

УДК 519.6:004.942
DOI

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В НАНОЖИДКОСТНОМ СОЛНЕЧНОМ КОЛЛЕКТОРЕ ПРЯМОГО ПОГЛОЩЕНИЯ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ

¹Манжула И.С., ²Минаев В.А., ³Вихтенко Э.М. ORCID ID 0000-0002-7152-2311

¹Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный юридический институт Министерства внутренних дел России
имени И.Ф. Шилова», Хабаровск, Российская Федерация;

²Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования
«Московский университет Министерства внутренних дел России имени В.Я. Кикотя»,
Москва, Российская Федерация;

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Российская Федерация,
e-mail: 004184@togudv.ru

Растущая потребность в устойчивой энергетике стимулирует поиск путей повышения эффективности современных солнечных коллекторов. Одним из таких решений является использование наножидкостей в качестве теплоносителя коллектора. Цель исследования – разработка математической модели тепломассопереноса в наножидкостном солнечном коллекторе прямого поглощения при установившемся течении, численное исследование влияния параметров наножидкостей на характеристики солнечного коллектора. В качестве материалов и методов исследования представлена конечно-разностная формулировка краевой задачи на основе уравнений Навье – Стокса, энергии и неразрывности, учитывающая температурную зависимость динамической вязкости наножидкости и спектральное поглощение излучения по закону Бугера – Ламберта – Бера. В качестве рабочей среды рассматривается наножидкость на основе этиленгликоля с наночастицами алюминия, характеризующаяся выраженной термозависимостью реологических свойств. Численное решение осуществляется методом операторного расщепления по физическим процессам. Результаты и их обсуждение показали, что снижение вязкости в зонах локального нагрева приводит к заметному увеличению локальных скоростей, формируя тесную связь между температурным и скоростным полями даже при отсутствии гравитационной конвекции. Полученные результаты подтверждают важность учета немонотонных теплофизических свойств наножидкостей для более точного прогнозирования эффективности солнечных коллекторов прямого поглощения и открывают перспективы для качественного управления такими системами, в том числе с использованием гибридных наножидкостей.

Ключевые слова: наножидкость, солнечный коллектор прямого поглощения, тепломассоперенос, температурная зависимость вязкости, математическое моделирование, численный эксперимент

MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN A NANOFLUID DIRECT ABSORPTION SOLAR COLLECTOR TAKING INTO ACCOUNT THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF VISCOSITY

¹Manzhula I.S., ²Minaev V.A., ³Vikhtenko E.M. ORCID ID 0000-0002-7152-2311

¹Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Far Eastern Law Institute
of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after I.F. Shilov”, Khabarovsk, Russian Federation;

²Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Moscow University
of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after V.Ya. Kikot”, Moscow, Russian Federation;

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Pacific State University”,
Khabarovsk, Russian Federation, e-mail: 004184@togudv.ru

The growing need for sustainable energy is driving the search for ways to improve the efficiency of modern solar collectors. One of such solutions is the use of nanofluids as a collector coolant. The purpose of the study is to develop a mathematical model of heat and mass transfer in a nanofluidic solar collector of direct absorption at steady flow, and to numerically study the effect of nanofluidic parameters on the characteristics of a solar collector. A finite-difference formulation of the boundary value problem based on the Navier-Stokes equations, energy and continuity is presented as materials and research methods, taking into account the temperature dependence of the dynamic viscosity of the nanofluid and the spectral absorption of radiation according to the Bouguer–Lambert–Baer law. An ethylene glycol-based nanofluid with aluminum nanoparticles, characterized by a pronounced thermal dependence of rheological properties, is considered as a working medium. The numerical solution is carried out by the method of operator splitting according to physical processes. The results and their discussion showed that a decrease in viscosity in local heating zones leads to a noticeable increase in local velocities, forming a close relationship between temperature and velocity fields even in the absence of gravitational convection. The results obtained confirm the importance of taking into account the nonmonotonic thermophysical properties of nanofluids for more accurate forecasting of the efficiency of direct absorption solar collectors and open up prospects for high-quality management of such systems, including using hybrid nanofluids.

Keywords: nanofluid, direct absorption solar collector, heat and mass transfer, temperature dependence of viscosity, mathematical modeling, numerical experiment

Введение

Растущая потребность в устойчивых энергетических решениях в последние годы обусловила повышенный интерес к солнечной энергии. Однако эффективность традиционных солнечных тепловых коллекторов пока уступает конкурирующим технологиям, что стимулирует поиск путей их совершенствования. Одним из перспективных направлений выступает применение наножидкостей – суспензий наночастиц в базовой жидкости – в качестве теплоносителя в коллекторах прямого поглощения (НКПП) [1; 2]. Такие системы совмещают поглощение солнечного излучения и его транспортировку, что потенциально повышает общую эффективность преобразования энергии [3].

Для оптимизации НКПП необходимы детальные исследования распределения солнечного излучения внутри рабочего объема и его зависимости от оптических свойств как базовой жидкости, так и наночастиц. Математическое моделирование позволяет эффективно анализировать эти процессы, сокращая затраты на экспериментальную отработку конструкций [4]. В литературе уже предложены модели, учитывающие влияние объемной доли наночастиц, геометрии коллектора и условий течения на тепловую производительность [5]. Вместе с тем, несмотря на активные исследования, промышленное внедрение НКПП сдерживается проблемами стабильности наножидкостей, их стоимости и недостаточной предсказуемости характеристик в реальных условиях [6]. В связи с этим численный анализ распределения интенсивности солнечного излучения в НКПП остается актуальной задачей, которой и посвящена настоящая работа.

Цель исследования – разработка математической модели, описывающей процессы теплопереноса в наножидкостном солнечном коллекторе прямого поглощения при установившемся течении рабочей среды с учетом температурной зависимости динамической вязкости наножидкости, а также численное исследование влияния параметров наножидкостей на характеристики солнечного коллектора.

Материалы и методы исследования

В работе рассматривается плоский солнечный коллектор прямого поглощения, заполненный наножидкостью на основе этиленгликоля с диспергированными наночастицами алюминия. Выбор этиленгликоля в качестве базовой жидкости обусловлен его выраженной температурной зависимостью теплофизических свойств, в частно-

сти динамической вязкости, что позволяет более полно учесть нелинейные эффекты при моделировании теплопереноса [7, с. 253–281].

Математическая модель основана на уравнениях теплопроводности, стационарного уравнения Навье – Стокса и уравнения несжимаемости. Поглощение солнечного излучения наножидкостью описывается на основе закона Бугера – Ламберта – Бера, согласно которому ослабление интенсивности излучения определенной длины волны λ при прохождении через поглощающую среду моделируется обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка. Соответствующая задача формулируется как задача Коши, а суммарное значение величины интенсивности излучения вычисляется интегрированием по всему спектру излучения [8].

Температурная зависимость динамической вязкости $\mu(T)$ задается посредством аппроксимации экспериментальных значений с применением метода наименьших квадратов и подбора вида аппроксимационных функций, а также методов регрессионного и интерполяционного анализа.

Граничные условия включают:

- заданную скорость на входе в коллектор;
- условия прилипания на твердых стенках;
- тепловые условия – заданный тепловой поток на верхней прозрачной границе (моделирующей поглощение солнечной радиации) и теплоизоляцию на остальных стенках, либо заданный коэффициент теплоотдачи при наличии внешнего охлаждения.

Такой подход позволяет корректно описать взаимосвязь между оптическим поглощением, гидродинамикой и теплопередачей в НКПП с учетом реологических особенностей наножидкости, что согласуется с методологиями, применяемыми в современных исследованиях подобных систем [9; 10].

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим прямоугольную область $D = \{0 < x < L, 0 < y < H\}$, где L и H – длина и высота солнечного коллектора (рис. 1), причем $L \gg H$.

Рассмотрим задачу определения скорости $V = (v, u)$ рабочей жидкости в тонком коллекторе. Считаем, что движение жидкости в коллекторе установилось, скорость течения не зависит от времени. Для построения математической модели используем стационарное уравнение Навье – Стокса и уравнение несжимаемости, которые запишем в двумерной покомпонентной форме для составляющих вектора скорости в декартовой системе координат x, y .

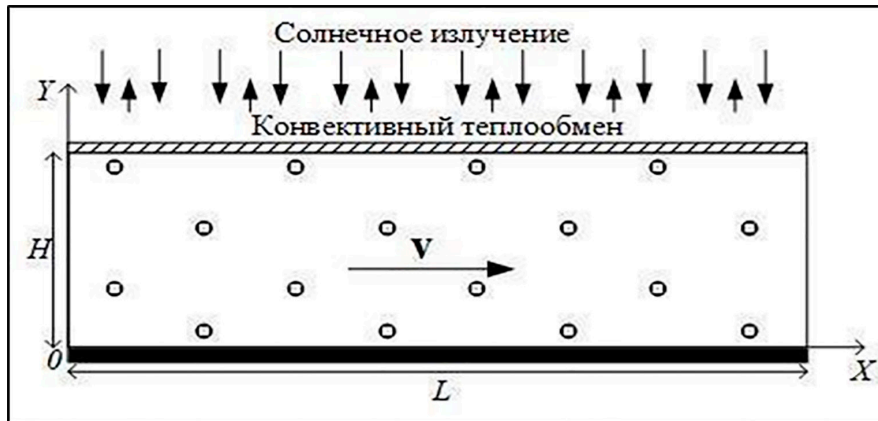


Рис. 1. Упрощенная схема солнечного коллектора
Примечание: составлен авторами на основе источника [2]

Уравнение движения в проекции на ось Ox :

$$v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Уравнение движения в проекции на ось Oy :

$$v \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2)$$

Уравнения несжимаемости:

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Здесь p – давление, ρ – плотность жидкости, μ – кинематическая вязкость.

Граничные условия в соответствии с физической постановкой зададим следующим образом:

$$V|_{x=0} = V_0, \quad V|_{x=L} = \frac{\partial V}{\partial x}, \quad y \in [0, H], \quad (4)$$

$$V|_{y=0} = 0, \quad V|_{y=H} = 0, \quad x \in [0, L], \quad (5)$$

где L и H – соответственно длина и ширина НКПП, $V_0 = (v_0, 0)$, $v_0 = \frac{y(p_{in} - p_{out})(H - y)}{2\mu L}$ – аналитическое выражение для продольной скорости жидкости в солнечном коллекторе прямого поглощения.

Для однозначного определения давления используется соотношение

$$\int_D p(x) dx = 0. \quad (6)$$

Соотношения (1)–(6) позволяют записать задачу, описывающую процессы теплопереноса в солнечном коллекторе прямого поглощения, в виде следующей краевой задачи:

$$\tilde{v}_x \frac{\partial T}{\partial x} + \tilde{v}_y \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = f_\theta, \quad x \in (0, L), \quad y \in (0, H), \quad (7)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad x \in (0, L), \quad y \in (0, H), \quad (8)$$

$$v \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad x \in (0, L), \quad y \in (0, H), \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad x \in (0, L), \quad y \in (0, H), \quad (10)$$

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial y} - \sigma_0 (T - T_e) + \alpha I_\theta \right) \Big|_{y=0} = 0, \quad \left(k \frac{\partial T}{\partial y} + \sigma_H (T - T_e) \right) \Big|_{y=H} = 0, \quad x \in [0, L], \quad (11)$$

$$T|_{x=0} = T_{in}, \quad y \in [0, H], \quad (12)$$

$$x = 0 : v = v_0, u = 0; \quad x = L : \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (13)$$

$$y = 0 : v = 0, u = 0; \quad y = H : v = 0, u = 0, \quad (14)$$

$$\int_D p(x) dx = 0, \quad (15)$$

где $\tilde{v}_x = c_v v$, $\tilde{v}_y = c_v u$; I_θ и f_θ задаются выражениями, представленными в работе [11]; T_e – температура окружающей среды; σ_0 , σ_H – коэффициенты теплоотдачи на нижней и на верхней границах коллектора соответственно.

Построим для задачи (7)–(15) конечно-разностную схему.

Нанесем на область $\Omega = \{0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H\}$ равномерную сетку

$$\bar{\omega}_h = \bar{\omega}_{h_1} \times \bar{\omega}_{h_2}, \quad \bar{\omega}_{h_1} = \{x_i = ih_1, i = 0, 1, \dots, N\}, \quad \bar{\omega}_{h_2} = \{y_j = jh_2, j = 0, 1, \dots, M\};$$

$h_1 = L/N$, $h_2 = H/M$ – шаги сетки $\bar{\omega}_h$ по пространственным переменным x и y ; N , M – натуральные числа; $h = \{h_1, h_2\}$.

Для упрощения записи будем использовать следующие обозначения для сеточных функций и выражений, содержащих конечно-разностные производные

$$F_j^i = F(x_i, y_j), \quad F^i = F(x_i, y), \quad F_j = F(x, y_j),$$

$$F_{\underline{\alpha}l} = \frac{(F_l - F_{l-l_\beta})}{h_\beta}, \quad F_{\bar{\alpha}l} = F_{\underline{\alpha}l+l_\beta}, \quad F_{\alpha l} = \frac{(F_{\underline{\alpha}l} + F_{\bar{\alpha}l})}{2}, \quad (a_l F_{\underline{\alpha}l})_{\bar{\alpha}} = \frac{(a_{l+l_\beta} F_{\bar{\alpha}l} - a_l F_{\underline{\alpha}l})}{h_\beta},$$

где $l = \{i, j\}$, $\alpha = x, y$, $\beta = 1, 2$, $l_1 = \{1, 0\}$, $l_2 = \{0, 1\}$.

Записывая уравнения баланса для элементарных ячеек сеточной области, получаем для задачи (7)–(15) симметричную консервативную конечно-разностную схему, которую с учетом введенных обозначений можно записать в виде системы уравнений

для $i = 0, 1, \dots, N-1, j = 0, 1, \dots, M-1$:

$$\tilde{v}_{x,j} T_{\bar{y}j}^i + \tilde{v}_{y,j} T_{\bar{y}j}^i - (a_j \bar{T}_{\bar{y}j}^i)_{\bar{y}} = \varphi_j, \quad (16)$$

$$v_j^i v_{\bar{y}j}^i + u_j^i v_{\bar{y}j}^i + \rho^{-1} p_{\bar{y}j}^i = (2\mu_j^i v_{\bar{y}j}^i)_{\bar{x}} + (\mu_j^i v_{\bar{y}j}^i)_{\bar{y}} + (\mu_j^i u_{\bar{y}j}^i)_{\bar{y}}, \quad (17)$$

$$v_j^i u_{\bar{y}j}^i + u_j^i u_{\bar{y}j}^i + \rho^{-1} p_{\bar{y}j}^i = (\mu_j^i v_{\bar{y}j}^i)_{\bar{x}} + (\mu_j^i u_{\bar{y}j}^i)_{\bar{x}} + (2\mu_j^i u_{\bar{y}j}^i)_{\bar{y}}, \quad (18)$$

$$v_{\bar{y}j}^i + u_{\bar{y}j}^i = 0; \quad (19)$$

для $i = 0, 1, \dots, N-1$:

$$a_1 \bar{T}_{\bar{y}0}^i - \sigma_0 (\bar{T}_0^i - T_e) + \alpha I_{\theta,0} - 0.5h_2 (\tilde{v}_{x,0} T_{\bar{x}0}^i + \tilde{v}_{y,0} T_{\bar{y}0}^i - \varphi_0) = 0, \quad (20)$$

$$a_M \bar{T}_{yM}^i + \sigma_H (\bar{T}_M^i - T_e) + 0.5 h_2 (\tilde{v}_{x,M} T_{xM}^i + \tilde{v}_{y,M} T_{yM}^i - \varphi_M) = 0, \quad (21)$$

$$v_0^i = \tilde{v}_{x,M}^i \tilde{v}_{y,M}^i \quad v_M^i = u_M^i = 0 \quad (22)$$

для $j = 0, 1, \dots, M$:

$$T_j^0 = T_{in}; \quad (23)$$

и для $j = 0, 1, \dots, M-1$:

$$v_j^0 = v_{0j}, \quad u_j^0 = 0, \quad v_{xj}^N = 0, \quad u_{xj}^N = 0.$$

Таблица 1

Теплофизические свойства этиленгликоля

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	Удельная теплоемкость $c_p, \text{Дж / (кг}\cdot\text{K)}$	Кинематическая вязкость $\nu, (\text{м}^2/\text{с})\cdot 10^6$	Теплопроводность $k, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	Число Прандтля Pr
0	1130,1	2 294	26,5	0,242	283,884
20	1116,1	2 382	14,4	0,249	153,747
40	1100,8	2 474	8,5	0,256	90,425
60	1087,1	2 562	5,2	0,260	55,703
80	1077,0	2 650	3,4	0,262	37,037
100	1057,9	2 742	2,5	0,263	27,574

Примечание: составлена авторами на основе источника [14, с. 7–433].

В численных экспериментах в качестве базовой жидкости выбран этиленгликоль. Такой выбор обусловлен рядом нужных термофизических характеристик данного вещества, подтвержденных справочными данными и результатами предшествующих исследований. В частности, анализ показывает, что теплофизические свойства этиленгликоля (включая плотность, динамическую вязкость, теплопроводность и теплоемкость) демонстрируют выраженную зависимость от температуры [7 с. 253–281; 11]. Достаточно сильная температурная чувствительность делает этиленгликоль особенно подходящим веществом для численного моделирования процессов теплопереноса, позволяя выявить и количественно оценить влияние нестационарных и нелинейных эффектов на гидродинамическое и тепловое поведение системы [12; 13]. Поэтому использование этиленгликоля в качестве модельной жидкости повышает информатив-

ность и репрезентативность проводимых вычислительных экспериментов.

Используем данные об основных теплофизических свойствах этиленгликоля, необходимые для расчетов, размещенные в справочнике [14, с. 7–433] (табл. 1).

При проведении численных расчетов применены приближенные аналитические зависимости, полученные на основе данных табл. 1. Для аппроксимации экспериментальных значений применялись метод наименьших квадратов для различных интерполяционных функций, а также методы регрессионного и интерполяционного анализа. Данные подходы позволили построить аппроксимирующие выражения для определения таких теплофизических параметров этиленгликоля, как динамическая вязкость, плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность:

$$\mu = \nu \rho, \quad (25)$$

$$\nu = 26.5 \cdot \exp(-0.03235(T - 273.15) + 8.74 \cdot 10^{-5}(T - 273.15)^2), \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \rho = & -3.57 \cdot 10^{-8}(T - 273.15)^5 + 6.90 \cdot 10^{-6}(T - 273.15)^4 - 4.11 \cdot 10^{-4}(T - 273.15)^3 + \\ & + 7.99 \cdot 10^{-3}(T - 273.15)^2 - 0.745(T - 273.15) + 1130.1, \end{aligned} \quad (27)$$

$$c_v = 2293.8 + 4.42(T - 273.15) + 0.48 \cdot 10^{-3}(T - 273.15)^2, \quad (28)$$

$$k = 25.96(T - 252.82)^{0.00048} - 25.76, \quad (29)$$

$$Pr = c_v \mu / k. \quad (30)$$

Полученные зависимости обеспечивают погрешность не более 0,4% относительно данных, приведенных в табл. 1. При выполнении расчетов с использованием выражений (25)–(30) температура T должна быть представлена в градусах Кельвина. Перевод значений температуры из термодинамической шкалы Кельвина в шкалу Цельсия осуществляется в соответствии с соотношением, учитывающим разность, равную 273,15 градуса.

Исследование физических процессов, протекающих внутри НКПП, проводится с использованием метода расщепления по физическим процессам [15, с. 85–89]. Численное исследование задач для уравнений Навье – Стокса и построение алгоритмов решения на основе расщепления по физическим процессам отражает природу течений и широко используется в современных исследованиях [16; 17].

В рамках настоящего исследования применен метод операторного расщепления для решения задачи тепломассопереноса, заключающийся в декомпозиции исходной

системы уравнений на два последовательных этапа – термодинамический и гидродинамический. Расщепление осуществляется непосредственно на уровне дифференциальных уравнений, записанных в терминах исходных физических переменных, без перехода к вспомогательным или обобщенным величинам.

На термодинамическом этапе решается уравнение энергии с целью определения пространственного распределения температурного поля при заданном поле скоростей. Гидродинамический этап включает моделирование движения рабочей жидкости, в ходе которого рассчитывается поле скоростей под действием градиентов давления и температурных неоднородностей, обуславливающих конвективные потоки.

Решение реализуется в рамках итерационной процедуры, на каждом шаге которой последовательно вычисляются характеристики обоих этапов. Итерационный процесс продолжается до достижения заданной точности сходимости между последовательными приближениями температурного поля:

$$|T_{j,k}^i - T_{j,k-1}^i| < \varepsilon, \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad j = 0, 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, K, \quad (31)$$

где $\varepsilon = C \cdot \min_{i,j,k} |T_{j,k}^i|$, $C = 10^{-6}$, k – номер итерации. Данное условие обеспечивает согласованность полученных результатов с исходной постановкой задачи.

Общая схема решения задачи включает следующие этапы:

1) расчет температурного поля с учетом начальных условий;

2) вычисление значений динамической вязкости в каждой точке расчетной области проводится с использованием температурных зависимостей и аналитических выражений (25)–(30);

3) расчет поля скоростей путем решения системы уравнений (8)–(10), (13)–(15) с учетом полученного распределения динамической вязкости;

4) решение задачи теплопроводности (7), (11), (12), учитывающей как поперечную, так и продольные компоненты вектора скорости течения рабочей жидкости.

Описанные этапы 1–4 повторяются в рамках итерационного процесса до достижения заданной точности.

Для проверки работоспособности математической модели (7)–(15) проведем чис-

ленный эксперимент со следующими исходными данными:

примем высоту солнечного коллектора H и длину L равными 0,02 м и 1 м соответственно;

$T_{in} = 35^\circ\text{C}$ – входная температура наножидкости в солнечном коллекторе;

$T_e = 25^\circ\text{C}$ – температура на верхней стенке;

$\tau_e = 0.9$ – коэффициент пропускания верхней границы НКПП;

$\sigma_0 = \sigma_H \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ – коэффициент теплоотдачи на нижней границе НКПП;

$\sigma_H = 6.43 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ – коэффициент теплоотдачи на верхней границе НКПП, взятый из [2];

G_T – коэффициент пропорциональности, соответствующий интенсивности приходящего солнечного излучения на верхнюю границу коллектора равной 1000 Вт/м^2 ;

$\alpha = 0$ – коэффициент, позволяющий учитывать эффекты отражения и поглощения светового потока на нижней границе, принимающий значения 0 и 1.

Таблица 2

Результаты сходимости итерационного процесса

k	$ T_{j,k}^i - T_{j,k-1}^i $	ε	Достижение устойчивого состояния
0	—	—	—
1	3,0086552E+00	35E-06	нет
2	6,6066468E-02	35E-06	нет
3	2,3994639E-03	35E-06	нет
4	6,6416215E-05	35E-06	нет
5	1,9965515E-06	35E-06	да

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

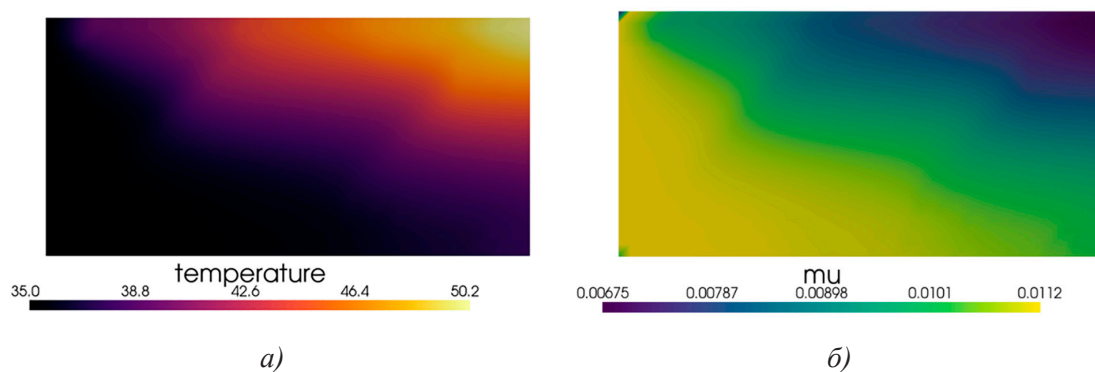


Рис. 2. Результаты численного эксперимента для наножидкости:
 а) распределение температуры по сечению коллектора; б) распределение динамической вязкости
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

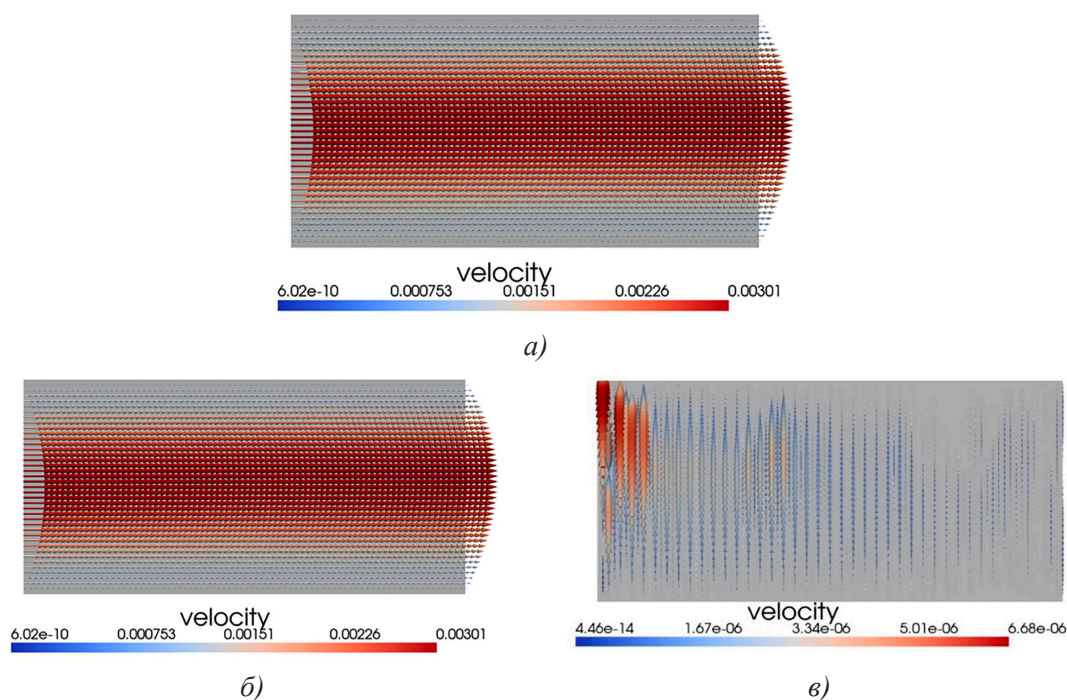


Рис. 3. Результаты моделирования потока наножидкости внутри НКПП:
 а) общий поток скорости; б) компонента скорости v ; в) компонента скорости u
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В качестве материала наночастиц рассмотрим частицы алюминия. Теплофизические характеристики материала наночастиц выбраны из справочной литературы по оптическим константам и теплофизическим свойствам различных материалов [14, с. 7–433], а для базовой жидкости (этиленгликоля) с целью получения наиболее точных численных результатов будем использовать выражения (25)–(30).

Итерационный процесс с использованием критерия (31), запущенный в рамках данного численного эксперимента, сошелся за 5 итераций. В табл. 2 представлены его результаты.

На рис. 2 для наножидкости на основе дистиллированной воды и диспергированных в ней наночастиц алюминия представлены графики распределения температуры (рис. 2, а), а также распределение динамической вязкости (рис. 2, б) по сечению коллектора для последней итерации.

На рис. 3 представлены результаты численного решения краевой задачи, отражающие пространственное распределение векторного поля скорости в расчетной области; а) – общий поток скорости; б) – компонента скорости v ; в) – компонента скорости u . Каждый график сопровождается цветовой шкалой, соответствующей значению гидродинамической переменной в физических или безразмерных единицах, что обеспечивает визуальную интерпретацию структуры течения и позволяет идентифицировать зоны с различной интенсивностью конвективного переноса.

Анализ безразмерных параметров, определяющих динамику и теплообмен в системе, выполнен на основе значений числа Рейнольдса $Re = 150,64$, числа Прандтля $Pr = 190,51$, числа Рэлея $Ra = 1,27$.

Анализ результатов численных экспериментов позволяет сделать следующие выводы:

1. В системе существует температурная зависимость динамической вязкости, что заметно сказывается на профиле скорости. Наблюдается увеличение локальных скоростей в областях с повышенной температурой, где вязкость снижается (рис. 3). Данный эффект является следствием реологической чувствительности наножидкости и подтверждает необходимость учета немонокотонных физических свойств даже в отсутствие объемных сил.

2. Распределение поля скорости (рис. 3) демонстрирует явную связь с температурным полем, обусловленную зависимостью вязкости от температуры. Это свидетельствует о том, что термореологическое взаимодействие играет ключевую роль в фор-

мировании гидродинамической структуры потока даже при отсутствии плавучести.

Дальнейшее развитие исследований в данной области направлено на применение наножидкостей, содержащих смесь наночастиц различных веществ, что позволит получить дополнительный эффект за счет комбинированного влияния различных типов наночастиц на теплопроводность, вязкость и стабильность суспензии. Такой подход открывает возможности для тонкой настройки термофизических свойств наножидкости под конкретные условия эксплуатации, включая управление локальными градиентами скорости и температуры в сложных геометриях.

Заключение

В работе построена математическая модель, позволившая решить задачу расчета параметров тепломассопереноса в наножидкостном солнечном коллекторе прямого поглощения при установившемся течении. Модель включает уравнения сохранения массы, импульса и энергии с учетом температурной зависимости динамической вязкости рабочей среды, а также спектрального поглощения солнечного излучения на основе закона Бугера – Ламберта – Бера. В качестве теплоносителя использована наножидкость, состоящая из этиленгликоля с наночастицами алюминия, что обеспечило выраженную термозависимость ее реологических свойств.

Результаты численных экспериментов показали, что учет температурной зависимости вязкости существенно влияет на гидродинамическую структуру потока: в зонах локального нагрева наблюдается снижение вязкости и, как следствие, увеличение скорости течения. Установлена тесная связь между температурным и скоростным полями, подтверждающая значимость термореологического взаимодействия даже в условиях отсутствия гравитационной конвекции. Это обуславливает необходимость включения немонотонных теплофизических свойств в модели наножидкостных солнечных коллекторов для достижения высокой точности прогнозирования их тепловой эффективности.

Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований, включая использование гибридных наножидкостей с комбинированным составом наночастиц, что может позволить эффективно управлять оптическими и реологическими характеристиками теплоносителя с целью повышения общей производительности систем солнечной энергетики.

Список литературы

1. Goel N., Taylor R.A., Otanicar T. A review of nanofluid-based direct absorption solar collectors: Design considerations and experiments with hybrid PV/Thermal and direct steam generation collectors // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 903–913. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.097.
2. Gorji T.B., Ranjbar A.A. Thermal and exergy optimization of a nanofluid-based direct absorption solar collector // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 106. P. 274–287. DOI: 10.1016/j.renene.2017.01.031.
3. Hussain M., Ullah S., Alshammari S., Maatki C., Khan S.U., Kolsi L. review study on the direct absorption solar collectors working with nanofluids // *J Therm Anal Calorim*. 2024. Vol. 149. P. 7919–7946. DOI: 10.1007/s10973-024-13304-3.
4. Mahian O., Kolsi L., Amani M. et al. Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamental and theory // *Physics Reports*. 2019. Vol. 790. P. 1–48. DOI: 10.1016/j.physrep.2018.11.003.
5. Desisa T.R. Experimental and numerical investigation of heat transfer characteristics in solar flat plate collector using nanofluids // *International Journal of Thermofluids*. 2023. Vol. 18. P. 100325. DOI: 10.1016/j.ijft.2023.100325.
6. Omeiza L.A., Abid M., Subramanian Y., Dhanasekaran A., Bakar S.A., Azad A.K. Challenges, limitations, and applications of nanofluids in solar thermal collectors – a comprehensive review // *Environ Sci Pollut Res*. 2023. DOI: 10.1007/s11356-023-30656-9.
7. Assael M.J., Trusler J.P.M., Tsolakis T.F. Thermophysical properties of fluids: an introduction to their prediction. London: Imperial College Press; River Edge, NJ: World Scientific. 1996. 353 p. DOI: 10.1142/p007. ISBN 978-1-86094-009-5.
8. Вихтенко Э.М., Манжула И.С. Программный комплекс для проведения математического моделирования интенсивности солнечного излучения внутри наноожидкостного солнечного коллектора прямого поглощения // *Перспективы науки*. 2024. № 5 (176). С. 105–111.
9. Godasiaei S.H., Chamkha A.J. Advancing heat transfer modeling through machine learning: A focus on forced convection with nanoparticles // *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2024. Vol. 86 (10). P. 3409–3431. DOI: 10.1080/10407782.2023.2299734.
10. Feng L., Turner I.W., Anh V.V., Liu F. Review of classical and nonlocal nanofluid models for solar collectors // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 212. P. 115382. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115382.
11. Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties – REFPROP. Version 10.0. Natl. Std. Ref. Data Series (NIST NSRDS), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. [Электронный ресурс]. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=912382 (дата обращения: 22.10.2025).
12. Turkyilmazoglu M. Single phase nanofluids in fluid mechanics and their hydrodynamic linear stability analysis // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2020. Vol. 187. № 105171. DOI: 10.1016/j.cmpb.2019.105171.
13. Hussein A.M., Noor M.M., Kadrigama K., Ramasamy D., Rahman M.M. Heat transfer enhancement using hybrid nanoparticles in ethylene glycol through a horizontal heated tube // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 14. Is. 2. P. 4183–4195. DOI: 10.15282/ijame.14.2.2017.6.0335.
14. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1972. 720 с.
15. Марчук Г.И. Методы расщепления. М.: Наука, 1988. 134 с. ISBN 5020137839.
16. Ковеня В.М. Алгоритмы расщепления для численного решения уравнений Навье – Стокса и их применение в задачах аэродинамики // *Прикладная механика и техническая физика*. 2021. Т. 62. № 3 (367). С. 48–59. DOI: 10.15372/PMTF20210305.
17. Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Похилко В.И., Соколин К.Э. Неявный алгоритм решения уравнений движения несжимаемой жидкости // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2023. Т. 15. № 4. С. 1009–1023. DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-4-1009-1023.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, дополнительное соглашение 075-02-2025-1538 от 27.02.2025.

Financing: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, supplementary agreement 075-02-2025-1538 dated 02/27/2025.