

УДК 621.311.243

doi:10.20998/2413-4295.2022.03.05

ДВОВІСНА МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА**К. О. МІНАКОВА*, Р. В. ЗАЙЦЕВ**

Кафедра мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: mesc@khp.edu.ua

АНОТАЦІЯ Розглядаються сонячні колектори та термофотоелектричні системи (PV/T), що є одними з найперспективніших систем відновлюваних джерел енергії. Електроенергія, що виробляється фотоелектричними панелями, має великий потенціал, але їй має технологічні недоліки, що не дають отримати максимальну ефективність. Розробка універсальної моделі теплообмінних процесів для оптимізації конструктивних особливостей PV/T систем на етапах проектування та виробництва дозволить збільшити термін служби таких систем та збільшити їх ефективність. Розроблена модель дозволяє враховувати більшість практичних параметрів за двома координатами плоского колектора, які враховують втрати теплової енергії, тепловий опір пластини абсорбера, теплообмін, робочі температури, тощо. Результати проведення модельних розрахунків корелюють з експериментальними даними. На основі запропонованої моделі розроблено програмний продукт для моделювання PV/T систем та проведено його тестування на відомих експериментальних результатах та готових PV/T системах. При проведенні розрахунків з використанням базових параметрів, отримано нагрівання теплоносія при проходженні одного сегмента колектора приблизно на 1,5 °C. Зазначене зростання температури досягається при швидкості теплоносія 0,6 м/с, що є досить великою швидкістю. Найбільш оптимальним буде досягнення нагрівання теплоносія при проходженні через колектор на 5 °C, що дозволить знизити швидкість протікання теплоносія аж до 0,2 м/с і значно знизити витрати електричної енергії на роботу помпи. Використання розробленої моделі дозволить вирішувати широке коло оптимізаційних завдань на етапах проектування та оптимізації сонячних колекторів та PV/T систем, отримувати оптимальні параметри конструкції для досягнення найбільшої ефективності та мінімальної собівартості.

Ключові слова: сонячний колектор; PV/T система; загальна модель; моделювання; оптимізація; ефективність

BIAXIAL HEAT BALANCE MODEL OF SOLAR COLLECTOR**K. MINAKOVA, R. ZAITSEV**

Micro- and Nanoelectronics Department, National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Solar collectors and thermophotovoltaic systems (PV/T) are considered, which are one of the most promising systems for instilling energy. Electricity, which is vibrated by photovoltaic panels, has a great potential, but there may be technological shortcomings, which do not give maximum efficiency. Development of a general model of heat exchange processes for optimizing the design features of PV/T systems at the stages of design and variability allows us to increase the term of service of such systems and increase their efficiency. The expanded model allows you to change more practical parameters for two coordinates of a flat collector, such as to change the consumption of thermal energy, thermal support of the absorber plate, heat exchange, operating temperature, etc. The results of the model investigations correlate with the experimental data. On the basis of the proposed model, a software product for the model-bath of PV/T systems was developed and tested on the experimental results of those ready-to-wear PV/T systems. In the course of carrying out the expansions, depending on the basic parameters, the heating of heat was removed when one segment of the collector was passed by approximately 1.5 °C. The designated increase in temperature is reached at a heat transfer rate of 0.6 m/s, which is to achieve a great rate. The most optimal will be the heating of heat when passing through the collector by 5 °C, which will allow to reduce the speed of heat transfer to 0.2 m/s and significantly reduce the amount of electricity consumed by the pump. The variation of the expanded model allows to implement a wide range of optimization tasks at the stages of designing and optimizing solar collectors and PV/T systems, to take the optimal design parameters to achieve the greatest efficiency and minimum occupancy.

Keywords: solar collector; PV/T system; general model; modeling; optimization; efficiency

Вступ

Комбіновані фотоелектричні системи (PV/T), що дозволяють виробляти електричну та теплову енергію, продовжують набувати актуальності. Такі системи виглядають привабливо з точки зору підвищеного сумарного ККД та зменшеної площі, необхідної для їх розміщення. ККД передових сонячних елементів не перевищує 35%, у той час як ККД PV/T систем може досягати 70% [1].

Проте розвиток таких систем спирається виключно на експериментальні дослідження, а оптимізація їхньої конструкції проводиться виключно

на практиці. Зазначене призводить до неможливості швидкого розвитку цього напрямку загалом і зводиться до вирішення окремих завдань.

Нами раніше була запропонована базова одновісна модель теплового балансу такої системи [2], яка враховує всі важливі параметри системи. Така модель дозволяє вирішувати оптимізаційні завдання, пов'язані з тепловими процесами в системах, а її дослідження показало її працездатність. Однак врахування теплоносія, що протікає, і складніші процеси в реальних системах вимагають розширення моделі для врахування процесів по двох осях.

Мета роботи

Метою даної статті було створення двовісної моделі теплового балансу PV/T системи для вирішення оптимізаційних завдань стосовно реальних систем, що використовуються на практиці. Розробка універсальної моделі дозволить охоплювати велике коло задач та спростувати оптимізацію для підвищення ефективності сучасних PV/T систем.

Двовісна модель теплового балансу PV/T системи

Розподіл температури у напрямку потоку рідини по осі OY є фактором для врахування загальної теплопередачі рідини. Температурний градієнт, створюваний у напрямі потоку рідини, збільшує втрати тепла з колектора і призводить до збільшення нагрівання рідини за один прохід трубою заданого перерізу і довжини (заданої геометрії системи). Враховуючи тепломасообмін у трубці для рідини, що протікає, різниця між температурою рідини на виході і на вході в колектор визначається виразом, що залежить від безлічі параметрів системи.

Вираз для кількості тепла, яка передається від пластини поглиначи рідини всередині трубки, було отримано в ранніх роботах [3]:

$$q'_u = WF'(I - U_L(T_f - T_a)), \quad (1)$$

де F' - співвідношення для ефективності колектора [3]:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L(W - D)F + D} + R_p \right]}$$

$$\frac{1}{U_0} = W \left[\frac{1}{U_L(W - D)F + D} + R_p \right] \quad (2)$$

Зрештою, корисна теплова енергія від колектора повинна бути передана рідині в трубці. Опір теплового потоку до текучого середовища є результатом взаємодії та опору поверхні трубки текучому середовищу. Ефективність колектора залежить від внутрішнього діаметра трубки, коефіцієнта теплопередачі між рідиною та стінками трубки, провідності матеріалу, яка у свою чергу залежить від коефіцієнта теплопровідності та геометрії системи, тобто усередненої товщини та ширини на одиницю довжини.

Фізична інтерпретація F' є результатом аналізу рівняння (1). У конкретній точці F' є відношення приросту корисної енергії до корисного приросту, який був би отриманий, якби поверхня поглинання колектора була при стаціонарній температурі рідини [3,4]. Для заданої більшості (але не всіх) геометрій інтерпретація параметра F' стає ясною, коли стає зрозуміло, що знаменник рівняння (2) - це опір теплопередачі від текучого середовища до навколишнього повітря. Цей опір позначено

символом $\frac{1}{U_0}$. У чисельнику вказано опір теплопередачі від пластини поглиначи до навколишнього повітря $\frac{1}{U_L}$. Таким чином, F' - це відношення цих двох коефіцієнтів теплопередачі або ефективність ребра колектора:

$$F' = \frac{U_0}{U_L} \quad (3)$$

Коефіцієнт корисної дії колектора по суті постійний для будь-якої конструкції колектора і витрати рідини. Відношення U_L до H , k_w і B , відношення U_L до h_w і параметр F' ефективності ребра - єдині змінні, що фігурують у рівнянні (2), які можуть бути функціями температури. Для більшості конструкцій колектора F' є найважливішою з цих змінних щодо F' . Фактор F' є функцією U_L і h_w , кожна з яких має деяку незначну температурну залежність, але значний вплив при протіканні рідини вздовж трубки, тобто обраного нами напрямку - осі OY.

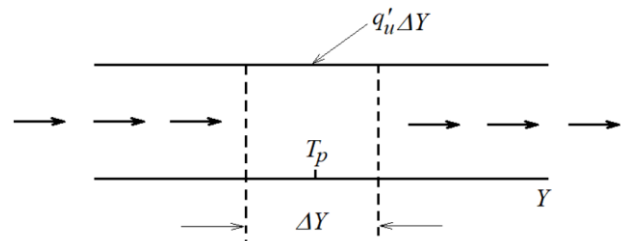


Рис. 1 - Енергетичний баланс рідини по осі OY

Провідність матеріалу може бути важливою для точного опису характеристик колектора. Whillier і Saluja [5] експериментально показали, що просте розведення або закріплення трубок на листі призводить до низької провідності з'єднання та значної втрати робочих характеристик та ефективності. Вони дійшли висновку, що необхідно мати хороший контакт метал-метал, щоб провідність зв'язку була вищою $30 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$. Очікується, що коефіцієнт корисної дії колектора зменшується зі збільшенням міжцентрової відстані трубки і збільшується зі збільшенням товщини матеріалу, так і теплопровідності. Збільшення загального коефіцієнта втрат зменшує F' .

Корисна теплова енергія на одиницю довжини, розрахована за рівнянням (1), зрештою передається рідині. Рідина надходить у колектор при температурі T_{fi} і підвищується доти, доки на виході стане T_{fo} . Посилаючись на рис. 1, ми можемо виразити баланс енергії рідини, що протікає через одну трубку завдовжки Y , як

$$\left(\frac{\dot{m}}{n}\right)C_p T_f \Big|_y - \left(\frac{\dot{m}}{n}\right)C_p T_f \Big|_{y+\Delta y} + \Delta y q'_u = 0, \quad (4)$$

де \dot{m} - масова витрата теплоносія в колекторі, а n - кількість паралельних трубок у колекторі [2]. Розділивши на y , знайшовши межу, коли y прагне нуля, і підставивши рівняння (1) замість q'_u , ми отримаємо

$$\dot{m}c_p \frac{dT_f}{dy} - nWF' [I - U_L(T_f - T_a)] = 0, \quad (5)$$

Якщо припустити, що F' і U_L не залежать від координати [6,7], рішення для температури рідини в будь-якому значенні y (за умови, що температура рідини на вході дорівнює T_{fi}) буде

$$\frac{T_f - T_a - \frac{I}{U_L}}{T_{fi} - T_a - \frac{I}{U_L}} = \exp\left(-\frac{U_L nWF' y}{\dot{m}c_p}\right), \quad (6)$$

Якщо колектор має довжину L у напрямку потоку, то температура рідини на виході T_{fo} знаходиться шляхом заміни L на y у рівнянні (6). Величина $nWF' = S$ – загальна площа колектора [2]:

$$\frac{T_{fo} - T_a - \frac{I}{U_L}}{T_{fi} - T_a - \frac{I}{U_L}} = \exp\left(-\frac{U_L S F'}{\dot{m}c_p}\right), \quad (7)$$

Для зручності визначимо величину, яка пов'язує фактичну ефективність енергії (тепла) колектора з ефективністю, якби вся поверхня колектора була при температурі рідини на вході. Ця величина називається коефіцієнтом відведення тепла колектора F_R . У вигляді рівняння вона виражається [2]

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p(T_{fo} - T_{fi})}{S(I - U_L(T_{fi} - T_a))}, \quad (8)$$

Коефіцієнт відведення тепла від колектора можна виразити як

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{SU_L} \left[\frac{(T_{fo} - T_{fi})}{\frac{I}{U_L} - (T_{fi} - T_a)} \right] = \frac{\dot{m}c_p}{SU_L} \left[\frac{\left[\frac{I}{U_L} - (T_{fi} - T_a) \right] - \left[\frac{I}{U_L} - (T_{fo} - T_a) \right]}{\frac{I}{U_L} - (T_{fi} - T_a)} \right], \quad (9)$$

або

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{SU_L} \left[1 - \frac{\frac{I}{U_L} - (T_{fo} - T_a)}{\frac{I}{U_L} - (T_{fi} - T_a)} \right] \quad (10)$$

яке з рівняння (7) може бути виражене як

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{SU_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{SU_L F'}{\dot{m}c_p}\right) \right] \quad (11)$$

Зручно ввести та визначити коефіцієнт потоку колектора F'' як відношення F_R до F' і записати таким чином

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}c_p}{SU_L F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{SU_L F'}{\dot{m}c_p}\right) \right] \quad (12)$$

Цей коефіцієнт пропускної здатності колектора [8] є функцією єдиної змінної, безрозмірної ємності колектора $\frac{\dot{m}c_p}{SU_L F'}$ і показаний на рис. 2.

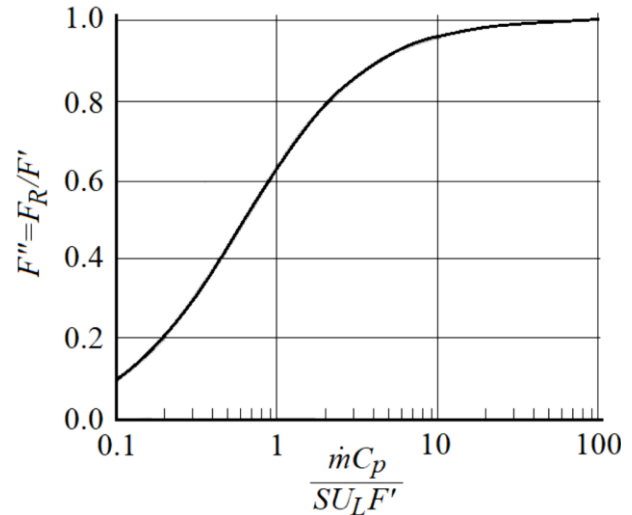


Рис. 2 - Коефіцієнт пропускної здатності колектора як функція від $\frac{\dot{m}c_p}{SU_L F'}$

Величина F_R еквівалентна ефективності звичайного теплообмінника, що визначається як відношення фактичної теплопередачі до максимально можливої теплопередачі. Максимально можливий приріст корисної енергії в сонячному колекторі відбувається, коли весь колектор знаходиться при температурі рідини на вході; втрати тепла у доквілля мінімальні [9,10]. Коефіцієнт відведення тепла від колектора, помножений на цей максимально можливий приріст корисної енергії, дорівнює фактичному значенню корисної енергії q'_u , нормованої на одиницю площі:

$$q'_u = F_R [I - U_L(T_{fi} - T_a)] \quad (13)$$

Це надзвичайно корисне рівняння (12), яке застосовується практично до всіх колекторів із плоскими пластинами. З його допомогою обчислюється приріст корисної енергії як функція температури рідини на вході. Це зручне уявлення під час аналізу PV/Т систем, оскільки температура рідини на вході зазвичай відома. Однак втрати, що залежать від температури рідини на вході, занадто малі, оскільки втрати відбуваються по всій довжині пластини колектора, і пластина має температуру, що постійно збільшується, в напрямку потоку. Вплив коефіцієнта F_R полягає у врахуванні зміни значення корисної енергії від того, що було б, якби вся пластина поглинач колектора знаходилася при температурі рідини на вході, до того, що відбувається насправді. У міру збільшення масової витрати через колектор, зростання температури через колектор зменшується.

Це призводить до менших втрат, оскільки середня температура колектора нижча і відповідно збільшується корисна енергія. Це збільшення відображається збільшенням коефіцієнта тепловідведення колектора F_R у міру збільшення масової витрати. Логічно, що F_R ніколи не може

перевищувати ККД колектора F' . Коли швидкість потоку стає дуже великою [2,11], підвищення температури від входу до виходу зменшується до нуля, але температура поверхні поглинача все одно буде вище, ніж температура рідини. Ця різниця температур пояснюється коефіцієнтом корисної дії. Отримане співвідношення – це зручний спосіб описати швидкість потоку, коли площа колектора є конструкційною змінною, оскільки збільшення обох пропорцій підтримуватиме майже постійне значення F_R .

Для оцінки продуктивності колектора необхідно знати загальний коефіцієнт втрат та коефіцієнти теплопередачі рідини. Однак і U_L і h_w певною мірою залежать від температури. Середню температуру рідини можна знайти, інтегрувавши рівняння (8) від нуля до L :

$$\langle T_f \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L T_f(y) dy, \quad (14)$$

Апробація моделі

На основі запропонованої моделі розроблено програмне забезпечення щодо розрахунків з урахуванням всіх параметрів системи. Зовнішній вигляд основного вікна програми наведено на рисунку 3.

Аналіз отриманих результатів підтверджує повну відповідність з результатами, отриманими для окремого випадку одновісної моделі [3], та з референтними результатами, отриманими в експериментальних дослідженнях [11-13].

При проведенні розрахунків з використанням параметрів, вказаних на рис. 3, отримано нагрівання теплоносія при проходженні одного сегмента колектора, котре складає приблизно $1,5^\circ\text{C}$. Зазначене зростання температури досягається при швидкості теплоносія $0,6$ м/с, що є досить великою швидкістю. Найбільш оптимальним буде досягнення нагрівання теплоносія при проходженні через колектор на 5°C [14], що дозволить знизити швидкість протікання теплоносія аж до $0,2$ м/с і значно знизити витрати електричної енергії на роботу помпи.

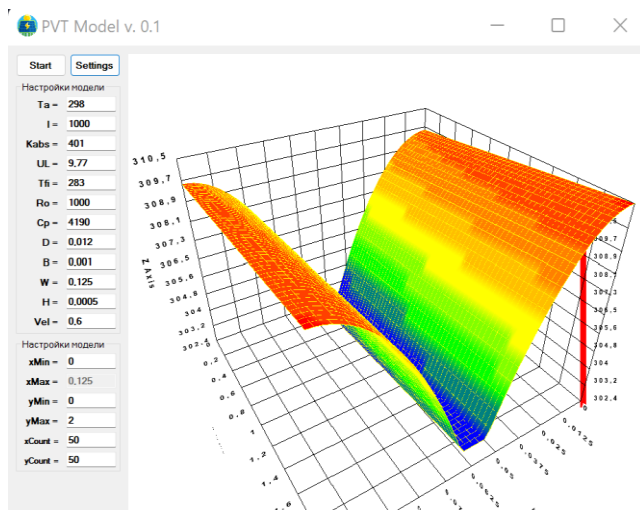


Рис. 3 – Вигляд головного вікна розробленої програми

Використання моделі для оптимізації геометричних параметрів також дозволить досягти рівномірного розподілу температури по поверхні для використання колектора спільно з сонячними елементами у складі PV/T системи.

Висновки

Подальший розвиток моделі теплообмінних процесів у пластинах абсорбера теплового колектора дозволило розробити двовісну повноцінну модель процесів теплового колектора для роботи у складі PV/T системи. Модель дозволяє враховувати всі важливі параметри системи.

На основі запропонованої моделі була розроблена програма для експресного моделювання параметрів систем, що розробляються. Проведено базові розрахунки, які підтвердили працездатність моделі, її відповідність до одновісної моделі, розробленої раніше, а також референтним експериментальним даним.

Використання розробленої моделі дозволить вирішувати широке коло оптимізаційних завдань на етапах проектування та оптимізації сонячних колекторів та PV/T систем, отримувати оптимальні параметри конструкції для досягнення найбільшої ефективності та мінімальної собівартості.

Список літератури

1. Patel J. K., Mehta N., Dabhi J. Adsorption Refrigeration System: Design and Analysis. *Mater. Today: Proc.* 2017. Vol. 4, № 9. P. 10278-10282. doi: 10.1016/j.matpr.2017.06.364.
2. Minakova K., Zaitsev R. Improving the Solar Collector Base Model for PVT System. *Journal of nano- and electronic physics.* 2020. Vol. 12. № 4. P. 04028. doi: 10.21272/jnep.12(4).04028.
3. Minakova K., Zaitsev R. Uniaxial Heat Balance Model of the Solar Collector. *Journal of nano- and electronic physics.* 2021. Vol. 13. № 5. P. 05020. doi: 10.21272/jnep.13(5).05020.
4. Ma T., Yang H., Zhang Y., Lu L., Wang X. Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015. Vol. 43. P. 1273-1284. doi: 10.1016/j.rser.2014.12.003.
5. Whillier A., Saluja G. Effect of materials and construction details on the thermal performance of solar water heaters. *Solar Energy.* 1965. Vol. 9. № 1. P. 21-26. doi: 10.1016/0038-092X(65)90156-8.
6. Dunkle R. V., Cooper P. I. A Proposed Method for the Evaluation of Performance Parameters of Flat-Plate Solar Collectors. *Paper presented at the Los Angeles Meeting of the International Solar Energy Society.* 1975.
7. Zaitsev R. V., Kopach V. R., Kirichenko M. V., et. al. Single-crystal silicon solar cell efficiency increase in magnetic field. *Functional Materials.* 2010. Vol. 17. № 4. P. 554-557.
8. Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes.* New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
9. Cui T., Xuan Y., Li Q. Technical and economic analysis of integrating low-medium temperature solar energy into power plant. *Energy Conversion & Management.* 2016. Vol. 112. P. 459-469. doi: 10.1016/j.enconman.2016.01.037.

10. Kirichenko M. V., Zaitsev R. V., Dobrozhan A. I., et. al. Adopting of DC magnetron sputtering method for preparing semiconductor films. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering*, 2017. P. 108-114. doi: 10.1109/YSF.2017.8126600.
11. Tierney M. J. Options for solar-assisted refrigeration—Trough collectors and double-effect chillers. *Renewable Energy*, 2007. Vol. 32. № 2. P. 183-199. doi: 10.1016/j.renene.2006.01.018.
12. Montero-Izquierdo A., Hirsch T., Schenk H., Druno J. C. Performance Analysis of Absorption Cooling Systems Using Linear Fresnel Solar Collectors. *Third International Conference on Applied Energy*, 2011.
13. Tamm G., Goswami D. Y., Lu S., Hasan A. A. Novel Combined Power and Cooling Thermodynamic Cycle for Low Temperature Heat Sources, Part I: Theoretical Investigation. *J. Sol. Energy Eng.* 2003. Vol. 125. № 2. P. 218-225. doi: 10.1115/1.1564576.
14. Verma S. K., Sharma K., Gupta N. K., Soni P., Upadhyay N. Performance comparison of innovative spiral shaped solar collector design with conventional flat plate solar collector. *Energy*, 2020. Vol. 194. P. 116853. doi: 10.1016/j.energy.2019.116853.
5. Whillier A., Saluja G. Effect of materials and construction details on the thermal performance of solar water heaters. *Solar Energy*, 1965, Vol. 9, no.1, pp. 21-26, doi: 10.1016/0038-092X(65)90156-8.
6. Dunkle R. V., Cooper P. I. A Proposed Method for the Evaluation of Performance Parameters of Flat-Plate Solar Collectors. *Paper presented at the Los Angeles Meeting of the International Solar Energy Society*, 1975.
7. Zaitsev R. V., Kopach V. R., Kirichenko M. V., et. al. Single-crystal silicon solar cell efficiency increase in magnetic field. *Functional Materials*, 2010, Vol. 17, no. 4, pp. 554-557.
8. Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
9. Cui T., Xuan Y., Li Q. Technical and economic analysis of integrating low-medium temperature solar energy into power plant. *Energy Conversion & Management*, 2016, Vol. 112, pp. 459-469, doi: 10.1016/j.enconman.2016.01.037.
10. Kirichenko M. V., Zaitsev R. V., Dobrozhan A. I., et. al. Adopting of DC magnetron sputtering method for preparing semiconductor films. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering*, 2017, pp. 108-114, doi: 10.1109/YSF.2017.8126600.
11. Tierney M. J. Options for solar-assisted refrigeration—Trough collectors and double-effect chillers. *Renewable Energy*, 2007, Vol. 32, no. 2, pp. 183-199, doi: 10.1016/j.renene.2006.01.018.
12. Montero-Izquierdo A., Hirsch T., Schenk H., Druno J. C. Performance Analysis of Absorption Cooling Systems Using Linear Fresnel Solar Collectors. *Third International Conference on Applied Energy*, 2011.
13. Tamm G., Goswami D. Y., Lu S., Hasan A. A. Novel Combined Power and Cooling Thermodynamic Cycle for Low Temperature Heat Sources, Part I: Theoretical Investigation. *J. Sol. Energy Eng.*, 2003, Vol. 125, no. 2, pp. 218-225, doi: 10.1115/1.1564576.
14. Verma S. K., Sharma K., Gupta N. K., Soni P., Upadhyay N. Performance comparison of innovative spiral shaped solar collector design with conventional flat plate solar collector. *Energy*, 2020, Vol. 194, pp. 116853, doi: 10.1016/j.energy.2019.116853.

References (transliterated)

1. Patel J. K., Mehta N., Dabhi J. Adsorption Refrigeration System: Design and Analysis. *Mater. Today: Proc.* 2017. Vol. 4, no. 9, pp. 10278-10282, doi: 10.1016/j.matpr.2017.06.364.
2. Minakova K., Zaitsev R. Improving the Solar Collector Base Model for PVT System. *Journal of nano- and electronic physics*, 2020, Vol. 12, no. 4, pp. 04028, doi: 10.21272/jnep.12(4).04028.
3. Minakova K., Zaitsev R. Uniaxial Heat Balance Model of the Solar Collector. *Journal of nano- and electronic physics*, 2021, Vol. 13, no. 5, pp. 05020, doi: 10.21272/jnep.13(5).05020.
4. Ma T., Yang H., Zhang Y., Lu L., Wang X. Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2015, Vol. 43, pp. 1273-1284, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.003.

Відомості про авторів (About authors)

Мінакова Ксенія Олександрівна – кандидат фізико-математичних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8869-1082; e-mail: minakova_kseniia@khp.edu.ua.

Kseniia Minakova – Ph. D., Associate Professor, Leading Researcher of Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine; e-mail: minakova_kseniia@khp.edu.ua.

Зайцев Роман Валентинович – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2286-8452; e-mail: roman.zaitsev@khp.edu.ua.

Roman Zaitsev – Doctor of Engineering Science, Docent, Head of Department, Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: roman.zaitsev@khp.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Мінакова К. О., Зайцев Р. В. Двовісна модель теплового балансу сонячного колектора. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 3 (13). С. 30-34. doi:10.20998/2413-4295.2022.03.05.

Please cite this article as:

Minakova K., Zaitsev R. Biaxial heat balance model of solar collector. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 3(13), pp. 30–34, doi:10.20998/2413-4295.2022.03.05.

Надійшла (received) 06.08.2022