

**А.Г. Борисенко, Л.І. Книш**

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара*

## **МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІНУ В СОНЯЧНИХ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМАХ З НАНОРІДИНОЮ В ЯКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ**

Об'єктом дослідження в даній роботі є процеси тепломасопереносу в системі прийому тепла сонячної термодинамічної системи, де пропонується використовувати новий тип теплоносія – нанорідину. Розроблено математичну модель та створено числовий алгоритм для визначення температурних полів в нанорідині, що рухається всередині трубчатого теплоприймального каналу. На основі апроксимації експериментальних даних побудовано залежності теплофізичних властивостей нанорідини від температури та концентрації наночастинок; ці залежності враховано в математичній моделі. Проведено верифікацію отриманих числових результатів шляхом порівняння з результатами тестової задачі, що має аналітичний розв'язок. Доведено, що додавання наночастинок оксиду алюмінію  $Al_2O_3$  в традиційний теплоносій сонячних станцій Syltherm800 сприяє інтенсифікації конвективного теплообміну в теплоприймальному каналі, що, в разі вибору оптимальних геометричних та термодинамічних параметрів, може значно підвищити загальну енергетичну ефективність системи перетворення.

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

**A.G. Borysenko, L.I. Knysh**

*Oles Honchar Dnipro National University*

## **HEAT TRANSFER MODELING IN SOLAR THERMODYNAMIC SYSTEMS WITH NANOFLUID AS HEAT TRANSFER FLUID**

Conducted research are devoted the actual topic connected to the use of a new prospect type of the heat transfer fluid for solar thermodynamic plants. Solar radiation collector system for such plants consists of a parabolic trough concentrator and a tube receiver, which is located in focus of concentrator. Reflected from concentrator solar rays heat up the heat transfer fluid moving inside a tube receiver. Obtained solar heat is conducted in steam turbine cycle for electricity-power generation. Residual heat can be used for regeneration or for other industrial and domestic needs. Convective heat transfer enhancement inside a tube receiver is an important problem during design of the solar thermodynamic plants. The new type of heat transfer fluid is proposed to apply for this purpose. Such heat transfer fluid is prepared based on traditional solar oil Syltherm800 by adding aluminum oxide  $Al_2O_3$  nanoparticles. Insertion of nanoparticles changes thermodynamic properties of the base heat transfer fluid that improves convective heat transfer and can facilitate increase of thermal efficiency of the power conversion system. The mathematical model in order to find temperature fields in the moving heat transfer fluid was developed.

The temperature dependence for heat transfer fluid thermophysical characteristics were determined by approximation of the experimental data. The developed mathematical model was numerically solved using the finite volume method. The in-house Python-code was created for realization of the numerical algorithm. Non-linear conditions were taken into account at each axial step through organization of the iterative process in radial direction. Numerical stability of the finite volume method was ensued by stability for upwind differencing scheme and choice of local Peclet number which did not exceed 2. The heat transfer fluid average temperature inside the tube receiver was determined. Numerical experiments were conducted at the constant heat flow at the outlet surface of the tube receiver. Mathematical model and numerical algorithm were verified through comparison with test analytical data. The test problem was solved with first-type boundary condition. Full agreement of numerical and analytical results was obtained. Geometrical and thermodynamical parameters for numerical experiments match with parameters of real solar parabolic trough plants. It was proved that usage of nanofluid Syltherm800/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with 3%, 5% and 8% volume concentration ensures higher temperature inside tube receiver in comparison with pure solar oil Syltherm800. Obtained temperature gradient grow which is added optimal choice of all geometrical and thermodynamic parameters guaranties increase of the collector system thermal efficiency and general efficiency of the thermodynamic system for solar power conversion.

**Keywords:** solar thermodynamic system, tube receiver, nanofluid, mathematical model, numerical algorithm, finite volume method

**А.Г. Борисенко, Л.И.Кныш**

*Днепро́вский национальный университет имени Олеса Гончара*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СОЛНЕЧНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С НАНОЖИДКОСТЬЮ В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Объектом исследования в данной работе являются процессы тепломассопереноса в системе приёма тепла солнечной термодинамической установки, в которой предлагается использовать новый тип теплоносителя – наножидкость. Разработана математическая модель и создан численный алгоритм для определения температурных полей наножидкости, которая движется внутри трубчатого теплоприёмного канала. На основе аппроксимации экспериментальных данных построены зависимости теплофизических свойств наножидкости от температуры и концентрации наночастиц, эти зависимости учтены в математической модели. Проведена верификация полученных численных данных путём сравнения с результатами тестовой задачи, которая имеет аналитическое решение. Доказано, что введение наночастиц оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в традиционный теплоноситель солнечных станций Syltherm800 способствует интенсификации конвективного теплообмена в теплоприёмном канале, что, при выборе оптимальных геометрических и термодинамических параметров, может значительно увеличить общую энергетическую эффективность системы преобразования.

**Ключевые слова:** солнечная термодинамическая система, трубчатый теплоприёмный канал, наножидкость, математическая модель, численный алгоритм, метод контрольного объема.

**Вступ.** Удосконалення існуючих та створення нових енергетичних технологій є невід’ємним елементом сталого розвитку суспільства. Сучасні енергетичні тренди базуються на широкому впровадженні альтернативних джерел

енергії, серед яких найбільший потенціал мають сонячні енергетичні системи [1]. Існують два основних типи перетворення сонячної енергії – пряме (фотоелектричне) та термодинамічне. Термодинамічне перетворення має переваги з ефективності, надійності, дозволяє отримувати як тепло, так і електрику. Більш того, при підвищенні потужності термодинамічних систем їх ефективність, на відміну від фотоелектричних систем, зростає [2]. Термодинамічні системи поділяються на низькотемпературні (плаский сонячний колектор) та високотемпературні. Високотемпературні сонячні термодинамічні установки містять у своєму складі концентратори різних типів – параболоїд, параболоциліндр, лінзи Френеля та ін. Вибір геометрії концентратора визначає загальний температурний рівень системи, й на сьогодні найбільш поширеними в світі є параболоциліндричні установки, які за даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IREA), генерують більш ніж 90% всієї термодинамічної сонячної електрики [3].

Система прийому параболоциліндричних сонячних станцій складається з параболоциліндричного концентратора та трубчатого теплоприймального каналу, розташованого в фокусі концентратора. В теплоприймальному каналі рухається теплоносій, який нагрівається концентрованим сонячним потоком та передає отриману теплоту для подальшого перетворення в паротурбінному циклі. Тому актуальною є задача пошуку методів інтенсифікації конвективного теплообміну в теплоприймальному каналі, що призведе до підвищення загальної ефективності термодинамічної системи, зменшення її розмірів та вартості. Для інтенсифікації конвекції в теплоприймальному каналі широко використовуються традиційні пасивні методи – введення в канал решіток-турбулізаторів, гвинтових вставок, генераторів хвиль тощо [4, 5]. Але розвиток нанотехнологій сприяє розвитку альтернативного методу покращення конвективного теплообміну, що базується на застосуванні нанорідин в якості перспективних теплоносіїв [6].

Нанорідина – це двофазне середовище з рівномірно розподіленими частинками нанометрового розміру. Додавання таких частинок дозволяє підвищити ефективність теплообміну базової рідини без принципової перебудови технологічного процесу. В якості наночастинок для теплоносія параболоциліндричних станцій можуть бути використані чисті метали Cu, Si [7] або оксиди металів CuO, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> [8]. Крім того, дедалі популярними стають нанорідини на основі вуглецевих нанотрубок [9].

Метою даної роботи є визначення перспектив використання в якості теплоносія параболоциліндричних станцій нанорідини на основі силіконової олії Syltherm800 з наночастинками оксиду алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Особливості теплообміну в каналі теплоприймача з таким теплоносієм було досліджено в [10] в одновимірній постановці на основі балансових співвідношень. В роботі [10] знайдено лише усереднені температурні показники системи прийому та доведено, що нанорідина Syltherm800/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> може бути більш ефективною, ніж чиста Syltherm800, особливо при високих температурах. CFD моделювання тепломасопереносу в теплоприймальному каналі параболоциліндричної ста-

нції, що проведено в [11], показало підвищення до 10% загальної ефективності перетворення за рахунок додавання в Syltherm800 наночастинок  $Al_2O_3$ .

Незважаючи на відомі переваги, коштовні та громіздкі комерційні CFD пакети із закритим кодом не завжди зручні для моделювання та детального аналізу отриманих результатів. В роботі створено власний комп'ютерний алгоритм для проведення числових досліджень по визначенню температурних полів в Syltherm800/ $Al_2O_3$ , що рухається в трубчатому теплоприймальному каналі. Цей алгоритм базується на розробленій математичній моделі енергопереносу, в якій враховано залежності теплофізичних властивостей нанорідини від температури та об'ємної концентрації наночастинок. Результати числових експериментів дозволяють усвідомити можливість використання нанорідини Syltherm800/ $Al_2O_3$  в якості теплоносія параболоциліндричних станцій.

**Фізична та математична моделі.** В загальній постановці вплив наночастинок на енергетичні властивості параболоциліндричної системи необхідно досліджувати на основі задачі про енергомасоперенос теплоносія в круглій трубці зі специфічними нелінійними граничними умовами на зовнішній поверхні, що визначають значення концентрованого теплового потоку та радіаційні й конвективні теплові втрати  $E(0, \theta, z, T)$ . Вважається, що на вході в трубу з радіусом  $R$  та довжиною  $L$  подається теплоносій з фіксованою температурою  $T_{IN} = const$ . На деякій відстані від входу формується температурний профіль та профіль швидкості, які в загальному випадку є несиметричними. На рис.1 схематично зображено фізичну модель розглянутої задачі.

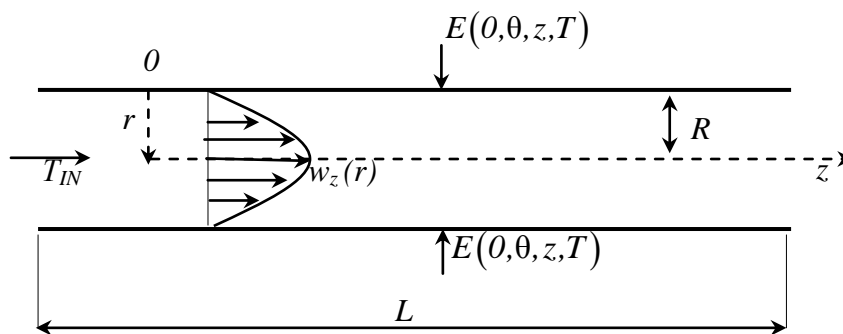


Рис. 1. Рух теплоносія в теплоприймальному каналі

Для обраної фізичної моделі математична модель має вигляд:

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

де  $r, \theta, z$  – циліндричні координати,  $m$ ;  $T$  – температура,  $K$ ;  $w_z(r)$  – профіль швидкості руху теплоносія в каналі,  $\frac{m}{c}$ ;  $C_p$  – питома теплоємність теплоно-

сія,  $\frac{Дж}{кг \cdot K}$ ;  $\rho$  – густина теплоносія,  $\frac{кг}{м^3}$ ;  $\lambda$  – теплопровідність теплоносія,  $\frac{Вт}{м \cdot K}$ .

Рівняння (1) доповнюється наступними граничними та початковими умовами:

$$\text{при } r = 0, 0 \leq \theta < 2\pi, 0 < z < L: \frac{dT(0, \theta, z)}{dr} = E(0, \theta, z, T), \quad (2)$$

$$\text{при } r = R, 0 \leq \theta < 2\pi, 0 \leq z < L: \frac{dT(0, \theta, z)}{dr} = 0, \quad (3)$$

$$\text{при } z = 0, 0 < r < R, 0 \leq \theta < 2\pi: T(r, \theta, 0) = T_{IV} = const. \quad (4)$$

Варто відзначити, що вибір профілю швидкості є важливою складовою моделювання процесу теплообміну в рідині, яка рухається в каналі. Параболіциліндричні станції, як правило, працюють при ламінарному режимі течії теплоносія, тому під час розрахунків обирався квадратичний профіль швидкості, що має вигляд

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

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

На першому етапі дослідження для аналізу побудованої математичної моделі, створення на її основі числового алгоритму та його верифікації розглядалась спрощена задача з граничними умовами першого та другого роду на зовнішній поверхні теплоприймального каналу, що відповідають сталій температурі стінки  $T_w = const$  та сталому тепловому потоку на її поверхні  $E = const$ .

**Апроксимація теплофізичних показників нанорідини.** Суттєва залежність теплофізичних властивостей теплоносія від температури робить математичну модель (1) – (5) нелінійною. Крім того, додавання наночастинок в базовий теплоносій кардинально змінює його теплофізичні показники, що, як вважається, й приводить до підвищення теплової ефективності системи. Тому розрахунок теплофізичних властивостей нанорідини є окремою задачею, яка була розв'язана в даній роботі. Такий розрахунок складався з двох етапів. На першому етапі були апроксимовані методом найменших квадратів дані експериментів по визначенню теплофізичних характеристик чистої Syltherm800 [12] у відповідному температурному інтервалі від 373 K до 673 K. Отримані функції апроксимації для густини  $\rho_b$ , теплоємності  $Cp_b$  та теплопровідності  $\lambda_b$  чистої Syltherm 800, як базової рідини, мають вигляд:

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

$$Cp_b(T) = 1108.16 + 1.707T, \quad (7)$$

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

На другому етапі були розраховані теплофізичні властивості нанорідини Syltherm800/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з різними концентраціями наночастинок. Функції апроксимації будувались в припущенні, що теплофізичні властивості наночастинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> у вибраному інтервалі температур зберігають постійні значення, які дорівнюють  $Cp_p = 773 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,  $\rho_p = 3880 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $\lambda_p = 36 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  [13]. Тоді, у відповідності до [13], залежності теплофізичних властивостей нанорідини  $\rho_{nf}$ ,  $Cp_{nf}$ ,  $\lambda_{nf}$  від температури можна розрахувати як

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

$$Cp_{nf}(T) = \frac{(1 - \varphi)Cp_b(T)\rho_b(T) + \varphi Cp_p \rho_p}{(1 - \varphi)\rho_b(T) + \varphi\rho_p}, \quad (10)$$

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

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.

Отримані температурні залежності (9) – (11) були введені в числовий алгоритм, етапи створення якого наведено нижче.

**Числовий алгоритм та аналіз результатів комп'ютерного моделювання.** Основу математичної моделі складає нелінійне параболічне рівняння конвективного теплообміну (1), яке було розв'язано методом контрольного об'єму з використанням неявної розрахункової схеми [14]. Кількість кроків по радіусу обиралась відповідно до умов стійкості розрахункової схеми «за потоком» та дорівнювала 700. Величина розрахункової сітки за довжиною розраховувалась за значенням локального числа Пекле на кожному кроці по координаті  $z$  та не перевищувало  $Pe_{LOC} < 2$  [14]. Залежність теплофізичних властивостей нанорідини від температури та концентрації наночастинок враховувалась шляхом організації ітераційного процесу в радіальному напрямі на кожному кроці за довжиною.

Комп'ютерний алгоритм було реалізовано на основі створеного Python-коду, за допомогою якого проведено параметричні числові експерименти по визначенню розподілу температур нанорідини по радіусу і довжині та середньомасової температури в теплоприймальному каналі. Розрахунки проводились для чистої Syltherm800 та Syltherm 800/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з об'ємною концентрацією наночастинок 3%, 5% та 8%. Передбачалось, що теплоносій рухається в трубочатому теплоприймальному каналі з радіусом  $R = 0.035 \text{ м}$  та довжиною  $L = 20 \text{ м}$ , температура теплоносія на вході в канал дорівнювала  $T_{IN} = 373 \text{ К}$ , а його середня швидкість була  $\bar{w} = 0,048 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , що відповідає числу Рейнольдса

$Re = 2100$ . Такі геометричні, динамічні та теплофізичні показники є стандартними для параболоциліндричних станцій [15].

На рис. 2 показано результати числових експериментів по визначенню середньомасової температури теплоносія в трубчатому теплоприймальному каналі параболоциліндричної установки при щільності теплового потоку на його зовнішній поверхні  $E = 1000 \frac{Вт}{м^2}$ .

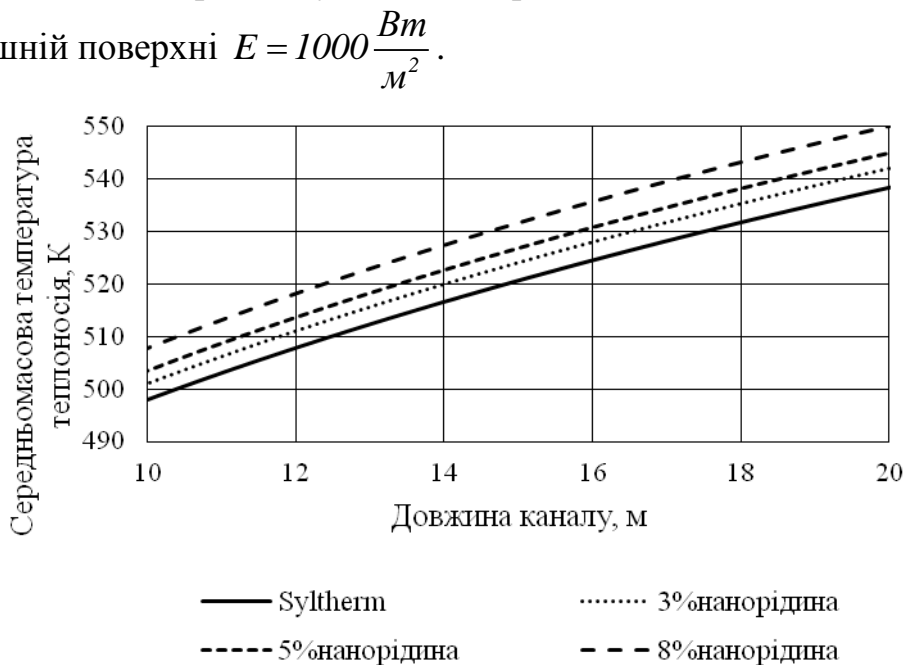


Рис. 2. Середньомасова температура теплоносія вдовж каналу

На графіку для наочності представлено елемент каналу, де температурний профіль вже сформований, тобто без врахування початкової ділянки, в якій температури розглянутих теплоносіїв мало відрізняються. Як і очікувалось, додавання наночастинок оксиду алюмінію  $Al_2O_3$  в традиційний для сонячних станцій теплоносіє Syltherm800 сприяє підвищенню температури теплоносія, що приводить до підвищення температурного градієнту в каналі та може сприяти підвищенню теплової ефективності системи прийому. В роботі [16] доведено, що інтенсифікація конвективного теплообміну, що призводить до підвищення загального температурного рівня системи, відбувається за рахунок суттєвого збільшення коефіцієнту теплопровідності нанорідин. Проведене дослідження показало, що для нанорідини Syltherm 800/ $Al_2O_3$  з об'ємною концентрацією 3%, 5% та 8% при температурі  $473K$  спостерігається зростання коефіцієнту теплопровідності на 9.8%, 17.5% та 31.2%, відповідно, в порівнянні з чистою Syltherm800. В той же час, в ході детального аналізу отриманих даних визначено, що теплоємність Syltherm800 при додаванні наночастинок  $Al_2O_3$  падає, тому питання вибору оптимальних вхідних геометричних та термодинамічних параметрів, які забезпечать підвищення загальної енергетичної ефективності системи прийому, потребує додаткових досліджень.

**Верифікація результатів числового моделювання.** Верифікація отриманих числових результатів проводилась шляхом порівняння з аналітичним

розв'язком тестовою задачі, отриманим в [17]. Аналітичний розв'язок, який було побудовано при незмінній температурі стінки каналу, має вигляд

$$\frac{T(r,z) - T_w}{T_{IN} - T_w} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{az}{wR^2}\right), \quad (9)$$

де  $A_n = \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)}$ ;  $J_1(\mu_n)$  та  $J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)$  – функції Бесселя першого роду;  $\mu_n = k_n R$  – рівняння для визначення характеристичних чисел  $k_n$ ;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності теплоносія,  $\frac{m^2}{c}$ .

Порівняння числових та аналітичних даних проводилось для фізичної моделі, що описана вище, але теплофізичні властивості теплоносія вважались сталими, а температура стінки дорівнювала температурі навколишнього середовища  $T_w = 288K = const$ . Завдяки тому, що ряд (9) швидко збігається, для аналізу було обрано лише 10 перших його членів. Для такого випадку числові та аналітичні данні повністю співпадають. На рис. 3 та рис. 4 показано розподіл температур в чистому Syltherm800 вздовж каналу та в радіальному напрямі, відповідно.

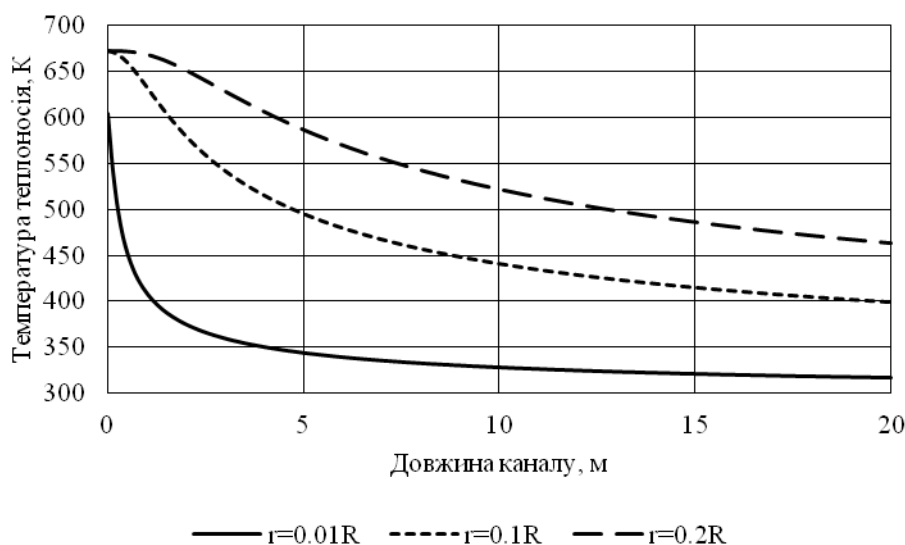
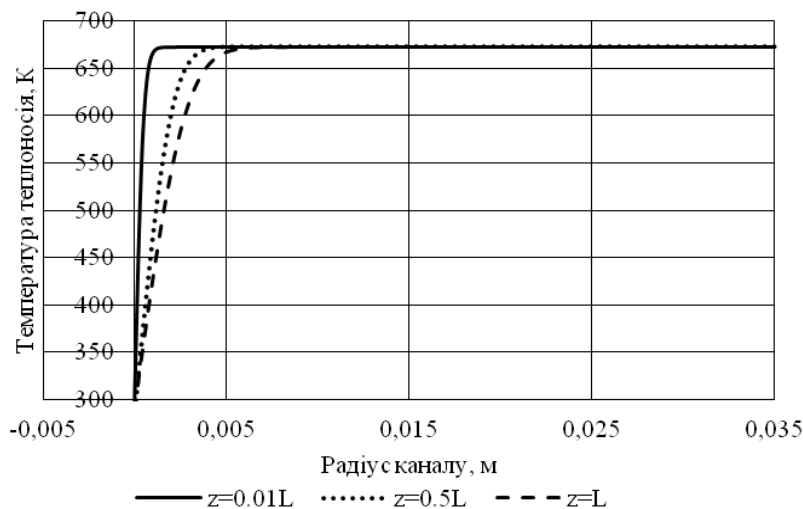


Рис.3. Розподіл температури теплоносія вздовж каналу





**Рис. 4. Розподіл температури теплоносія в радіальному напрямі**

Як видно з графіків, суттєві зміни температури теплоносія спостерігаються лише в області біля поверхні каналу. Це пов'язано з тим, що для проведення верифікації обиралась класична геометрія теплоприймального каналу, яка розрахована для нагріву теплоносія концентрованим сонячним потоком великої потужності. Вибір в якості зовнішнього впливу лише температури навколишнього середовища приводить до незначних температурних градієнтів в рідині, які виразно проявляються лише біля стінки.

**Висновки.** В роботі проведено дослідження щодо перспектив використання нанорідини Syltherm800/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  в якості перспективного теплоносія параболоциліндричних сонячних станцій. В розроблену математичну модель введено залежності теплофізичних властивостей нанорідини від температури та концентрації наночастинок, які були апроксимовані на основі даних експерименту. Створено комп'ютерний алгоритм та проведено числові експерименти по визначенню полів температур в теплоносії, що рухається всередині теплоприймального каналу. Доведено, що додавання наночастинок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в традиційний теплоносій параболоциліндричних станцій Syltherm800 підвищує його середньомасову температуру і може сприяти, при оптимальному виборі геометричних та термодинамічних проектних параметрів, зростанню загальної теплової ефективності системи перетворення енергії Сонця. Розроблена математична модель та створений числовий алгоритм пройшли верифікацію шляхом порівняння з даними тестової задачі, що була розв'язана аналітично.

#### Бібліографічні посилання

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.
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 С.74 – 78.

3. Renewable Power Generation Costs in 2018. Режим доступу: <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>.
4. Akbarzadeh S., Valipour M.S. Energy and exergy analysis of a parabolic trough collector using helically corrugated absorber tube. *Renewable Energy*. 2020. Vol.155. P. 735 – 747.
5. Bellos E., Tzivanidis C., Tsimpoukis D. Optimum number of internal fins in parabolic trough collectors. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol.137. P. 669 – 677.
6. 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.
7. Mwesigye A. Thermal performance and entropy generation analysis of a high concentration ratio parabolic trough solar collector with Cu-Therminol<sup>®</sup>VP-1 nanofluid. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol.120. P. 449 – 465.
8. Allouhi A., Benzakour Amine M., Saidur R., Kousksou T. 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.
9. 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<sup>®</sup>VP-1 nanofluid. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 119. P. 844 – 862.
10. Bellos E., Tzivanidis C. Parametric investigation of nanofluids utilization in parabolic trough collectors. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2017. Vol. 2. P. 71– 79.
11. 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.
12. Syltherm 800. Heat Transfer Fluid. Режим доступу: <https://www.dow.com/en-us/pdp/syltherm-800-stabilized-heat-transfer-fluid.39260z.html>
13. Li P., Zhang D., Xie Y. Heat transfer and flow analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–water nanofluids in microchannel with dimple and protrusion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 73. P. 456 – 467.
14. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. Taylor&Francis, 1980. 214 p.
15. 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. 106777.
16. 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.
17. 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, No.5. P. 340 – 346.

Надійшла до редколегії 10.06. 2021.