

УДК 519.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПРЯМОГО ПОГЛОЩЕНИЯ С НАНОЖИДКОСТНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

В. А. Минаев, д.т.н., профессор, профессор кафедры специальных информационных технологий Учебно-научного комплекса информационных технологий Московского университета МВД России имени В.Я. Кикотя, Москва, Россия;

orcid.org/0000-0002-5342-0864, e-mail: mlva@yandex.ru

И. С. Манжула, начальник кабинета специальных дисциплин кафедры информационного и технического обеспечения ОВД Дальневосточного юридического института МВД России имени И.Ф. Шилова, Хабаровск, Россия;

orcid.org/0000-0002-1298-1470, e-mail: manzhula1994@gmail.com

А. В. Корячко, к.т.н., доцент, профессор кафедры математики и информационных технологий управления Академии ФСИН России, г. Рязань, Россия;

e-mail: akor89@yandex.ru

Э. М. Вихтенко, к.ф.-м.н., доцент, доцент высшей школы кибернетики и цифровых технологий Тихоокеанского государственного университета, Хабаровск, Россия;

orcid.org/0000-0002-7152-2311, e-mail: 004184@togudv.ru

*Повышение эффективности солнечных тепловых установок – одна из ключевых задач в контексте декарбонизации и обеспечения энергетической устойчивости территорий. Значительного прогресса в этой области позволяют добиться солнечные коллекторы прямого поглощения (СКПП), в которых солнечное излучение поглощается непосредственно рабочим телом, что сводит к минимуму межфазные теплопотери. Одним из наиболее перспективных путей улучшения характеристик таких коллекторов является использование наножидкостей – коллоидных суспензий наночастиц в базовых теплоносителях. **Целью работы** являются построение математической модели и разработка алгоритмов для численного исследования физических процессов в солнечном коллекторе, где в качестве поглотителя солнечной энергии и теплоносителя используется наножидкость. Для решения поставленной задачи разработан вычислительный алгоритм на основе симметричной консервативной конечно-разностной схемы второго порядка точности по пространственным переменным, обеспечивающей сохранение дискретных инвариантов энергии и массы и безусловную устойчивость. Разработан специализированный программный комплекс на языке C++, поддерживающий параллельные расчёты в двумерной области. В комплекс включены модули генерации адаптивных сеток, расчёта эффективных теплофизических свойств коллектора, а также визуализации полей температуры наножидкости. Проведено численное исследование влияния материала наночастиц и граничных условий в модели на термический КПД, получены распределения температурных полей и количественно оценен вклад дисперсной фазы в увеличение КПД. Установлено, что выбор материала наночастиц и оптимизация отражающих/поглощающих свойств нижней границы коллектора являются ключевыми факторами повышения эффективности. Результаты исследования создают основу для рационального проектирования высокоэффективных наножидкостных СКПП и разработки моделей нового поколения.*

Ключевые слова: солнечный коллектор, наножидкость, поглощение, тепломассоперенос, математическое моделирование, метод конечных разностей, аппроксимация, вычислительный эксперимент.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-106-113

Введение

Актуальность развития технологий преобразования солнечной радиации в тепловую энергию обусловлена глобальными вызовами в области энергетической безопасности, декар-

бонизации и устойчивого развития человечества. Начиная с середины XX века, когда были заложены основы фотоэнергетики и солнечной теплотехники, проблема повышения энергетической эффективности и термодинамического совершенства альтернативных энергетических систем остаётся в фокусе научных исследований. В контексте снижения энергозатрат и минимизации углеродного следа особый интерес представляют теплогенерирующие установки, среди которых ключевую роль играют солнечные коллекторы прямого поглощения (СКПП).

В отличие от традиционных коллекторов с селективным покрытием абсорбера в СКПП солнечное излучение поглощается непосредственно объёмом рабочей среды, что позволяет снизить термические потери за счёт устранения контакта «твёрдый поглотитель – жидкость» и минимизировать температурный скачок на межфазной границе. СКПП функционирует как объёмный селективный радиационный теплоприёмник, в котором реализуется перенос излучения, тепла и массы в прозрачной или полупрозрачной среде [1-3].

Современный этап развития СКПП связан с внедрением нанотеплоносителей (наножидкостей) – устойчивых коллоидных дисперсий наноразмерных частиц (1 – 100 нм) металлов, оксидов или углеродных наноструктур (например, Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , Ag) в базовых жидкостях (вода, этиленгликоль, масла). Как показали теоретические и экспериментальные исследования последнего десятилетия [1, 2], введение даже незначительных объёмных концентраций наночастиц (0.001 – 0.05) приводит к существенному росту поглощения излучения, теплопроводности и теплоёмкости, а также изменению оптико-термических свойств среды, в частности глубины проникновения солнечного потока и профиля внутреннего источника тепла. Более того, наночастицы способны к фототермическому преобразованию за счёт плазмонного резонанса (в случае металлических наночастиц) и увеличенной межфазной поверхности, что дополнительно усиливает объёмный характер энерговыведения. Однако, несмотря на значительный прогресс в синтезе и характеристиках наножидкостей, недостаточно изученной остаётся связность процессов в наножидкостных СКПП [4-8].

В связи с этим целью настоящей работы является построение математической модели физических процессов в СКПП, где в качестве поглотителя солнечной энергии и теплоносителя используется наножидкость, а также проведение их численного моделирования на основе консервативных разностных схем. Результаты исследования направлены на количественную оценку вклада нанодисперсной фазы в повышение термического КПД, что создаёт основу для рационального проектирования нового поколения солнечных коллекторов прямого поглощения.

Постановка задачи тепломассопереноса

Рассмотрим прямоугольную область $D = \{0 < x < L, \quad 0 < y < H\}$, где L и H – длина и высота солнечного коллектора, через который течёт наножидкость и сверху в вертикальном направлении падает солнечный свет (рисунок 1). Верхняя часть коллектора покрыта прозрачной крышкой, которая пропускает большую часть солнечного излучения.

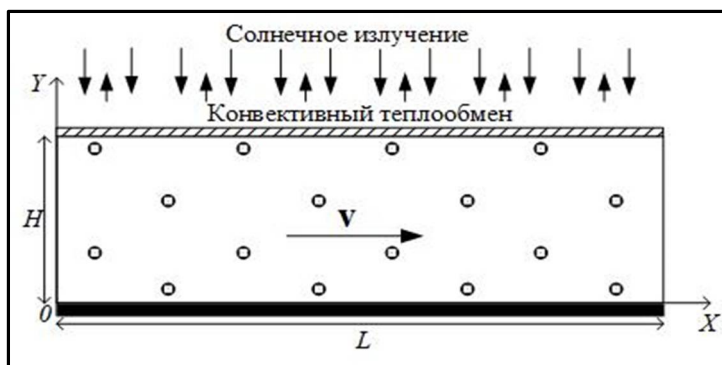


Рисунок 1 – Упрощенная схема солнечного коллектора
Figure 1 – Simplified diagram of a solar collector

Возможность получения наножидкостей, обладающих высокой способностью поглощать солнечное излучение, позволяет проектировать и исследовать тонкие наножидкостные СКПП, в которых высота значительно меньше длины, $L \gg H$ [9].

С учетом условия $L \gg H$ математическая модель, описывающая процесс теплопереноса в наножидкостном СКПП, принимает следующий вид [1-3]:

$$\tilde{V} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial I_\theta}{\partial y}, \quad (x, y) \in D, \quad (1)$$

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial y} - \sigma_0 (T - T_e) + \alpha I_\theta \right) \Big|_{y=0} = 0, \quad \left(k \frac{\partial T}{\partial y} + \sigma_H (T - T_e) \right) \Big|_{y=H} = 0, \quad x \in [0, L], \quad (2)$$

$$T|_{x=0} = T_{in}, \quad y \in [0, H]. \quad (3)$$

Здесь $\tilde{V} = c_v V$; c_v – объемная теплоемкость [9]; V – скорость течения наножидкости;

$$c_v = (1 - \varphi_v) c_{v,bf} + \varphi_v c_{v,np}, \quad V = \frac{P_{in} - P_{out}}{2\mu L} y(H - y); \quad (4)$$

φ_v – объемная доля (концентрация) наночастиц; P_{in} , P_{out} – давления в рабочей жидкости на входе и выходе из коллектора; μ – динамическая вязкость наножидкости [10]; k – коэффициент теплопроводности [11]

$$\mu = (1 + 2.5\varphi_v + 6.2\varphi_v^2) \mu_{bf}, \quad k = k_{bf} \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2\varphi_v(k_{np} - k_{bf})}{k_{np} + 2k_{bf} - \varphi_v(k_{np} - k_{bf})}; \quad (5)$$

I_θ – интенсивность солнечного излучения в коллекторе с учетом эффекта отражения от нижней границы наножидкостного СКПП [12],

$$I_\theta(y) = I(y) - \theta I(-y), \quad \theta \in [0, 1], \quad (6)$$

$$I(y) = 0.9 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I_H(\lambda) \exp(K_{e,nf}(\lambda)(y - H)) d\lambda; \quad (7)$$

I_H – спектральная интенсивность солнечного излучения, падающего на верхнюю часть коллектора; $K_{e,nf}$ – спектральный показатель ослабления светового потока в наножидкости; λ_{\min} , λ_{\max} – границы спектра солнечного излучения [1, 2, 12].

Здесь и далее в тексте нижние индексы bf определяют величины, относящиеся к базовой жидкости, а np – к материалу наночастиц.

В граничных условиях (2) на нижней и верхней границах солнечного коллектора приняты следующие обозначения: T_e – температура окружающей среды; σ_0 , σ_H – коэффициенты теплоотдачи на нижней и верхней границах соответственно. Граничное значение (3) температуры жидкости на входе в коллектор считается постоянным.

Замечание. Условия (2) при $\alpha = 0$ соответствуют теплообмену на границах с внешней средой по закону Ньютона – Рихмана. Если положить $\alpha = 1$, то можно учесть и поглощение части энергии светового потока нижней границей коллектора и ее передачу рабочей жидкости. В этом случае на нижней границе моделируются условия с полным светотражением $\theta = 1$, полным светопоглощением $\theta = 0$ и гибридное, когда нижняя граница выполнена из материала, способного частично поглощать и отражать поток солнечного излучения.

Разностная схема численного моделирования

Построим для задачи (1) – (3) конечно-разностную схему. Для этого воспользуемся интегро-интерполяционным методом (методом баланса) [13].

Зададим на области \bar{D} сетку:

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

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

Введем следующие обозначения для сеточных функций и выражений, содержащих конечно-разностные производные:

$$F_j^i = F(x_i, y_j), \quad F_{\bar{x}j}^i = (F_j^{i+1} - F_j^i)/h_1, \quad (8)$$

$$F_{\bar{y}j}^i = (F_{j+1}^i - F_j^i)/h_2, \quad F_{\underline{y}j}^i = (F_j^i - F_{j-1}^i)/h_2, \quad (a_j F_{\underline{y}j}^i)_{\bar{y}} = (a_{j+1} F_{\bar{y}j}^i - a_j F_{\underline{y}j}^i)/h_2.$$

Записывая уравнения баланса для элементарных ячеек сеточной области получаем для задачи (1) – (3) симметричную консервативную конечно-разностную схему. С учетом введенных обозначений (8) ее можно представить в виде системы уравнений [13]:

$$\tilde{V}_j T_{\bar{x}j}^i - (a_j \bar{T}_{\underline{y}j}^i)_{\bar{y}} = f_j, \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad j = 1, 2, \dots, M-1, \quad (9)$$

$$a_1 \bar{T}_{\bar{y}0}^i - \sigma_0 (\bar{T}_0^i - T_e) + \alpha I_{\theta,0} - 0.5h_2 (\tilde{V}_0 T_{\bar{x}0}^i - f_0) = 0, \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad (10)$$

$$a_M \bar{T}_{\underline{y}M}^i + \sigma_H (\bar{T}_M^i - T_e) + 0.5h_2 (\tilde{V}_M T_{\bar{x}M}^i - f_M) = 0, \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad (11)$$

$$T_j^0 = T_m, \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (12)$$

где $a_j = k_{j-1/2}$, $\bar{T}_j^i = 0.5(T_j^i + T_j^{i+1})$, $f_j = (\partial I_\theta / \partial y)_j$. (13)

Построенная неявная разностная схема (9) – (12) обладает абсолютной устойчивостью и аппроксимирует исходную задачу с погрешностью $O(h^2)$. Установлено, что скорость сходимости приближенного решения к точному в равномерной метрике составляет $O(h^2 \ln h_2^{-1})$.

Показано, что причиной снижения скорости сходимости является выполнение условий прилипания для наножидкости на верхней и нижней границах коллектора. Авторами разработан алгоритм численного решения системы (9) – (12), доказана его устойчивость. Приближенное решение на каждом слое находится с использованием метода прогонки [10, 13].

Результаты численных экспериментов

Численные результаты получены с использованием конечно-разностной схемы (9) – (12) на равномерной сетке, состоящей из $N = 160$ узлов по переменной x и $M = 1000$ узлов по переменной y . Вычислительные эксперименты производились при помощи специализированного программного комплекса, разработанного на языке программирования C++, в основе которого лежит численное решение симметричной консервативной конечно-разностной схемы (9) – (12). Программный комплекс поддерживает параллельные расчёты в двумерной области, включает модули генерации адаптивных сеток, расчёта эффективных теплофизических свойств коллектора, а также визуализации полей температуры наножидкости.

Физические характеристики базовой жидкости и различных материалов частиц, используемые в качестве исходных данных, представлены в таблице 1 [14].

В вычислительных экспериментах использованы следующие значения параметров: $H = 0.02$ м; $L = 1$ м; $\varphi_v = 2 \cdot 10^{-4}$; $T_{in} = 35$ °C; $T_e = 25$ °C; $\sigma_0 = \sigma_H \cdot 10^{-2}$ Вт/(м² · К); $\sigma_H = 6.43$ Вт/(м² · К); $\mu_{bf} = 1.005 \cdot 10^{-3}$ Па · сек.

Таблица 1 – Физические характеристики воды и наночастиц алюминия при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Table 1 – Physical characteristics of water and aluminum nanoparticles at $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Показатель \ материал	H_2O	Al	Cu	Ag	Au
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	4182	900	383	235	129
Плотность, кг/м ³	998.2	2700	8960	10490	19320
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0.607	247	389.6	418.7	312.8

Скорость течения жидкости, вычисляемая по формуле (4), задана таким образом, чтобы величина потока наножидкости, проходящего через сечение солнечного коллектора в единицу времени, была той же, что и при постоянной скорости, равной 0.002 м/с. Спектральный показатель ослабления светового потока в наножидкости рассчитывается на основе значений оптических величин, заимствованных из справочной литературы [15].

В первой группе экспериментов рассматривается наножидкость на основе дистиллированной воды и диспергированных в ней наночастиц алюминия. На рисунке 2 представлены графики распределения температуры по сечению коллектора для различных краевых условий на нижней границе коллектора: Значения высоты и длины НСКПП на рисунках выражены в мм.

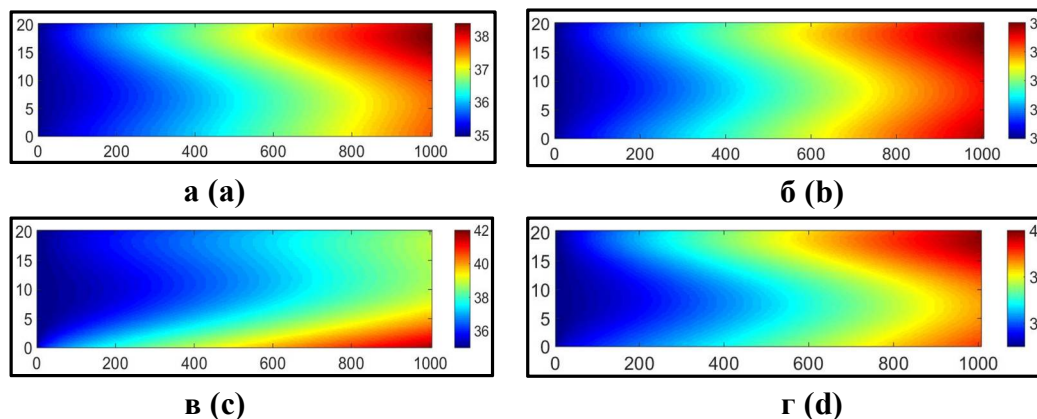


Рисунок 2 – Распределение температуры для наножидкости на основе частиц алюминия:
а – дно коллектора абсолютно прозрачно; б – происходит полное светотражение от дна коллектора; в) – происходит полное светопоглощение; г – часть излучения отражается от дна коллектора, часть поглощается им

Figure 2 – Temperature distributions for nanofluids based on aluminum particles
a – collector bottom is completely transparent; b – complete light reflection from collector bottom takes place; c – complete light absorption takes place; d – some radiation is reflected from collector bottom, some is absorbed by it

На втором этапе численного моделирования аналогичные расчёты проведены для наножидкостей на основе дистиллированной воды с наночастицами других металлов, представленных в таблице 1, а также для базовой жидкости (дистиллированная вода) в отсутствие дисперсной фазы. Установлено, что во всех рассмотренных случаях наблюдается сходный характер протекания исследуемых физических процессов в наножидкостном солнечном коллекторе прямого поглощения. Для каждой комбинации рабочей жидкости и каждого типа нижней границы коллектора определён коэффициент полезного действия (КПД). Полученные значения КПД представлены в таблице 2. Расчёт КПД наножидкостного СКПП выполнен в соответствии с методикой, изложенной в [1].

Таблица 2 – Физические характеристики воды и наночастиц алюминия при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Table 2 – Physical characteristics of water and aluminum nanoparticles at $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

α	θ	H_2O	Al	Cu	Ag	Au
0	0	9.93	47.05	25.91	65.68	27.88
1	1	22.46	60.22	43.30	65.74	45.40
1	0	71.54	69.60	75.11	65.82	74.59
1	0.5	47.01	65.58	62.68	65.78	63.25

Результаты вычислительных экспериментов показали, что максимальные значения коэффициента полезного действия солнечного коллектора достигаются при применении наножидкостей на основе меди (Cu) и золота (Au). Дополнительным фактором, способствующим повышению эффективности преобразования солнечной энергии, является использование в конструкции дна коллектора материалов с высокой отражательной способностью в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра.

В случае применения серебряных (Ag) наночастиц КПД коллектора проявляет слабую чувствительность к оптическим характеристикам материала дна. Вероятной причиной данного эффекта является высокая теплопроводность серебра, обеспечивающая интенсивный отвод тепловой энергии из зоны поглощения излучения и, как следствие, снижение вклада локальных тепловых потерь. Это приводит к ослаблению зависимости суммарного энергетического баланса системы от отражательных свойств материала дна.

Заключение

Разработан вычислительный алгоритм приближенного решения задачи тепломассопереноса в наножидкостном СКПП, в основе которого лежит симметричная консервативная конечно-разностная схема второго порядка точности по пространственным координатам, обеспечивающая безусловную устойчивость и сохранение физических инвариантов (энергии и массы) в дискретной постановке.

На базе предложенного алгоритма создан специализированный программный комплекс на языке C++, реализующий параллельное численное моделирование нестационарных термогидродинамических процессов в двумерной постановке. Комплекс включает модули:

- генерации структурированных и адаптивных расчётных сеток с учётом геометрической сложности проточной части коллектора;
- расчёта эффективных теплофизических свойств;
- визуализации полей температуры, скорости и объёмной концентрации дисперсной фазы.

Проведено параметрическое численное исследование процессов тепломассопереноса в тонком солнечном коллекторе с учетом различных условий теплообмена на его границах.

Полученные результаты имеют прикладную и методологическую ценность и могут быть использованы при решении прикладных задач проектирования эффективных солнечных коллекторов на основе наножидкостей:

- позволяют оптимизировать геометрические и режимные параметры НСКПП с точки зрения максимизации термического КПД и минимизации гидравлических потерь;
- служат основой для разработки физически обоснованных полуэмпирических зависимостей в инженерных расчётных моделях высокоэффективных солнечных теплоприёмников нового поколения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках субсидии на выполнение программы развития регионального научно-образовательного математического центра «Дальневосточный центр математических исследований» (дополнительное соглашение от 27 февраля 2025 г. № 075-02-2025-1538).

Библиографический список

1. Tyagi H., Phelan P., Prasher R. Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector // J. Sol. Energy Eng. 2009. Vol. 131.
2. Gorji T.B., Ranjbar A. A numerical and experimental investigation on the performance of a low-flux direct absorption solar collector (DASC) using graphite, magnetite and silver nanofluids // Sol. Energy. 2016. Vol. 135. P. 493-505.
3. 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. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.097.

4. **Hussain M., Ullah S., Alshammari S.** et al. A review study on the direct absorption solar collectors working with nanofluids. *J Therm Anal Calorim.* 2024. Vol. 149. Pp. 7919-7946. DOI 10.1007/s10973-024-13304-3.
5. **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. Pp. 1-48. DOI: 10.1016/j.physrep.2018.11.004.
6. **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.
7. **Omeiza L.A., Abid M., Subramanian, Y.** et al. 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.
8. **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.
9. **Sharma K.V., Baheta A.T., Mamat R.** A review of thermophysical properties of water based composite nanofluids // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2016. Vol. 66. P. 654-678.
10. **Drew D.A.** Theory of multicomponent fluids. New York: Springer, 1999. 310 p.
11. **Maxwell J.C.** A treatise on electricity and magnetism. Vol. 1. Oxford: Clarendon Press. 1881. 444 p.
12. **Вихтенко Э.М., Манжула И.С.** Программный комплекс для проведения математического моделирования интенсивности солнечного излучения внутри наножидкостного солнечного коллектора прямого поглощения // *Перспективы науки.* 2024. № 5 (176). С. 105-111.
13. **Самарский А.А.** Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 614 с.
14. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1972. 720 с.
15. **Prucha E.J.** Handbook of optical constants of solids. London: Academic Press, 1998. 999 p.

UDC 519.6

MATHEMATICAL MODELING AND NUMERICAL STUDY OF DIRECT ABSORPTION SOLAR COLLECTORS WITH NANOFLUIDIC COOLANT

V. A. Minaev, Dr. in technical sciences, Professor, Professor of Special Information Technologies Department, Kikot Moscow University of the Internal Affairs Ministry of Russia, Moscow, Russia; orcid.org/0000-0002-5342-0864, e-mail: mlva@yandex.ru

I. S. Manzhula, Head of the Specialized Disciplines Department, Department of Information and Technical Support, Department of Internal Affairs, Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after I.F. Shilov, Khabarovsk, Russia; orcid.org/0000-0002-1298-1470, e-mail: manzhula1994@gmail.com

E. M. Vikhtenko, Ph.D. in physics and mathematical sciences, Associate professor, Associate professor of the Higher School of Cybernetics and Digital Technologies, Pacific National University, Khabarovsk, Russia; orcid.org/0000-0002-7152-2311, e-mail: 004184@togudv.ru

A. V. Koryachko, Ph. D. in technical sciences, Associate Professor, Professor of Mathematics and Information Technology Management Department, Faculty of Economics, Academy of the Federal Penitentiary Service of Russia, Ryazan, Russia; e-mail: akor89@yandex.ru

*Improving the efficiency of solar thermal systems is a key challenge in the context of decarbonization and energy sustainability. Significant progress in this area can be achieved with direct absorption solar collectors (DASCs), which absorb solar radiation directly by working fluid, minimizing interfacial heat loss. One of the most promising ways to improve the performance of such collectors is the use of nanofluids—colloidal suspensions of nanoparticles in base heat transfer fluids. **The aim of the work is to construct a mathematical model and develop algorithms for computational modeling of physical processes in a solar***

collector using nanofluid as both an absorber of solar energy and a heat transfer fluid. To solve this problem, a computational algorithm was developed based on symmetric conservative finite-difference scheme of second-order accuracy in spatial variables, ensuring the conservation of discrete energy and mass invariants and unconditional stability. Specialized C++ software package supporting parallel calculations in two-dimensional domain has been elaborated. The package includes modules for generating adaptive grids, calculating collector effective thermophysical properties, and visualizing nanofluid temperature fields. A numerical parametric study of the influence of nanoparticle material and model boundary conditions on thermal efficiency was conducted, temperature field distributions were obtained, and the contribution of dispersed phase to increased efficiency was quantified. The choice of nanoparticle material and the optimization of reflective/absorbent properties of collector lower boundary are proved to be the key factors in increasing efficiency. Research results provide the basis for rational design of highly efficient nanofluidic DASCs and the development of next-generation engineering models.

Keywords: solar collector, nanofluid, absorption, heat and mass transfer, mathematical modeling, finite difference method, approximation, computational experiment.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-106-113

References

1. Tyagi H., Phelan P., Prasher R. Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector. *J. Sol. Energy Eng.* 2009, vol. 131.
2. Gorji T.B., Ranjbar A. A numerical and experimental investigation on the performance of a low-flux direct absorption solar collector (DASC) using graphite, magnetite and silver nanofluids. *Sol. Energy.* 2016, vol. 135, pp. 493-505.
3. 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, pp. 903-913. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.097.
4. Hussain M., Ullah S., Alshammari S. et al. A review study on the direct absorption solar collectors working with nanofluids. *J Therm Anal Calorim.* 2024, vol. 149, pp. 7919-7946. DOI 10.1007/s10973-024-13304-3.
5. 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, pp. 1-48. DOI: 10.1016/j.physrep.2018.11.004.
6. 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, pp. 100325. DOI: 10.1016/j.ijft.2023.100325.
7. Omeiza L.A., Abid M., Subramanian, Y. et al. 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.
8. 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.
9. Sharma K.V., Baheta A.T., Mamat R. A review of thermophysical properties of water based composite nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2016, vol. 66, pp. 654-678.
10. Drew D.A. Theory of multicomponent fluids. New York: Springer. 1999, 310 p.
11. Maxwell J.C. A treatise on electricity and magnetism. Vol. 1. Oxford: Clarendon Press, 1881. 444 p.
12. Vihtenko E.M., Manzhula I.S. Programmnyj kompleks dlya provedeniya matematicheskogo modelirovaniya intensivnosti solnechnogo izlucheniya vnutri nanozhidkostnogo solnechnogo kollektora pryamogo pogloshcheniya. *Perspektivy nauki.* 2024, no. 5 (176), pp. 105-111. (in Russian).
13. Samarsky A.A. Theory of difference schemes. Moscow: Nauka, 1989, p. 614. (in Russian).
14. Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostej. Moscow: Nauka, 1972, p. 720. (in Russian).
15. Prucha E.J. Handbook of optical constants of solids. London: Academic Press, 1998, p. 999.