

УДК 621.472

А. Г. БОРИСЕНКО, Р. С. ЮРКОВ, В. С. БЕЙЦУН

Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України

ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ В ТЕПЛОПРИЙМАЛЬНОМУ КАНАЛІ СОНЯЧНОЇ ПАРАБОЛОЦИЛІНДРИЧНОЇ СИСТЕМИ З НАНОРІДИНОЮ В ЯКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ

У статті проаналізовано процеси перенесення теплової енергії в системі теплосприймання параболоциліндричної сонячної термодинамічної установки, для якої як теплоносії розглянуто нанорідину на основі силіконової олії Syltherm800 з наночастинками оксиду алюмінію Al_2O_3 . Актуальність дослідження визначається тим, що інтенсифікація конвективного теплообміну в приймальній трубі без суттєвого ускладнення конструкції установки здатна підвищити її теплову та інтегральну енергетичну ефективність. Побудовано фізичну і математичну моделі енергопереносу для потоку теплоносія в циліндричному каналі з урахуванням температурної та концентраційної залежності теплофізичних властивостей нанорідини. На основі апроксимації експериментальних даних отримано аналітичні співвідношення для густини, питомої теплоємності та теплопровідності базової рідини й нанорідини як функцій температури та об'ємної частки наночастинок. Для числового розв'язання задачі розроблено алгоритм на базі методу контрольного об'єму з неявною схемою та реалізовано його у власному Python-коді. Під час розрахунків враховано ламінарний режим течії, квадратичний профіль швидкості та ітераційне уточнення коефіцієнтів на кожному кроці вздовж каналу. Проведено серію числових експериментів для чистої Syltherm800 і нанорідини Syltherm800/ Al_2O_3 з об'ємною концентрацією наночастинок 3 %, 5 % і 8 %. Визначено температурні поля вздовж довжини та радіуса теплоприймального каналу, а також середньомасову температуру теплоносія. Верифікацію математичної моделі та числового алгоритму виконано шляхом зіставлення з тестовою задачею, для якої існує аналітичний розв'язок, і встановлено повний збіг результатів. Показано, що введення наночастинок Al_2O_3 до традиційного теплоносія підвищує теплопровідність середовища та сприяє зростанню середньомасової температури в каналі, а отже може забезпечити інтенсифікацію конвективного теплообміну. Обґрунтовано, що за раціонального вибору геометричних і термодинамічних параметрів застосування такої нанорідини є перспективним шляхом підвищення ефективності систем перетворення сонячної енергії.

Ключові слова: сонячна термодинамічна система, трубчастий теплоприймальний канал, нанорідина, математична модель, числовий алгоритм, метод контрольного об'єму.

А. Н. БОРЫСЕНКО, Р. С. ЮРКОВ, В. С. БЕИТСУН

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine

NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN THE RECEIVER CHANNEL OF A PARABOLIC-TROUGH SOLAR SYSTEM WITH NANOFLUID AS HEAT TRANSFER FLUID

The paper presents an analysis of heat transfer processes in the heat-receiving system of a parabolic-trough solar thermodynamic plant in which a nanofluid based on Syltherm800 silicone oil with Al_2O_3 nanoparticles is considered as the heat transfer fluid. The study is motivated by the fact that intensifying convective heat transfer in the receiver tube without significant design modifications can improve both the thermal and the overall energy efficiency of the plant. Physical and mathematical models of energy transport are developed for a fluid flow in a cylindrical channel with due regard for the temperature- and concentration-dependent thermophysical properties of the nanofluid. By approximating experimental data, analytical correlations are obtained for the density, specific heat capacity, and thermal conductivity of the base fluid and the nanofluid as functions of temperature and nanoparticle volume fraction. For the numerical solution, an algorithm based on the finite volume method with an implicit scheme is developed and implemented in an in-house Python code. The calculations account for laminar flow, a quadratic velocity profile, and iterative correction of coefficients at each axial step. A series of numerical experiments is carried out for pure Syltherm800 and for the Syltherm800/ Al_2O_3 nanofluid with nanoparticle volume fractions of 3 %, 5 %, and 8 %. Temperature fields along the channel length and radius, as well as the mass-averaged fluid temperature, are determined. The mathematical model and numerical algorithm are verified by comparison with a test problem admitting an analytical solution, and complete agreement is obtained. It is shown that the addition of Al_2O_3 nanoparticles to the conventional heat transfer fluid increases the effective thermal conductivity and promotes a higher mass-averaged temperature in the channel, which may intensify convective heat transfer. It is substantiated that, with a rational choice of geometric and thermodynamic parameters, the proposed nanofluid can be regarded as a promising option for improving the efficiency of solar energy conversion systems in commercial solar power plants.

Keywords: solar thermodynamic system, tubular receiver channel, nanofluid, mathematical model, numerical algorithm, finite volume method.

Постановка проблеми

Модернізація наявних і розроблення нових енергетичних технологій є важливою передумовою сталого розвитку. Сучасна енергетика дедалі активніше орієнтується на використання відновлюваних джерел, серед яких сонячні системи посідають одне з провідних місць [1]. Сонячну енергію можна перетворювати двома базовими способами – безпосередньо у фотоелектричних системах або термодинамічно. Термодинамічний підхід характеризується високою надійністю, дає змогу одержувати як теплову, так і електричну енергію, а зі зростанням потужності установки його ефективність, на відміну від фотоелектричних систем, може підвищуватися [2]. Такі системи поділяють на низькотемпературні та високотемпературні. До складу високотемпературних сонячних термодинамічних установок входять концентратори різних типів, зокрема параболоїдні, параболоциліндричні та системи на основі лінз Френеля. Саме геометрія концентратора визначає досяжний температурний рівень системи. Нині найбільшого поширення набули параболоциліндричні установки, які, за даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики, забезпечують понад 90 % виробництва термодинамічної сонячної електроенергії у світі [3].

Система теплосприймання параболоциліндричної сонячної станції включає параболоциліндричний концентратор і трубчастий теплоприймач, розміщений у його фокусі. Усереднені приймальної трубки рухається теплоносій, який нагрівається концентрованим сонячним потоком, а далі передає акумульовану теплоту для реалізації паротурбінного циклу. У зв'язку з цим практичний інтерес становить пошук способів інтенсифікації конвективного теплообміну в теплоприймальному каналі, оскільки це може підвищити загальну ефективність термодинамічної системи, а також зменшити її габарити та вартість. Для підсилення конвекції традиційно застосовують пасивні методи, зокрема решітки-турбулізатори, гвинтові вставки, генератори хвиль тощо [4; 5]. Водночас розвиток нанотехнологій відкрив альтернативний напрям підвищення інтенсивності теплообміну, що базується на використанні нанорідин як перспективних теплоносіїв [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нанорідину розглядають як двофазне середовище, у якому наночастинки рівномірно дисперговані в базовій рідині. Їх введення дає змогу покращити теплообмінні характеристики теплоносія без принципової зміни технологічної схеми. Для параболоциліндричних сонячних установок у ролі нанодобавок можуть застосовуватися як метали Cu, Si [5], так і оксиди металів CuO, TiO₂, Al₂O₃, SiO₂ [6]. Окремий напрям становлять теплоносії на основі вуглецевих нанотрубок, інтерес до яких останніми роками також зростає [7].

Мета дослідження

Метою цієї роботи є оцінювання перспектив використання нанорідини на основі силіконової олії Syltherm800 з наночастинками оксиду алюмінію Al₂O₃ як теплоносія параболоциліндричних сонячних станцій. Попередні результати авторів щодо моделювання теплообміну в сонячних термодинамічних системах із нанорідиною як теплоносієм наведено в [8]. Особливості теплообміну в каналі теплоприймача з таким робочим середовищем у [9] вивчалися в одновимірній постановці на базі балансових співвідношень. У зазначеній роботі було отримано лише усереднені температурні характеристики системи теплосприймання та показано, що нанорідина Syltherm800/Al₂O₃ може перевищувати за ефективністю чисту Syltherm800, особливо за високих температур. CFD-моделювання тепломасопереносу в теплоприймальному каналі параболоциліндричної станції, виконане в [10], засвідчило можливість підвищення загальної ефективності перетворення до 10 % завдяки введенню в Syltherm800 наночастинок Al₂O₃.

Попри очевидні переваги, комерційні CFD-пакети із закритим кодом часто є дорогими, ресурсомісткими та не завжди зручними для гнучкого аналізу результатів. Базову математичну

постановку та числовий підхід до визначення температурних полів у потоці Syltherm800/Al₂O₃ було апробовано авторами раніше [8]. У межах цієї роботи використано й доопрацьовано власний комп'ютерний алгоритм для числового дослідження температурних полів у потоці Syltherm800/Al₂O₃, що рухається в трубчастому теплоприймальному каналі. Алгоритм спирається на побудовану математичну модель енергопереносу, у якій враховано залежність теплофізичних властивостей нанорідини від температури та об'ємної концентрації наночастинок. Проведені числові експерименти дають змогу оцінити доцільність використання нанорідини Syltherm800/Al₂O₃ як теплоносія параболоциліндричних станцій.

Виклад основного матеріалу дослідження

Фізична та математична моделі. Загальну фізичну постановку задачі теплообміну в трубчастому теплоприймальному каналі для нанорідини Syltherm800/Al₂O₃ автори розглядали в попередній роботі [8]. У цій статті її використано як основу для уточненого аналізу впливу температурної та концентраційної залежності теплофізичних властивостей нанорідини на температурні поля теплоносія. У загальній постановці вплив наночастинок на енергетичні характеристики параболоциліндричної системи доцільно аналізувати в межах задачі енергомасопереносу теплоносія в круглій трубі з нелінійними граничними умовами на зовнішній поверхні, які задають величину концентрованого теплового потоку, а також радіаційні й конвективні теплові втрати. Передбачається, що на вхід труби радіуса R і довжини L подається теплоносій із фіксованою температурою. На певній відстані від входу формуються температурний і швидкісний профілі, які в загальному випадку можуть бути несиметричними. На рис. 1 схематично подано фізичну модель розглядуваної задачі.

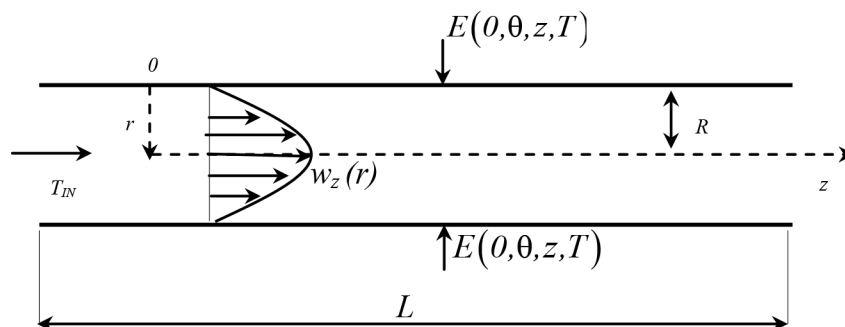


Рис. 1. Рух теплоносія в теплоприймальному каналі

Для вибраної фізичної постановки математична модель набуває вигляду:

$$w_z(r)C_p(T)\rho(T)\frac{\partial T(r, \theta, z)}{\partial z} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial z}(r\lambda(T)\frac{\partial T(r, \theta, z)}{\partial z}) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\lambda(T)\frac{\partial T(r, \theta, z)}{\partial \theta}\right), \quad (1)$$

де r, θ, z – циліндричні координати; T – температура; w_z – профіль швидкості руху теплоносія в каналі; C_p – питома теплоємність теплоносія; ρ – густина теплоносія; λ – коефіцієнт теплопровідності теплоносія.

Рівняння (1) доповнюється такими початковими та граничними умовами:

при $r = 0, 0 \leq \theta < 2\pi, 0 < z < L$:

$$\frac{dT(0, \theta, z)}{dr} = E(0, \theta, z, T), \quad (2)$$

при $r = R, 0 \leq \theta < 2\pi, 0 \leq z < L$:

$$\frac{dT(0, \theta, z)}{dr} = 0, \quad (3)$$

при $z = 0, 0 < r < R, 0 \leq \theta < 2\pi$:

$$T(r, \theta, 0) = T_{IN} = \text{const.} \quad (4)$$

Слід підкреслити, що вибір профілю швидкості є принципово важливим для коректного опису теплообміну в рідині, яка рухається каналом. Оскільки параболоциліндричні установки зазвичай працюють у ламінарному режимі течії теплоносія, у розрахунках використовувався квадратичний профіль швидкості такого вигляду

$$w_z(r) = 2\bar{w} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (5)$$

де \bar{w} – середня швидкість руху рідини в каналі, м/с.

На першому етапі дослідження для аналізу побудованої математичної моделі, побудови на її основі числового алгоритму та подальшої верифікації розглядалася спрощена задача з граничними умовами першого та другого роду на зовнішній поверхні теплоприймального каналу, що відповідали сталій температурі стінки T_w та сталому тепловому потоку на її поверхні E .

Апроксимація теплофізичних показників нанорідини. Виражена залежність теплофізичних властивостей теплоносія від температури зумовлює нелінійність математичної моделі (1)–(5). Крім того, введення наночастинок у базову рідину істотно змінює її теплофізичні параметри, що і розглядається як один із чинників підвищення теплової ефективності системи. Тому визначення теплофізичних властивостей нанорідини становило окремий етап дослідження. На першому етапі методом найменших квадратів апроксимовано експериментальні дані щодо теплофізичних характеристик чистої Syltherm800 [11] у температурному інтервалі 373–673 К. Отримані апроксимаційні функції для густини ρ_b , теплоємності C_{pb} та теплопровідності λ_b чистої Syltherm800 як базової рідини мають вигляд:

$$\rho_b(T) = 1269.1 - 1.52T + 0.0018T^2 - 1.67 \times 10^{-6}T^3, \quad (6)$$

$$C_{pb}(T) = 1108.16 + 1.707T, \quad (7)$$

$$\lambda_b(T) = 0.1946 - 0.0002T. \quad (8)$$

На другому етапі визначалися теплофізичні властивості нанорідини Syltherm800/Al₂O₃ для різних концентрацій наночастинок. Апроксимаційні залежності будувалися за припущення, що в обраному температурному діапазоні теплофізичні властивості наночастинок Al₂O₃ залишаються сталими і дорівнюють значенням, наведеним у [12]. За цих умов, відповідно до [12], температурні залежності теплофізичних характеристик нанорідини можна подати у вигляді

$$\rho_{nf}(T) = (1 - \varphi)\rho_b(T) + \varphi\rho_p, \quad (9)$$

$$C_{p_{nf}}(T) = \frac{(1 - \varphi)C_{pb}(T)\rho_b(T) + \varphi C_{pp}\rho_p}{(1 - \varphi)\rho_b(T) + \varphi\rho_p}, \quad (10)$$

$$\lambda_{nf}(T) = 0.25[(3\varphi - 1)\lambda_p + (2 - 3\varphi)\lambda_b(T) + \sqrt{\Delta(T)}], \quad (11)$$

де $\Delta(T) = [(3\varphi - 1)\lambda_p + (2 - 3\varphi)\lambda_b(T)]^2 + 8\lambda_b(T)\lambda_p$; $\varphi \in [0;1]$ – концентрація наночастинок відносно загального об'єму базової рідини.

Одержані температурні залежності (9)–(11) були включені до числового алгоритму, основні етапи побудови якого наведено нижче.

Числовий алгоритм та аналіз результатів комп'ютерного моделювання. Базою математичної моделі є нелінійне параболічне рівняння конвективного теплообміну (1), яке розв'язувалося методом контрольного об'єму з використанням неявної розрахункової схеми [13]. Кількість кроків за радіальною координатою обиралася відповідно до умов стійкості схеми «за потоком» і становила 700. Крок сітки за довжиною визначався за значенням локального числа Пекле на

кожному кроці за координатою z і не перевищував межі, наведеної в [13]. Залежність теплофізичних властивостей нанорідина від температури та концентрації наночастинок урахувалася шляхом організації ітераційного процесу в радіальному напрямі на кожному кроці вздовж каналу.

Комп'ютерну реалізацію алгоритму виконано у вигляді Python-коду, за допомогою якого проведено параметричні числові експерименти для визначення температурних полів нанорідина за радіусом і довжиною каналу, а також її середньомасової температури в теплоприймальному каналі. Розрахунки виконувалися для чистої Syltherm800 та Syltherm800/Al₂O₃ з об'ємною концентрацією наночастинок 3 %, 5 % і 8 %. Передбачалося, що теплоносії рухається в трубчастому теплоприймальному каналі радіуса R та довжини L ; температура теплоносія на вході в канал дорівнювала T_{IN} , а середня швидкість становила \bar{w} , що відповідає числу Рейнольдса Re . Такі геометричні, динамічні та теплофізичні параметри є характерними для параболоциліндричних станцій [14].

На рис. 2 наведено результати числових експериментів із визначення середньомасової температури теплоносія в трубчастому теплоприймальному каналі параболоциліндричної установки за щільності теплового потоку на його зовнішній поверхні.

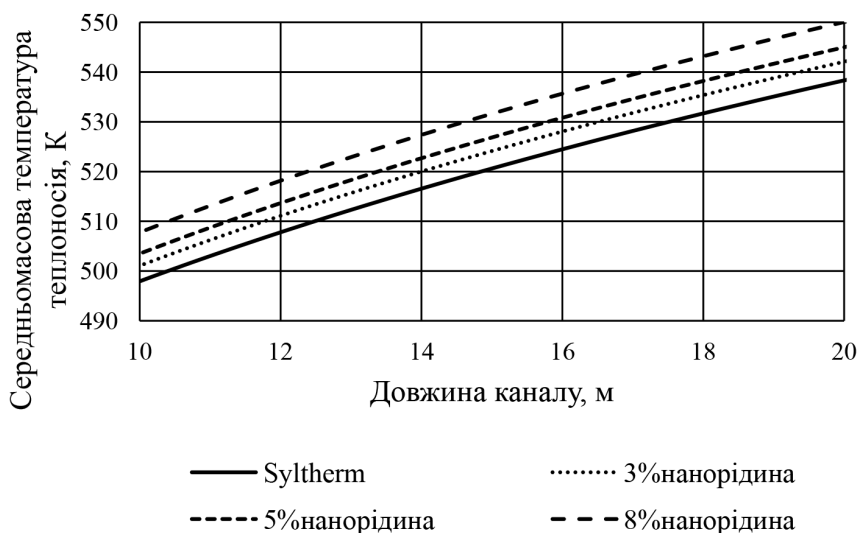


Рис. 2. Середньомасова температура теплоносія вздовж каналу

На графіку для наочності подано ділянку каналу, на якій температурний профіль уже сформувався, тобто без урахування початкової зони, де температури розглянутих теплоносіїв відрізняються незначно. Як і очікувалося, введення наночастинок оксиду алюмінію Al₂O₃ у традиційний для сонячних станцій теплоносій Syltherm800 сприяє підвищенню температури теплоносія, що зумовлює зростання температурного градієнта в каналі та потенційно може підвищити теплову ефективність системи теплосприймання. У роботі [15] показано, що інтенсифікація конвективного теплообміну, яка приводить до підвищення загального температурного рівня системи, пов'язана насамперед із істотним збільшенням коефіцієнта теплопровідності нанорідин. Проведене дослідження засвідчило, що для нанорідина Syltherm800/Al₂O₃ з об'ємною концентрацією 3 %, 5 % і 8 % за температури коефіцієнт теплопровідності зростає на 9,8 %, 17,5 % та 31,2 % відповідно порівняно з чистою Syltherm800. Водночас детальний аналіз отриманих даних показав, що зі збільшенням вмісту наночастинок теплоємність Syltherm800 зменшується, тому вибір оптимальних вхідних геометричних і термодинамічних параметрів, які забезпечать підвищення загальної енергетичної ефективності системи теплосприймання, потребує подальших досліджень.

Верифікація результатів числового моделювання. Перевірку отриманих числових результатів здійснювали шляхом порівняння з аналітичним розв'язком тестової задачі,

наведеним у [16]. Аналітичний розв’язок, побудований для випадку сталої температури стінки каналу, має вигляд

$$\frac{T(r, z) - T_w}{T_{IN} - T_w} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{az}{wR^2}\right), \quad (12)$$

де $A_n = 2/(\mu_n J_1(\mu_n))$; J_0 та J_1 – функції Бесселя першого роду; $J_0(\mu_n) = 0$ – рівняння для визначення характеристичних чисел μ_n ; a – коефіцієнт температуропровідності теплоносія.

Порівняння числових та аналітичних даних виконувалося для описаної вище фізичної моделі за припущення, що теплофізичні властивості теплоносія є сталими, а температура стінки дорівнює температурі навколишнього середовища. Оскільки ряд (12) швидко збігається, для аналізу використано лише перші 10 його членів. Для такого випадку числові й аналітичні дані повністю збігаються. На рис. 3 і рис. 4 наведено розподіл температури в чистому Syltherm800 уздовж каналу та в радіальному напрямі відповідно.

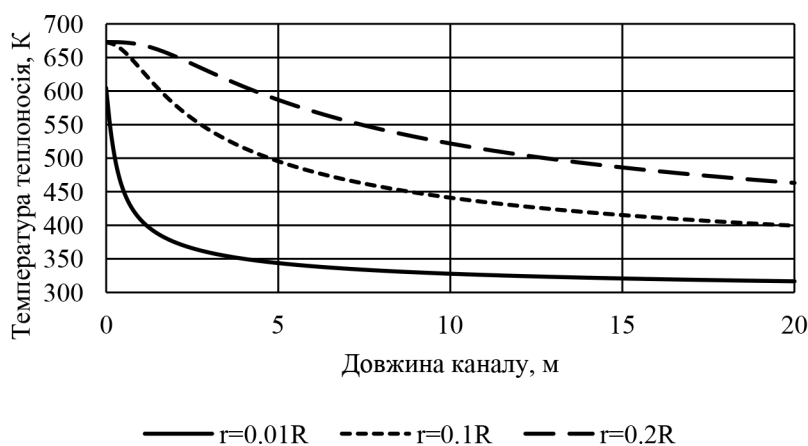


Рис. 3. Розподіл температури теплоносія вздовж каналу

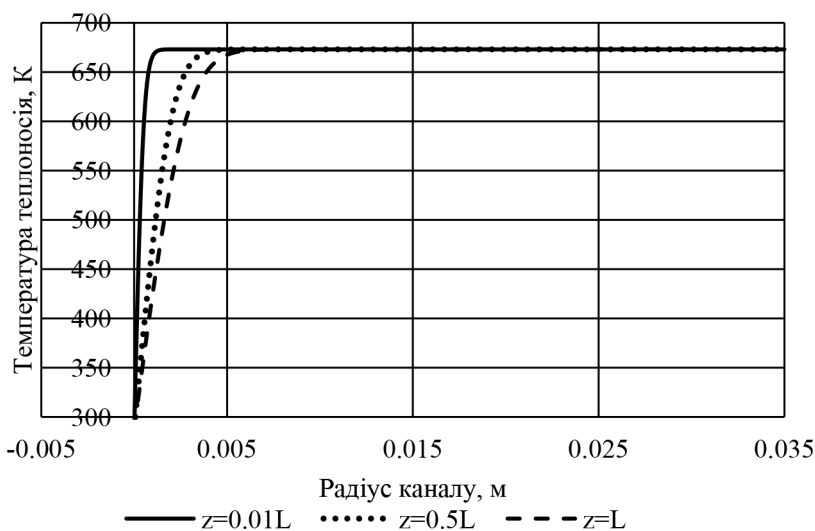


Рис. 4. Розподіл температури теплоносія в радіальному напрямі

Як видно з графіків, помітні зміни температури теплоносія спостерігаються переважно в приповерхневій області каналу. Це пояснюється тим, що для верифікації обиралася класична геометрія теплоприймального каналу, розрахована на нагрівання теплоносія концентрованим сонячним потоком великої потужності. За таких умов задання зовнішнього впливу лише температурою навколишнього середовища формує незначні температурні градієнти в рідині, які виразно проявляються лише поблизу стінки.

Висновки

У роботі досліджено перспективність використання нанорідини Syltherm800/Al₂O₃ як теплоносія параболоциліндричних сонячних станцій. До розробленої математичної моделі введено залежності теплофізичних властивостей нанорідини від температури та концентрації наночастинок, отримані шляхом апроксимації експериментальних даних. Створено комп'ютерний алгоритм і проведено числові експерименти для визначення температурних полів теплоносія, що рухається всередині теплоприймального каналу. Показано, що додавання наночастинок Al₂O₃ до традиційного теплоносія параболоциліндричних станцій Syltherm800 підвищує його середньомасову температуру і за раціонального вибору геометричних та термодинамічних проектних параметрів може сприяти зростанню загальної теплової ефективності системи перетворення сонячної енергії. Розроблена математична модель і створений числовий алгоритм пройшли верифікацію шляхом зіставлення з даними тестової задачі, для якої отримано аналітичний розв'язок.

Список використаної літератури

1. Тучинський Б. Г., Кудря С. О., Іванченко І. В., Іванчук В. Ю. Невідворотність переходу України до відновлюваної енергетики. *Відновлювальна енергетика*. 2020. № 4(63). С. 6–21. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).6-21](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).6-21)
2. Knysh L. I., Gabrinets V. A. The assessment of efficiency PVT-technology in combined solar power plants. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2013. № 2. P. 74–78. URL: <https://www.nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-divisions-of-science/electrical-engineering/2114-assessment-of-pvt-technology-efficiency-in-combined-solar-power-plants>
3. Renewable Power Generation Costs in 2018. International Renewable Energy Agency (IRENA), 2019. URL: <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>
4. Anoop K., Cox J., Sadr R. Thermal evaluation of nanofluids in heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013. Vol. 49. P. 5–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.10.002>
5. Mwesigye A., Huan Z., Meyer J. P. Thermal performance and entropy generation analysis of a high concentration ratio parabolic trough solar collector with Cu-Therminol VP-1 nanofluid. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 120. P. 449–465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.106>
6. Allouhi A., Benzakour Amine M., Saidur R., Kousksou T., Jamil A. Energy and exergy analyses of a parabolic trough collector operated with nanofluids for medium and high temperature applications. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 155. P. 201–217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.059>
7. Mwesigye A., Yilmaz İ. H., Meyer J. P. Numerical analysis of the thermal and thermodynamic performance of a parabolic trough solar collector using SWCNTs-Therminol®VP-1 nanofluid. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 119. P. 844–862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.047>
8. Борисенко А. Г., Книш Л. І. Моделювання теплообміну в сонячних термодинамічних системах з нанорідиною в якості теплоносія. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. 2021. Вип. 21. С. 16–25. DOI: <https://doi.org/10.15421/322102>
9. Bellos E., Tzivanidis C. Parametric investigation of nanofluids utilization in parabolic trough collectors. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2017. Vol. 2. P. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.05.001>
10. Kaloudis E., Papanicolaou E., Belessiotis V. Numerical simulations of a parabolic trough solar collector with nanofluid using a two-phase model. *Renewable Energy*. 2016. Vol. 97. P. 218–229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.046>
11. Syltherm 800. Stabilized Heat Transfer Fluid. The Dow Chemical Company. URL: <https://www.dow.com/en-us/pdp.syltherm-800-stabilized-heat-transfer-fluid.39260z.html>

12. Li P., Zhang D., Xie Y. Heat transfer and flow analysis of Al_2O_3 -water nanofluids in microchannel with dimple and protrusion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 73. P. 456–467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.042>
13. Patankar S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York : Taylor & Francis, 1980. 214 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482234213>
14. Knysh L. Comprehensive mathematical model and efficient numerical analysis of the design parameters of the parabolic trough receiver. *International Journal of Thermal Sciences*. 2021. Vol. 162. Art. 106777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106777>
15. Kasaeian A., Eshghi A. T., Sameti M. A review on the applications of nanofluids in solar energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 43. P. 584–598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.020>
16. Knysh L. I. Verification of the Numerical Algorithm for Parameter Analysis of the Tube Heat Receiver of the Solar Parabolic Trough System. *Applied Solar Energy*. 2019. Vol. 55, № 5. P. 340–346. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0003701X19050074>

References

1. Tuchynskyi, B. H., Kudria, S. O., Ivanchenko, I. V., & Ivanchuk, V. Yu. (2020). Nevidvorotnist perekhodu Ukrainy do vidnovliuvanoi enerhetyky [Inevitability of Ukraine's transition to renewable energy]. *Vidnovliuvana enerhetyka*, 4(63), 6–21. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).6-21](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).6-21) [in Ukrainian].
2. Knysh, L. I., & Gabrinets, V. A. (2013). The assessment of efficiency PVT-technology in combined solar power plants. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 74–78. Retrieved from <https://www.nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-divisions-of-science/electrical-engineering/2114-assessment-of-pvt-technology-efficiency-in-combined-solar-power-plants> [in English].
3. International Renewable Energy Agency. (2019). Renewable power generation costs in 2018. Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018> [in English].
4. Anoop, K., Cox, J., & Sadr, R. (2013). Thermal evaluation of nanofluids in heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 49, 5–9. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.10.002> [in English].
5. Mwesigye, A., Huan, Z., & Meyer, J. P. (2016). Thermal performance and entropy generation analysis of a high concentration ratio parabolic trough solar collector with Cu-Therminol VP-1 nanofluid. *Energy Conversion and Management*, 120, 449–465. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.106> [in English].
6. Allouhi, A., Benzakour Amine, M., Saidur, R., Kousksou, T., & Jamil, A. (2018). Energy and exergy analyses of a parabolic trough collector operated with nanofluids for medium and high temperature applications. *Energy Conversion and Management*, 155, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.059> [in English].
7. Mwesigye, A., Yilmaz, İ. H., & Meyer, J. P. (2018). Numerical analysis of the thermal and thermodynamic performance of a parabolic trough solar collector using SWCNTs-Therminol®VP-1 nanofluid. *Renewable Energy*, 119, 844–862. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.047> [in English].
8. Borysenko, A. H., & Knysh, L. I. (2021). Modeliuvannia teploobminu v soniachnykh termodinamichnykh systemakh z nanoridynoiu v yakosti teplonosiia [Heat transfer modeling in solar thermodynamic systems with nanofluid as heat transfer fluid]. *Pytannia prykladnoi matematyky i matematychnoho modeliuvannia*, 21, 16–25. <https://doi.org/10.15421/322102> [in Ukrainian].

9. Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2017). Parametric investigation of nanofluids utilization in parabolic trough collectors. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.05.001> [in English].
10. Kaloudis, E., Papanicolaou, E., & Belessiotis, V. (2016). Numerical simulations of a parabolic trough solar collector with nanofluid using a two-phase model. *Renewable Energy*, 97, 218–229. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.046> [in English].
11. The Dow Chemical Company. (n.d.). Syltherm 800. Stabilized heat transfer fluid. Retrieved from <https://www.dow.com/en-us/pdp.syltherm-800-stabilized-heat-transfer-fluid.39260z.html> [in English].
12. Li, P., Zhang, D., & Xie, Y. (2014). Heat transfer and flow analysis of Al₂O₃-water nanofluids in microchannel with dimple and protrusion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 73, 456–467. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.042> [in English].
13. Patankar, S. V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow. New York : Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781482234213> [in English].
14. Knysh, L. (2021). Comprehensive mathematical model and efficient numerical analysis of the design parameters of the parabolic trough receiver. *International Journal of Thermal Sciences*, 162, 106777. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106777> [in English].
15. Kasaeian, A., Eshghi, A. T., & Sameti, M. (2015). A review on the applications of nanofluids in solar energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 584–598. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.020> [in English].
16. Knysh, L. I. (2019). Verification of the numerical algorithm for parameter analysis of the tube heat receiver of the solar parabolic trough system. *Applied Solar Energy*, 55(5), 340–346. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19050074> [in English].

Борисенко Андрій Геннадійович – науковий співробітник, доктор філософії з математики та статистики Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України. E-mail: A.G.Borysenko@nas.gov.ua, ORCID: 0009-0001-5083-5255.

Юрков Роман Сергійович – молодший науковий співробітник, доктор філософії з математики та статистики Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України. E-mail: R.S.Yurkov@nas.gov.ua, ORCID: 0000-0002-4247-5595.

Бейцун Віктор Сергійович – науковий співробітник, доктор філософії з математики та статистики Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України. E-mail: V.S.Beitsun@nas.gov.ua, ORCID: 0000-0001-7068-0716.

Borysenko Andrii Hennadiiovych – Research Scientist, Doctor of Philosophy in Mathematics and Statistics of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. E-mail: A.G.Borysenko@nas.gov.ua, ORCID: 0009-0001-5083-5255.

Yurkov Roman Serhiyovych – Junior Research Scientist, Doctor of Philosophy in Mathematics and Statistics of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. E-mail: R.S.Yurkov@nas.gov.ua, ORCID: 0000-0002-4247-5595.

Beitsun Viktor Serhiiovych – Research Scientist, Doctor of Philosophy in Mathematics and Statistics of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. E-mail: V.S.Beitsun@nas.gov.ua, ORCID: 0000-0001-7068-0716.

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)