbing tube and a tube with a spiral turbulator wire. Pure water and a water-based nanofluid with Al_2O_3 nanoparticles with a volume concentration of 1 % are used as the heat transfer fluid. The size of Al_2O_3 nanoparticles is 50 nm. The research analyses the effect of using a spiral wire turbulator in a solar collector in combination with a nanofluid as a heat transfer fluid on the temperature distribution in the absorption tube.

Keywords: nanofluid; concentrating, parabolic, solar collector; single-phase model; two-phase model; turbulator.

For citation: Vdovin O. V., Slobodina E. N., Mikhailov A. G. Modeling of heat and mass transfer processes in nanofluids on the example of a parabolic solar collector. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 3. P. 47–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-47-56. EDN: KWUXBP.



© Vdovin O. V., Slobodina E. N., Mikhailov A. G., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

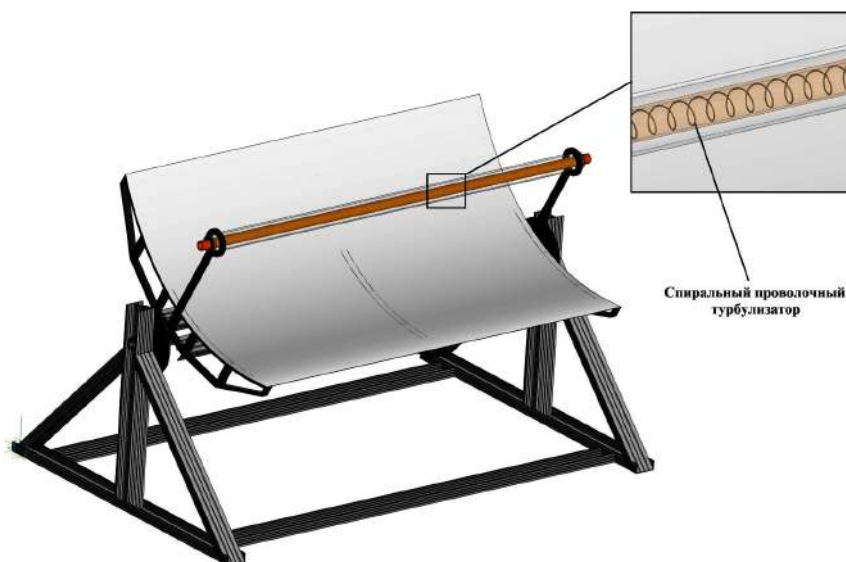


Рис. 1. Внешний вид концентрирующего параболического солнечного коллектора со спиральным проволочным турбулизатором
Fig. 1. Design of a concentrating parabolic solar collector with a spiral wire turbulator

Введение

В погоне за повышением производительности тепловых систем, снижением расхода топлива и экономией средств ученые стремятся разработать новые способы повышения теплопередачи в тепловых устройствах. В теплотехнике существуют два основных типа методов интенсификации теплопередачи — активные и пассивные. Добавление наноразмерных твердых частиц (наночастиц) в теплоноситель — это один из пассивных методов интенсификации. Главным условием при использовании данного метода интенсификации является высокая теплопроводность вещества, из которого изготовлены наночастицы, поэтому наночастицы обычно изготавливают из металлов, оксидов металлов или углеродных нанотрубок. В качестве базовых жидкостей, в которые добавляют наночастицы, используют воду, пропиленгликоль, этиленгликоль и другие теплоносители. Получаемый в результате смешения модифицированный теплоноситель называют наножидкостью. Добавление твердых нанопорошков в обычные жидкости приводит к значительному увеличению теплопроводности. Теплофизические свойства наножидкостей превосходят характеристики стандартных теплоносителей, что делает их более перспективными и потенциальными во многих областях энергетики, например, в солнечных коллекторах [1–5].

Применение наножидкости в качестве теплоносителя в концентрирующем параболическом солнечном коллекторе (КПСК) может повысить его тепловую эффективность [3–5]. В комбинации с наножидкостью в КПСК можно использовать различного рода турбулизаторы (например, проволочный спиральный турбулизатор), что поможет поддерживать турбулизацию пристеночного слоя и минимизировать вероятность осаждения наночастиц в теплоносителе [6].

Как правило, при моделировании конвективного теплообмена в наножидкостях используются две основные модели: однофазная модель, в которой смесь базовой жидкости и наночастиц рассматривается как однородная среда с постоянными свойствами, и двухфазная модель, в которой свойства

и поведение наночастиц рассматриваются отдельно от свойств и поведения базовой жидкости [7].

Постановка задачи

Математическое моделирование — это мощный инструмент для понимания, прогнозирования и оптимизации теплообмена в наножидкостях, что особенно важно для современных технологий в солнечной энергетике. Оно дополняет эксперименты, сокращает затраты и ускоряет внедрение инновационных решений. Применение наножидкостей в качестве теплоносителей может значительно улучшить КПД КПСК. Однако из-за сложности физических процессов математическое моделирование становится ключевым инструментом для анализа и оптимизации таких систем.

Следовательно, необходим анализ и выбор математических моделей для корректного решения задач процессов теплообмена, протекающих в КПСК с наножидкостью в качестве модифицированного теплоносителя.

Теория

1. Устройство и принцип работы КПСК

Концентрирующий параболический солнечный коллектор — это устройство, предназначенное для фокусировки солнечного излучения на поглощающую трубку с целью нагрева теплоносителя, протекающего по трубке. Он используется в солнечных электростанциях, системах нагрева теплоносителя и других промышленных областях [8].

Общий вид КПСК изображен на рис. 1. Он состоит из следующих основных элементов: параболический отражатель, поглощающая трубка и рама солнечного коллектора. Отражатель изготавливается из полированных металлических листов или зеркальных пленок с высокой отражающей способностью (~ 90–95 %). Конструкция может быть цельной или состоять из отдельных сегментов. Поглощающая трубка может быть размещена внутри вакуумной трубки для снижения тепловых потерь в окружающую среду [9].

Параболический желоб отражает параллельные солнечные лучи в линию вдоль поглощающей труб-

ки. Сфокусированное излучение нагревает поверхность трубки, а теплоноситель, протекающий через приемник, поглощает тепло и передает его дальше (например, в теплообменник или паровую турбину) [9].

2. Методы математического моделирования теплообмена в наножидкостях

2.1. Однофазное численное моделирование

Наночастицы при добавлении в базовую жидкость достаточно хорошо растворяются в ней, а получаемая в результате суспензия (наножидкость) ведет себя как единая жидкость. Поток наножидкости можно рассмотреть как однофазный несжимаемый поток и использовать дифференциальные уравнения, описывающие сохранение массы, энергии и импульса как для обычной жидкости с учетом модифицированных теплофизических характеристик. Такой подход дает возможность использовать эмпирические формулы для прогнозирования характеристик. При данном моделировании предполагается, что порошковая и жидкая фазы движутся с одинаковой скоростью и находятся в тепловом равновесии. Уравнения для однофазного моделирования представлены ниже [7].

Уравнение неразрывности:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} \vec{v}) = 0. \quad (1)$$

Уравнение импульса:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho_{nf} \vec{v} \vec{v}) = \\ = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\eta_{nf} (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] + \rho_{nf} \vec{g}. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение энергии:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} \vec{v} C p_{nf} T_{nf}) = \nabla \cdot (\lambda_{nf} \nabla T_{nf}). \quad (3)$$

В уравнениях (1–3): $\vec{v}$, ρ_{nf} , η_{nf} , $C p_{nf}$, λ_{nf} , T_{nf} — скорость, плотность, вязкость, удельная теплоемкость и температура наножидкости соответственно; p — давление; $\vec{g}$ — ускорение свободного падения; I — единичный тензор.

Основной проблемой однофазного математического моделирования теплообмена в наножидкостях является отсутствие универсальных корреляций вязкости и теплопроводности для всех видов наножидкостей, поэтому основу данной модели составляют достоверные корреляции теплофизических свойств наножидкости, полученные из экспериментальных данных.

Плотность наножидкости определяется по уравнению [10]:

$$\rho_{nf} = \rho_{bf} \cdot (1 - \phi) + \rho_p \cdot \phi \quad (4)$$

где ρ_{bf} — плотность базовой жидкости; ρ_p — плотность материала наночастиц; ϕ — объемная доля наночастиц в наножидкости.

Удельная теплоемкость наножидкости определяется следующим уравнением [11]:

$$C p_{nf} = \frac{\rho_{bf} \cdot C p_{bf} \cdot (1 - \phi) + \rho_p \cdot C p_p \cdot \phi}{\rho_{nf}}, \quad (5)$$

где $C p_{bf}$ — удельная теплоемкость базовой жидкости; $C p_p$ — удельная теплоемкость материала наночастиц.

Динамическая вязкость наножидкости рассчитывается в соответствии с уравнением [12]:

$$\eta_{nf} = \frac{\eta_{bf}}{1 - 34.87 \cdot \left(\frac{d_p}{d_t} \right)^{-0.3} \cdot \phi^{1.03}}, \quad (6)$$

$$d_t = 0.1 \cdot \left(\frac{6 \cdot M}{N \cdot \pi \cdot \rho_{bf}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (7)$$

где η_{bf} — динамическая вязкость базовой жидкости; d_p — диаметр наночастиц; d_t — молекулярный диаметр базовой жидкости; N — число Авогадро; M — молекулярная масса базовой жидкости.

Для определения теплоемкости наножидкости используется модель Udawattha и Narayana [13]:

$$\begin{aligned} \lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left(1 + \frac{n_t \phi_e (\lambda_p - \lambda_{bf})}{\lambda_p + (n - 1) \lambda_{bf} - \phi_e (\lambda_p - \lambda_{bf})} \right) + \\ + \frac{\lambda_{bf} C_{pbf} \lambda_p d_p V_B}{\eta_{bf}} \left(\frac{\phi^{0.0009T+0.25}}{200} \right) \sqrt{\frac{\pi}{18}}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$V_B = \sqrt{\frac{18 \cdot K_B \cdot T_{nf}}{\pi \cdot \rho_p \cdot d_p^3}}, \quad (9)$$

$$\phi_e = \phi \left(1 + \frac{h}{r_p} \right)^3, \quad (10)$$

где λ_{bf} — теплоемкость базовой жидкости; λ_p — теплоемкость материала наночастиц; n_t — коэффициент формы наночастиц; K_B — постоянная Больцмана; r_p — радиус наночастицы; ϕ_e — эффективная объемная доля; V_B — броуновское движение; h — толщина нанослоя.

2.2. Двухфазное численное моделирование

При двухфазном моделировании наночастицы и базовая жидкость рассматриваются как две разные (твердая и жидкая) фазы, в том числе с разным импульсом. В этом моделировании может быть использована система Лагранжа или Эйлера. Однако двухфазное моделирование является сложной задачей, так как нелегко решить два набора управляющих уравнений.

Существует два способа моделирования потока твердых и жидких смесей. При малой объемной доле твердого вещества наиболее подходящим способом является модель Лагранжа — Эйлера. Для исследования больших объемных долей твердых частиц подходящим методом является модель Эйлера — Эйлера.

2.2.1. Модель Эйлера — Эйлера

В данном методе скорости фаз различаются, а распределение наночастиц неоднородно. Наряду с уравнениями неразрывности, импульса и энергии, модель смеси также включает уравнение для определения концентрации вторичной фазы.

Уравнение неразрывности:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} \vec{v}) = 0. \quad (11)$$

Уравнение импульса:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho_{nf} \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\eta_{nf} (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \right] + \\ + \rho_{nf} \vec{g} + \nabla \cdot \left(\sum_{s=1}^n \phi_s \rho_s \vec{v}_{dr,s} \vec{v}_{dr,s} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнение энергии:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left[\sum_{s=1}^n \phi_s \vec{v}_s (\rho_s H_s + p) \right] = \\ = \nabla \cdot \left(\sum_{s=1}^n \phi_s (\lambda_{nf} + \lambda_t) \nabla T_{nf} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Уравнение объемной концентрации:

$$\nabla \cdot (\phi_p \rho_p \vec{v}) = -\nabla \cdot (\phi_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}). \quad (14)$$

В уравнении (13): H_s — значимая энтальпия для фазы s ; λ_t — турбулентная теплопроводность. Здесь $\vec{v}$, ρ_{nf} , η_{nf} и λ_{nf} определяются как

$$\vec{v} = \sum_{s=1}^n \frac{\phi_s \rho_s \vec{v}_s}{\rho_{nf}}, \quad (15)$$

$$\rho_{nf} = \sum_{s=1}^n \phi_s \rho_s, \quad (16)$$

$$\eta_{nf} = \sum_{s=1}^n \phi_s \eta_s, \quad (17)$$

$$\lambda_{nf} = \sum_{s=1}^n \phi_s \lambda_s. \quad (18)$$

Скорость сдвига $\vec{v}_{dr,s}$ для вторичной фазы s определяется как

$$\vec{v}_{dr,s} = \vec{v}_s - \vec{v}. \quad (19)$$

Относительная скорость скольжения определяется как скорость вторичной фазы s по отношению к скорости первичной фазы f

$$\vec{v}_{sf} = \vec{v}_s - \vec{v}_f. \quad (20)$$

Тогда скорость сдвига, связанная с относительной скоростью, становится:

$$\vec{v}_{dr,s} = \vec{v}_{sf} - \sum_{k=1}^n \vec{v}_{fk} \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_{nf}}. \quad (21)$$

Уравнения для расчета относительной скорости $\vec{v}_{pf}$ [14] и функции сопротивления f_{drag} [7]:

$$\vec{v}_{pf} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f f_{drag}} \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \vec{a}, \quad (22)$$

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687} & \text{Re}_p \leq 1000 \\ 0.0183 \text{Re}_p & \text{Re}_p > 1000 \end{cases}. \quad (23)$$

Ускорение частиц вторичной фазы $\vec{a}$ определяется по формуле:

$$\vec{a} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}. \quad (24)$$

Кроме того, подъемная сила, которая учитывается для случая смешанной конвекции, в уравнениях импульса (2) и (12), приближенно равна

$$(\rho_{nf} - \rho_0) g \approx -\rho_0 \beta (T_{nf} - T_0) g, \quad (25)$$

где β — коэффициент теплового расширения жидкости; ρ_0 и T_0 — контрольные плотность и температура.

2.2.2. Модель Лагранжа–Эйлера (дискретная фазовая модель)

В данной модели жидкая фаза описывается как сплошная среда с использованием усредненных по времени уравнений неразрывности, импульса и энергии. Твердая фаза, в свою очередь, характеризуется отдельными уравнениями импульса и энергии. Модель также учитывает различие в скоростях фаз. При этом локальное тепловое равновесие между жидкостью и твердыми частицами не принимается во внимание. Данную модель можно использовать при объемной доле твердой фазы не более 10 %.

Управляющие уравнения для модели дискретной фазы представлены далее [7].

Уравнение неразрывности:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} \vec{v}) = 0. \quad (26)$$

Уравнение импульса:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{nf} \nabla \vec{v}) + S_m. \quad (27)$$

Уравнение энергии:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} \vec{v} C p_{nf} T_{nf}) = \nabla \cdot (\lambda_{nf} \nabla T_{nf}) + S_e. \quad (28)$$

Уравнение импульса для частиц в Лагранжевой системе:

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = F_D (\vec{v} - \vec{v}_p) + \frac{\vec{g} (\rho_p - \rho_{nf})}{\rho_p}. \quad (29)$$

Уравнение энергии для частиц в лагранжевой системе:

$$\rho_{nf} C p_{nf} \frac{dT_p}{dt} = \frac{6\alpha}{d_p} (T_{nf} - T_p). \quad (30)$$

Коэффициент сопротивления F_D определяется как [15]:

$$F_D = \frac{18 \eta_{bf}}{\rho_p d_p^2 C_c}. \quad (31)$$

Здесь коэффициент C_c известен как поправка Каннингема, которую можно определить по формуле [16]

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda_{mp}}{d_p} \left(1,257 + 0,4e^{-(1,1d_p/2\lambda_{mp})} \right). \quad (32)$$

Кроме того, параметры S_m и S_e определяются как [15]

$$S_m = \sum_{np} \frac{m_p}{\delta v} \frac{d\vec{v}_p}{dt}, \quad (33)$$

$$S_e = \sum_{np} \frac{m_p C p_p}{\delta v} \frac{dT_p}{dt}. \quad (34)$$

В уравнениях (29–34): $\vec{v}_p$, T_p и m_p — скорость, температура и масса наночастиц соответственно; α — коэффициент теплоотдачи; λ_{mp} — средняя длина свободного пробега наночастиц.

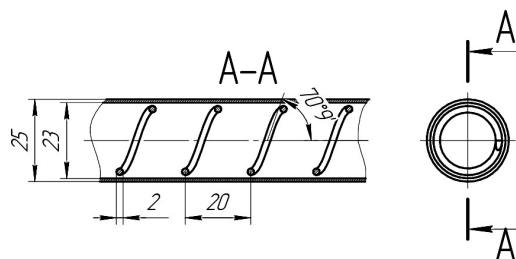


Рис. 2. Продольный разрез и геометрические характеристики проволочного спирального турбулизатора
Fig. 2. Longitudinal section and geometric features of a spiral wire turbulator

Результаты экспериментов

В качестве объекта исследования в данной работе принят поглощающий солнечные лучи элемент КПСК, а именно абсорбирующая (поглощающая) трубка, исследуемая как с проволочным спиральным турбулизатором, так и без него. Трубка медная с размерами — $\varnothing 25 \times 1$ мм, длиной — 1250 мм. Проволочный спиральный турбулизатор выполнен из медной проволоки $\varnothing 2$ мм на всю длину медной трубки, с шагом витков 20 мм и наклоном $70^\circ 9'$. Основные геометрические характеристики и продольный разрез трубки с турбулизатором представлены на рис. 2. В качестве теплоносителя в расчетных экспериментах использовались — чистая вода и наножидкость на основе воды с наночастицами Al_2O_3 объемной концентрацией 1 %. Температура теплоносителя на входе в поглощающую трубку КПСК

во всех расчетных экспериментах принималась — $20,05^\circ\text{C}$.

В данном исследовании теплообменных процессов использовался однофазный метод моделирования, так как он требует меньших вычислительных мощностей компьютера и подходит под заданную концентрацию наночастиц в наножидкости. Все расчеты проводились в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation. Теплофизические свойства для воды взяты из предустановленной базы данных программы. Также в базу данных веществ программы был добавлен теплоноситель — наножидкость вода- Al_2O_3 с температурозависимыми теплофизическими свойствами, которые были рассчитаны по формулам (4–7). Размер наночастиц Al_2O_3 , при расчете теплофизических свойств, принят — 50 нм. Значения основных теплофизических свойств наножидкости представлены в виде графиков из программы на рис. 3. В качестве источника теплоты была задана «мощность тепловыделения» — 800 Вт на лучевоспринимающую поверхность трубки.

На рис. 4 представлены результаты трех расчетных исследований при течении: воды в гладкой трубке; наножидкости вода- Al_2O_3 в гладкой трубке; наножидкости вода- Al_2O_3 в трубке с турбулизатором. На данном рисунке можно увидеть распределение температуры в поперечных сечениях поглощающей трубки на расстоянии 50, 625 и 1240 мм от входа теплоносителя, при массовом расходе теплоносителя — 0,6221 кг/с.

Результаты расчетов при ламинарном течении жидкостей в гладкой трубке изображены на рис. 5. Также представлено распределение температуры

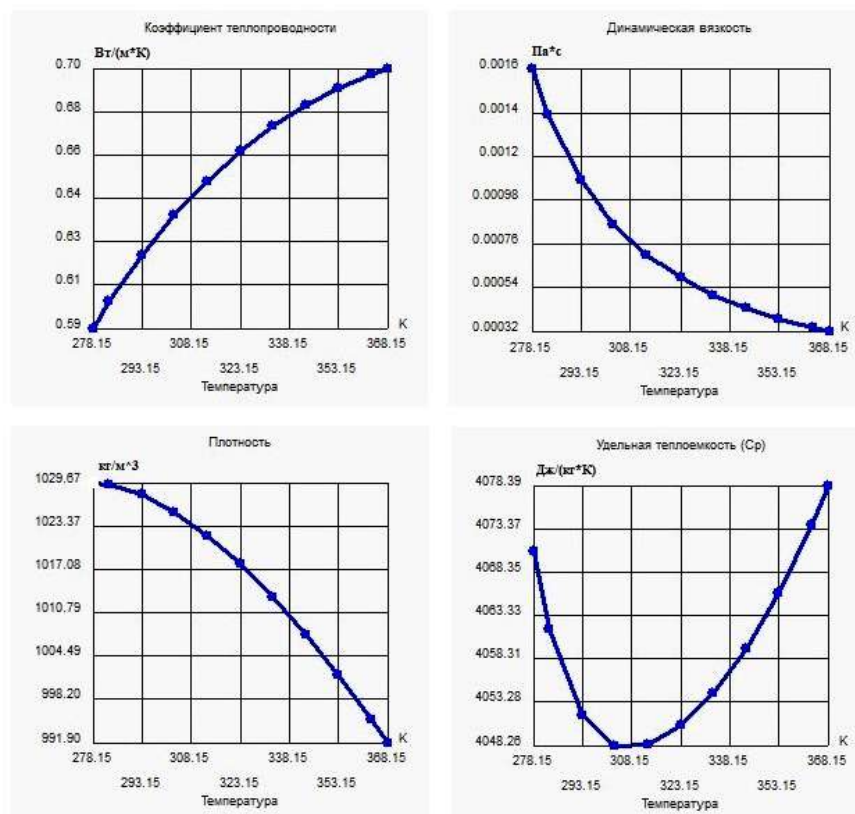


Рис. 3. Графики основных теплофизических свойств наножидкости вода- Al_2O_3 (1%) в зависимости от температуры
Fig. 3. Graphs of the main thermophysical properties of nanofluid water- Al_2O_3 (1%) by temperature

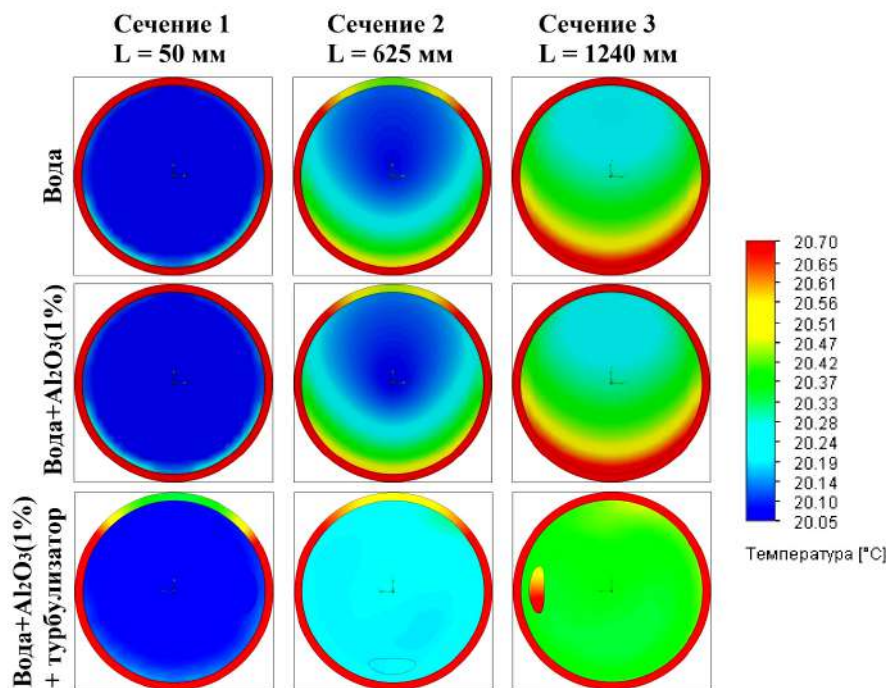


Рис. 4. Распределение температуры в поперечных сечениях поглощающей трубки на расстоянии L от входа теплоносителя при массовом расходе теплоносителя 0,6221 кг/с
Fig. 4. Temperature distribution in the cross sections of the absorption tube at the L distance from the heat thermal fluid inlet, with the 0.6221 kg/s mass flow rate

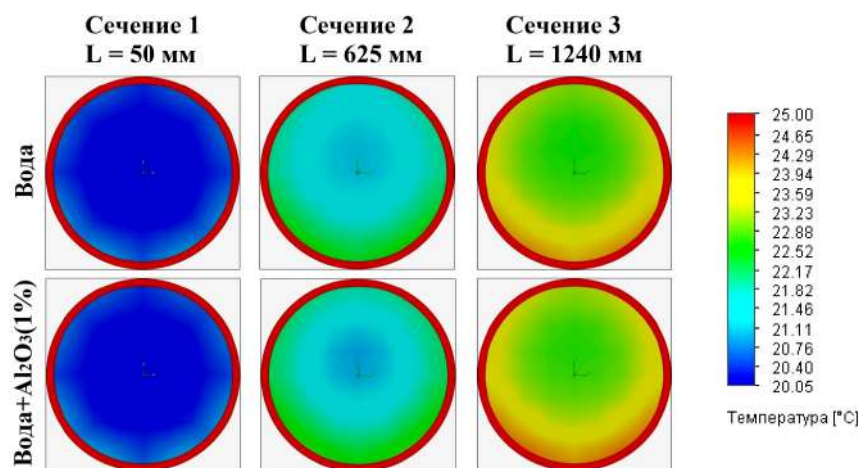


Рис. 5. Распределение температуры в поперечных сечениях поглощающей трубки на расстоянии L от входа теплоносителя при массовом расходе теплоносителя 0,06221 кг/с
Fig. 5. Temperature distribution in the cross sections of the absorption tube at the L distance from the heat thermal fluid inlet, with the 0.06221 kg/s mass flow rate

в поперечных сечениях поглощающей трубки на расстоянии 50, 625 и 1240 мм от входа теплоносителя, но при массовом расходе теплоносителя — 0,06221 кг/с.

Распределение температуры в поперечных сечениях металлических стенок поглощающей трубки на расстоянии 50, 625 и 1240 мм от входа теплоносителя, при массовом расходе теплоносителя — 0,6221 кг/с, представлено на рис. 6.

Распределение температуры в продольном сечении поглощающей трубки без турбулизатора, при массовом расходе теплоносителя (вода- Al_2O_3 (1%) — 0,6221 кг/с, изображено на рис. 7, а с турбулизатором — на рис. 8.

На рис. 9 представлены траектории потока течения наножидкости вода- Al_2O_3 в продольном сечении поглощающей трубки с турбулизатором.

Обсуждение результатов

Полученные в результате расчетных экспериментов данные показывают, что в гладкой трубке и теплоносителе имеется неравномерное распределение температур. Наиболее теплонапряженным участком является та часть поглощающей трубки, куда фокусируются солнечные лучи. На рис. 4 видно, что при расходе теплоносителя 0,6221 кг/с (что соответствует скорости движения теплоносителя ~ 1,5 м/с) как для воды, так и для наножидкости вода-

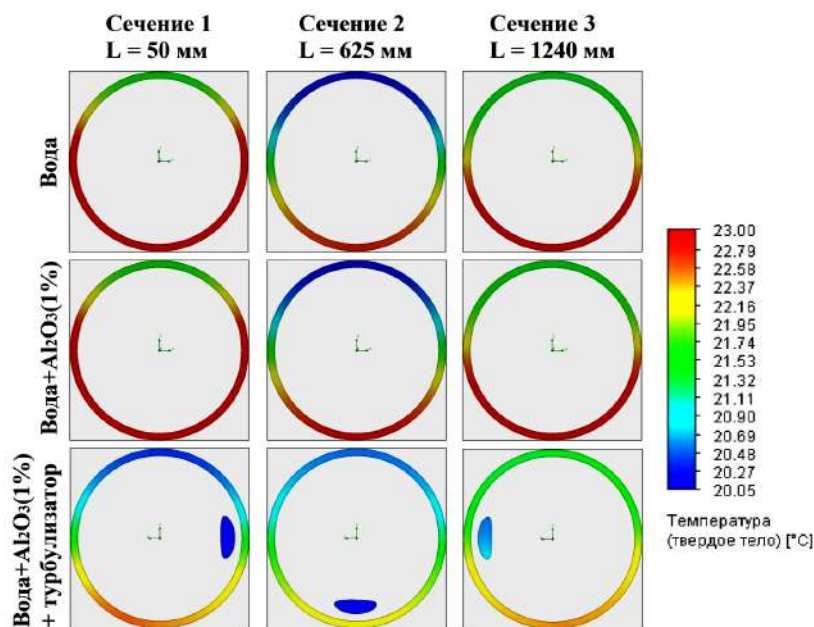


Рис. 6. Распределение температуры в поперечных сечениях металлических стенок поглощающей трубки на расстоянии L от входа теплоносителя при массовом расходе теплоносителя — 0,6221 кг/с

Fig. 6. Temperature distribution in the cross sections of the absorption tube at the L distance from the heat thermal fluid inlet, with the 0.6221 kg/s mass flow rate

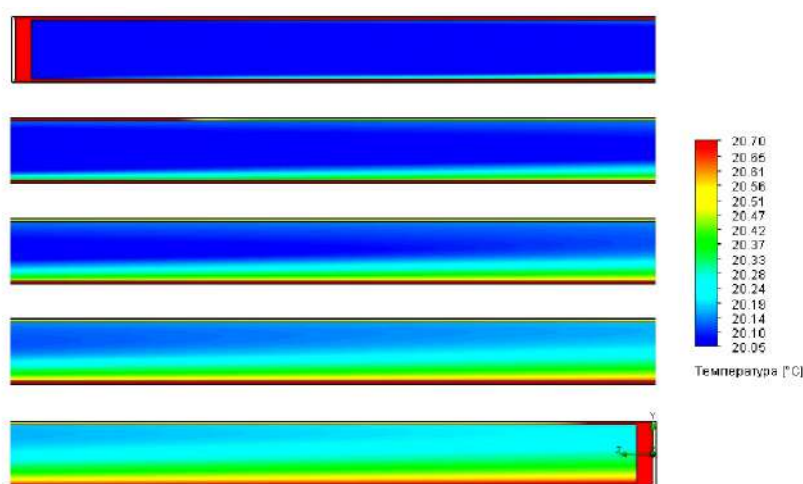


Рис. 7. Распределение температуры в продольном сечении поглощающей трубки без турбулизатора при массовом расходе теплоносителя 0,6221 кг/с (вода- Al_2O_3 (1%))

Fig. 7. Temperature distribution in the longitudinal section of the absorption tube without turbulator, with the 0.6221 kg/s mass flow rate of the heat thermal fluid (water- Al_2O_3 (1%))

Al_2O_3 , картина распределения температур практически одинакова, имеются незначительные отличия. Данное явление оказывает негативное действие на эффективность КПСК, так как из-за большей разницы температур окружающей среды и поверхности поглощающей трубки увеличиваются тепловые потери в окружающую среду, а также уменьшается количество теплоты, принимаемое трубкой излучением. Исправить указанную ситуацию помогает использование проволочного спирального турбулизатора. Как видно на рис. 4, благодаря турбулизатору удастся добиться равномерного распределения температур теплоносителя в поперечном сечении. Металл поглощающей трубки также охлаждается более эффективно с турбулизатором (рис. 6).

Продольное сечение гладкой трубки с наножидкостью в качестве теплоносителя (рис. 7) наглядно показывает неравномерность температурного распределения по длине трубки. При использовании турбулизатора пропадает резкий температурный градиент, а наножидкость прогревается равномерно на протяжении всей длины трубки (рис. 8).

Вышеописанный эффект от применения турбулизатора достигается благодаря закручиванию части потока жидкости, которая движется вдоль стенок поглощающей трубки. Наглядно, это закручивание потока можно увидеть на рис. 9.

При низкой скорости течения теплоносителя (~0,15 м/с) в гладкой трубке наблюдается более плавное распределение температур в попереч-

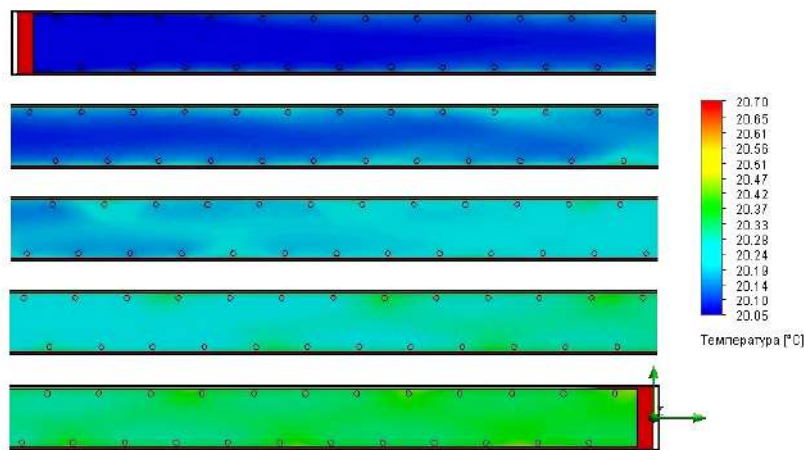


Рис. 8. Распределение температуры в продольном сечении поглощающей трубки с турбулизатором при массовом расходе теплоносителя 0,6221 кг/с (вода- Al_2O_3 (1%))
Fig. 8. Temperature distribution in the longitudinal section of the absorbing tube without turbulator, with the 0.6221 kg/s mass flow rate of the heat thermal fluid (water- Al_2O_3 (1%))

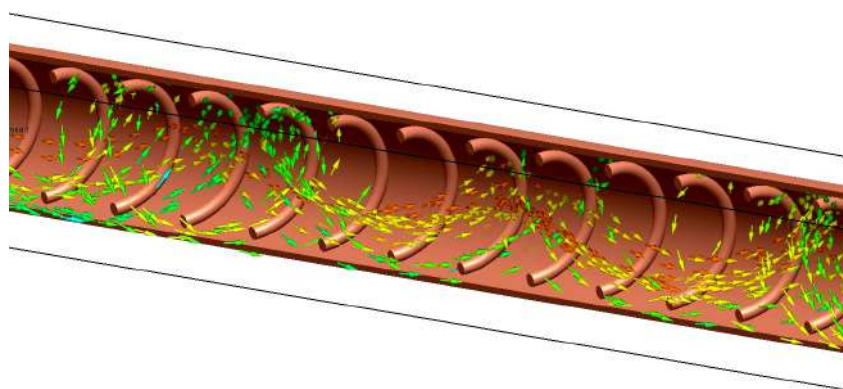


Рис. 9. Траектории движения потока теплоносителя в продольном сечении поглощающей трубки с турбулизатором
Fig. 9. Trajectories of the heat thermal fluid flow in the longitudinal section of the absorbing tube with a turbulator

ном сечении как для воды, так и для наножидкости вода- Al_2O_3 (рис. 5). Однако возрастает температура металла стенки трубки. Это связано с тем, что при низкой скорости движения теплоносителя уменьшается коэффициент теплоотдачи от стенки поглощающей трубки к теплоносителю, и теплота, за счет теплопроводности металла, относительно равномерно распределяется по всему поперечному сечению трубки.

Выводы и заключение

Для моделирования конвективного теплообмена в поглощающей трубке КПСК с наножидкостью в качестве теплоносителя могут применяться два типа численного моделирования: однофазное и двухфазное.

Однофазная модель рассматривает наноматериал как однородную жидкость с эффективными свойствами и использует дифференциальные уравнения, описывающие сохранение массы, энергии и импульса. Получение точных результатов расчетов с помощью однофазной модели достигается при использовании наиболее подходящих корреляций для эффективных характеристик наноматериала и небольшой объемной доле наночастиц в наножидкости (менее 5 %).

Двухфазное моделирование учитывает неоднородность наножидкости, рассматривая отдельно базовую жидкость (базовая среда) и наночастицы (дисперсная фаза). Такой подход позволяет более точно описать сложные физические эффекты, такие как броуновское движение наночастиц; термофорез (движение частиц из-за градиента температуры); агломерация и седиментация (эффект Соре). Двухфазный подход к моделированию оправдан, если объемная концентрация наночастиц в наножидкости превышает 5 %, а также в случаях, когда необходимо учитывать микроскопические эффекты или когда однофазная модель дает неточные результаты. Двухфазное моделирование позволяет более точно описывать теплообмен в наножидкостях, но требует значительно больших вычислительных ресурсов.

В работе при моделировании теплообменных процессов был использован однофазный подход, так как объемная концентрация наночастиц в исследуемой наножидкости (вода- Al_2O_3) была равна 1 %.

В статье представлены результаты расчётных экспериментов по исследованию процессов теплообмена, протекающих в поглощающей трубке КПСК с наножидкостью в качестве теплоносителя.

При ламинарном течении жидкости стенки трубки значительно перегреваются относительно теплоносителя. Однако температурное распределение в объеме жидкости достаточно плавное. При турбулентном течении теплоносителя градиент температурного распределения более резкий. Использование турбулизатора в поглощающей трубке КПСК позволяет значительно снизить максимальную температуру стенки металла трубки, а также приводит к более плавному температурному распределению в объеме теплоносителя. Данные эффекты позволяют повысить тепловую эффективность КПСК.

Результаты исследования показывают эффективность комбинации двух пассивных методов интенсификации теплообмена в КПСК, что служит предпосылками к созданию высокоэффективного солнечного коллектора с модифицированным теплоносителем с улучшенными теплофизическими свойствами.

Список источников / References

1. Slobodina E. N., Mikhailov A. G. Application peculiarities of the higherature fluids containing nanoparticles in gas-tube boilers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1652. P. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1652/1/012037.
2. Слободина Е. Н., Михайлов А. Г., Гасс Е. А. Экспериментальные и расчетные исследования процесса кипения наножидкости // Известия Транссиба. 2023. № 1 (53). С. 103–109. EDN: NYYGES.
- Slobodina E. N., Mikhaylov A. G., Gass E. A. Eksperimental'nyye i raschetnyye issledovaniya protsessa kipeniya nanozhidkosti [Experimental and computational studies of the nanofluidic boiling process]. *Izvestiya Transsiba. Journal of Transsib Railway Studies*. 2023. No. 1 (53). P. 103–109. EDN: NYYGES. (In Russ.).
3. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Краснолуцкий С. Л. Физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19, № 1. С. 75–83. EDN: VSMFOJ.
- Rudyak V. Ya., Minakov A. V., Krasnolutskiy S. L. Fizika i mekhanika protsessov teploobmena v techeniyakh nanozhidkostey [Physics and mechanics of heat exchange processes in nanofluid flows]. *Fizicheskaya mezomekhanika. Physical Mesomechanics*. 2016. Vol. 19, no. 1. P. 75–83. EDN: VSMFOJ. (In Russ.).
4. Maxwell J. C. A. Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford, 1873. Vol. 1. 425 p.
5. Hamilton R. L., Crosser O. K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1962. Vol. 1, no. 3. P. 187–191. DOI: 10.1021/i160003a005.
6. Bruggeman D. A. G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Annalen Der Physik*. 2006. Vol. 416, no. 7. P. 636–664. DOI: 10.1002/andp.19354160705.
7. Yu W., Choi S. U. S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated maxwell model. *Journal of Nanoparticle Research*. 2003. Vol. 5. P. 167–171. DOI: 10.1023/a:1024438603801.
8. Xue Q., Xu W. M. A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells. *Materials Chemistry and Physics*. 2005. Vol. 90. P. 298–301. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2004.05.029.
9. Xuan Y., Li Q., Hu W. Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. *AIChE Journal*. 2003. Vol. 49, no. 4. P. 1038–1043. DOI: 10.1002/aic.690490420.
10. Koo J., Kleinstreuer C. A new thermal conductivity model for nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*. 2004. Vol. 6. P. 577–588. DOI: 10.1007/s11051-004-3170-5.
11. Chon C. H., Kihm K. D., Lee S. P. [et al.]. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters*. 2005. Vol. 87, no. 15. P. 153107. DOI: 10.1063/1.2093936.
12. Wang B.-X., Zhou L.-P., Peng X.-F. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46, no. 14. P. 2665–2672. DOI: 10.1016/s0017-9310(03)00016-4.
13. Udawattha D. S., Narayana M. Development of a Model for Predicting the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: A Reliable Approach for Nanofluids Containing Spherical Nanoparticles. *Journal of Nanofluids*. 2018. Vol. 7, no. 1. P. 129–140. DOI: 10.1166/jon.2018.1428.
14. Pak B. C., Choi Y. I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*. 1998. Vol. 11, no. 2. P. 151–170. DOI: 10.1080/08916159808946559.
15. Jang S. P., Choi S. U. S. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. *Applied Physics Letters*. 2004. Vol. 84, no. 21. P. 4316–4318. DOI: 10.1063/1.1756684.
16. Timofeeva E. V., Moravek M. R., Singh D. Improving the heat transfer efficiency of synthetic oil with silica nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 364, no. 1. P. 71–79. DOI: 10.1016/j.jcis.2011.08.004.

ВДОВИН Олег Владиславович, аспирант кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 8721-5737

AuthorID (РИНЦ): 939315

Адрес для переписки: oleg95_15.03@mail.ru

СЛОБОДИНА Екатерина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3785-9045

AuthorID (РИНЦ): 763109

ORCID: 0000-0002-5168-2502

ResearcherID: R-7340-2016

Адрес для переписки: slobodina_e@mail.ru

МИХАЙЛОВ Андрей Гаррьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7337-8036

AuthorID (РИНЦ): 385534

AuthorID (SCOPUS): 56503044200

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 26.06.2025; одобрена после рецензирования 04.09.2025; принята к публикации 23.09.2025.

VDOVIN Oleg Vladislavovich, Postgraduate of the Heat Power Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 8721-5737

AuthorID (RSCI): 939315

Correspondence address: oleg95_15.03@mail.ru

SLOBODINA Ekaterina Nikolaevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Heat Power Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3785-9045

AuthorID (RSCI): 763109

ORCID: 0000-0002-5168-2502

ResearcherID: R-7340-2016

Correspondence address: slobodina_e@mail.ru

MIKHAILOV Andrey Garievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Heat Power Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 7337-8036

AuthorID (RSCI): 385534

AuthorID (SCOPUS): 56503044200

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 26.06.2025; approved after reviewing 04.09.2025; accepted for publication 23.09.2025.