

Т. І. Римар, М. В. Водько

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра теплоенергетики, теплових та атомних електричних станцій  
tetiana.i.rymar@lpnu.ua**ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ  
КОЛЕКТОРІ SLINKY ІЗ НАНОРІДИНОЮ “ВОДА –  $Al_2O_3$ ”**<https://doi.org/10.23939/ctas2022.02.165>

Досліджено теплопередачу горизонтального колектора Slinky  $\varnothing 32 \times 3$  мм спіральної конфігурації теплового насоса із нанорідиною “вода –  $Al_2O_3$ ”. Нанорідина має хороші перспективи щодо застосування в енергетичній галузі завдяки підвищеним тепловим властивостям. Дослідження виконано в діапазоні зміни концентрації наночастинок від 0,38 до 1,3 % об. для енергетичної системи енергонезалежного будинку, зокрема, для опалювального і неопалювального періодів роботи системи тепlopостачання для Київської області.

**Ключові слова:** нанорідини; тепловіддача; теплопередача; теплофізичні характеристики; система тепlopостачання.

**Вступ**

Удосконалення наявних та створення нових енергетичних технологій є невід’ємним елементом сталого розвитку суспільства. В умовах постійного збільшення потреб людства у тепловій і електричній енергії та на фоні зменшення світових запасів традиційних енергоносіїв зацікавленість у використанні нетрадиційних джерел енергії інтенсивно зростає у багатьох країнах світу. В Україні виникає потреба створити сприятливі умови для такого розвитку. Нового значення набуло і створення перспективних видів теплових агентів, особливо у період розвитку нанотехнологій. Додавання таких частинок дає можливість підвищити ефективність теплообміну базової рідини без принципової перебудови технологічного процесу. Тому актуальним є завдання пошуку методів інтенсифікації конвективного теплообміну в теплоприймальному колекторі системи тепlopостачання, що забезпечить підвищення загальної ефективності термодинамічної системи.

Інтенсифікація процесів теплообміну – одна із найважливіших проблем сучасної промисловості та енергетики. У всіх машинах, обладнанні та технологіях у цих галузях виникає потреба інтенсивного відведення теплоти [1, 2]. Одним зі способів вирішення цих проблем є ви-

користання як теплового агента нанорідин. Доцільність дослідження нанорідин пояснюється істотним підвищенням коефіцієнта тепловіддачі. Хорошу перспективу як тепловий агент мають нанорідини з незначним вмістом наночастинок  $\gamma$ -глинозему ( $Al_2O_3$ ). Такі нанорідини широко досліджували завдяки їхнім високим показникам ефективної теплопровідності. Теплопередача нанорідин із наночастинками  $\gamma$ -глинозему значно більша порівняно із традиційними тепловими агентами [3–5]. З іншого боку, додавання наночастинок підвищувало густину і в’язкість теплового агента [3–5].

Теплофізична поведінка нанорідин безпосередньо впливає на їх застосування, особливо з метою теплопередачі у системах тепlopостачання. Такі властивості, як в’язкість, теплопровідність, густина і питома теплоємність рідини, надзвичайно важливі для визначення ефективності нанорідин з метою застосування їх як теплового агента.

У роботі [6] досліджено процес тепловіддачі турбулентного потоку з використанням рідких сумішей із наночастинками  $Al_2O_3$  у прямолінійній трубі круглого перерізу. Автори виявили зростання числа Нуссельта зі збільшенням об’ємної частки наночастинок та числа Рейнольдса. Автори роботи [7] дослідили конвективну

тепловіддачу ламінарного потоку нанорідини “вода –  $Al_2O_3$ ”. Вони експериментально підтвердили підвищення тепловіддачі за рахунок збільшення концентрації наночастинок у нанорідині, яка рухається трубою круглого перерізу з постійною температурою стінок. У роботі [8] наведено результати дослідження турбулентної конвективної поведінки тепловіддачі водної дисперсії наночастинок глинозему ( $Al_2O_3$ ) із різною швидкістю потоку ( $9000 < Re < 63\,000$ ). Однак у цьому дослідженні не спостерігалось аномального підвищення тепловіддачі. У роботі [9] вивчено конвективний теплообмін нанорідини в трубі з урахуванням впливу об’ємної частки наночастинок і числа Рейнольдса на особливості тепловіддачі потоку. Автори [10] вивчали конвективний теплообмін нанорідини, виготовленої з наночастинок  $\gamma-Al_2O_3$ , що протікає через мідну трубку за ламінарного режиму. Результати показали значне посилення конвективного теплообміну, особливо у вхідній ділянці труби. У роботі [11] досліджено конвективний теплообмін нанорідини “вода –  $Al_2O_3$ ” в круглій поліетиленовій трубі  $\varnothing 40 \times 2,4$  мм геотермального зонда з постійною температурою стінки в умовах турбулентного потоку. Зазначено, що нанорідини мають кращі теплові характеристики порівняно з водою, що сприяє покращенню теплопередачі загалом.

Як бачимо, роботи [6–11] спрямовані на підвищення теплообміну за рахунок використання нанорідини “вода –  $Al_2O_3$ ” для прямолінійних труб круглого перерізу. Однак системи теплопостачання з тепловими насосами встановлюють із колекторами Slinky [12], які мають спіральну конфігурацію. Тому здійснені дослідження теплообміну нанорідин на основі  $\gamma$ -глинозему є недостатніми і потребують подальшого розвитку.

**Мета роботи** – дослідження теплових характеристик водної дисперсії з наночастинками  $\gamma$ -глинозему ( $Al_2O_3$ ) з трьома концентраціями наночастинок у річковому горизонтальному колекторі Slinky теплового насоса системи теплопостачання будинку.

#### Матеріали та методи досліджень

Для дослідження вибрано систему теплопостачання енергонезалежного будинку – житлового об’єкта площею 200–220 м<sup>2</sup>, розміщеного у с. Таценки Обухівського району Київської області. Розрахувавши тепловтрати та теплові навантаження (табл. 1), підбрали тепловий насос, а саме ґрунтовий тепловий насос Waterkotte EcoTouch DS 5027 Ai 5020.5 потужністю 19,9 кВт. Схему розміщення річкового горизонтального колектора Slinky теплового насоса системи теплопостачання подано на рис. 1.

Таблиця 1

Теплові навантаження системи теплопостачання

Розрахунковий режим	Розрахункове відпускання теплоти, $Q$ , кВт			
	на гаряче водопостачання	тепла підлога	конвектор	разом
Максимальний зимовий режим за $t_{min} = -22$ °С	8,18 (19,1)*	7,8	6,8	22,78 (33,7)*
Літній режим $t_{min} < +8$ °С	8,18 (19,1)*	–	–	8,18 (19,1)*

\* Середній (максимальний).

У роботі виконано розрахунок для двох періодів роботи системи теплопостачання: опалювального та неопалювального. Для з’ясування температурних режимів роботи природної водойми Київської області проаналізовано зміни температури води у р. Дніпро за декілька років. У розрахунках коефіцієнта теплопередачі річкового горизонтального колектора Slinky теплового насоса прийнято, що усереднена температура води

у річці становить: для опалювального періоду 6 °С; для неопалювального періоду – 18 °С.

Тепловий агент у змійовиковому горизонтальному колекторі Slinky теплового насоса має усереднену температуру: для опалювального періоду – 2 °С; для неопалювального – 12,5 °С.

Для інтенсифікації теплообміну горизонтального колектора теплового насоса було використано як тепловий агент нанорідини з наночас-

тинками γ-глинозему (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Наночастинки із середнім діаметром приблизно 30 нм мають сферичну форму. Досліджено три концентрації наночастинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> у водній дисперсії (0,38, 0,81 та 1,30 % об.). Теплофізичні властивості цих нанорідин визначено за усереднених температур для двох періодів роботи системи тепlopостачання з метою аналізу результатів теплопередачі. Отримані результати порівнювали із базовою рідиною – водою.



Рис. 1. Схема розміщення річкового горизонтального колектора Slinky теплового насоса системи тепlopостачання

Для дослідження конвективної тепловіддачі для базової рідини використовували критеріальне рівняння для турбулентного режиму руху теплового агента у круглих трубах колектора [2, 11, 12, 14]

$$Nu = \frac{\alpha_{\text{вода}} \cdot d_{\text{вн}}}{\lambda_{\text{вода}}} = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25}, \quad (1)$$

де  $Re$  – число Рейнольдса;  $(Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25}$  – поправка Міхєєва (приймаємо  $(Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25} = 1$ ).

Для визначення конвективного коефіцієнта тепловіддачі для турбулентного режиму розведених дисперсних рідин із субмікронними частинками наночастинок оксиду металу в круглих трубах колектора автори [13] запропонували таку залежність:

$$Nu = \frac{\alpha_{\text{н.р}} \cdot d_{\text{вн}}}{\lambda_{\text{н.р}}} = 0,021 \cdot Re^{0,8} Pr_{\text{н.р}}^{0,5}. \quad (2)$$

Основна частина горизонтального колектора Slinky має спіральну конфігурацію (рис. 1), тому коефіцієнти тепловіддачі, відповідно для нанорідини і води, на його зігнутій ділянці знаходяться з рівнянь [12, 14]:

$$\alpha_{\text{н.р}}^{3M} = \alpha_{\text{н.р}} \cdot \left(1 + 1,77 \cdot \frac{d_{\text{вн}}}{R}\right), \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{вода}}^{3M} = \alpha_{\text{вода}} \cdot \left(1 + 1,77 \cdot \frac{d_{\text{вн}}}{R}\right), \quad (4)$$

де  $d_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр труби колектора, м;  $R$  – радіус змійовика колектора, м.

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі для нанорідини “вода – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>” і води на прямолінійній і спіральній ділянках горизонтального колектора Slinky системи тепlopостачання, згідно із рис. 1:

$$\bar{\alpha}_{\text{н.р}} = 0,3 \cdot \alpha_{\text{н.р}} + 0,7 \cdot \alpha_{\text{н.р}}^{3M}, \quad (5)$$

$$\bar{\alpha}_{\text{вода}} = 0,3 \cdot \alpha_{\text{вода}} + 0,7 \cdot \alpha_{\text{вода}}^{3M}. \quad (6)$$

Коефіцієнт теплопередачі від річкової води до теплового агента (вода) у колекторі Slinky для досліджених періодів роботи системи тепlopостачання визначали із залежності:

$$k_{\text{вода}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{р.в}} \cdot \pi \cdot d_3} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_3}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\bar{\alpha}_{\text{вода}} \cdot \pi \cdot d_{\text{вн}}}}. \quad (7)$$

Коефіцієнт теплопередачі від річкової води до нанорідини “вода – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>” обчислювали із залежності:

$$k_{\text{н.р}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{р.в}} \cdot \pi \cdot d_3} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_3}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\bar{\alpha}_{\text{н.р}} \cdot \pi \cdot d_{\text{вн}}}}, \quad (8)$$

де  $\alpha_{\text{р.в}}$  – коефіцієнт тепловіддачі від річкової води до зовнішньої стінки колектора за швидкості теплового агента 0,2 м/с для двох періодів роботи системи тепlopостачання, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності поліетиленової труби колектора Slinky, Вт/(м·град).

### Результати досліджень та їх обговорення

Результати числового дослідження конвективної тепловіддачі у круглих трубах колектора Slinky Ø 32 × 3 мм для опалювального та неопалювального періодів роботи системи тепlopостачання наведено на рис. 2–5. Як бачимо з рис. 2, у дослідженому діапазоні зміни числа Рейнольдса  $10\,000 < Re < 46\,000$  для теплового агента із температурою 2 °С (опалювальний період) спостерігалось збільшення числа Нуссельта. Для те-

плового агента з температурою 12,5 °С (рис. 3) дослідження виконували у діапазоні зміни числа Рейнольдса  $13\ 000 < Re < 66\ 000$  і також відзначено зростання числа Нуссельта зі збільшенням числа Рейнольдса. Як бачимо з рис. 2 та рис. 3, збільшення об'ємної частки наночастинок  $Al_2O_3$  у нанорідині неістотно впливає на зростання числа Нуссельта у двох періодах роботи системи тепlopостачання.

На підставі рис. 4 встановлено, що для опалювального періоду роботи системи тепlopостачання за експлуатаційної швидкості руху теплового агента 0,64 м/с всередині труб спостерігається збільшення коефіцієнта тепловіддачі по-

рівняно із базовою рідиною: для нанорідини з наночастинками  $Al_2O_3$  0,38 % об. – на 18,9 %; для нанорідини із наночастинками  $Al_2O_3$  0,81 % об. – на 19,6 %; для нанорідини з наночастинками  $Al_2O_3$  1,3 % об. – на 20,2 %.

Аналіз рис. 5 свідчить, що для неопалювального періоду роботи системи тепlopостачання за експлуатаційної швидкості руху теплового агента 0,64 м/с всередині труб спостерігається збільшення коефіцієнта тепловіддачі порівняно із базовою рідиною: для нанорідини з наночастинками  $Al_2O_3$  0,38 % об. – на 19,98 %; для нанорідини з наночастинками  $Al_2O_3$  0,81 % об. – на 20,03 %; для нанорідини з наночастинками  $Al_2O_3$  1,3 % об. – на 20,2 %.

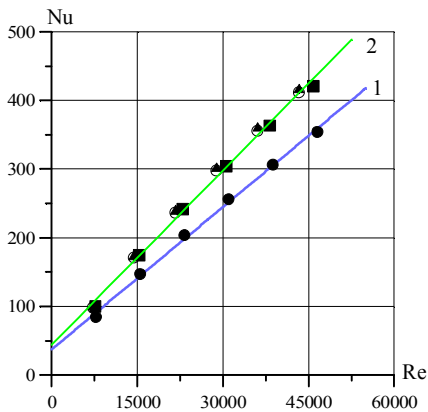


Рис. 2. Залежність критерію Нуссельта від критерію Рейнольдса для теплового агента з температурою 2 °С для опалювального періоду (зима): 1 – базова рідина; 2 – нанорідина

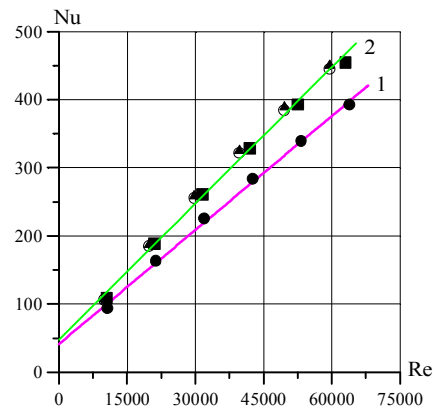


Рис. 3. Залежність критерію Нуссельта від критерію Рейнольдса для теплового агента з температурою 12,5 °С для неопалювального періоду (літо): 1 – базова рідина; 2 – нанорідина

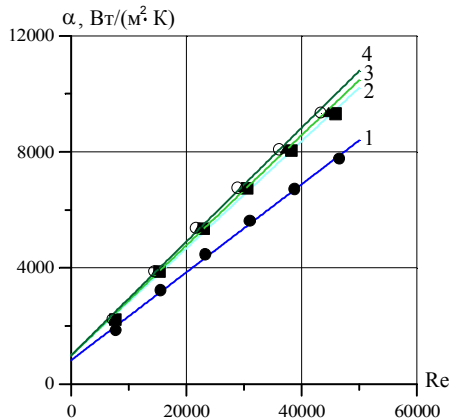


Рис. 4. Зміна коефіцієнта тепловіддачі залежно від критерію Рейнольдса для теплового агента з температурою 2 °С у опалювальний період: 1 – вода; 2 – нанорідина з наночастинками  $Al_2O_3$  0,38 % об.; 3 – нанорідина з наночастинками  $Al_2O_3$  0,81 % об.; 4 – нанорідина з наночастинками  $Al_2O_3$  1,30 % об.

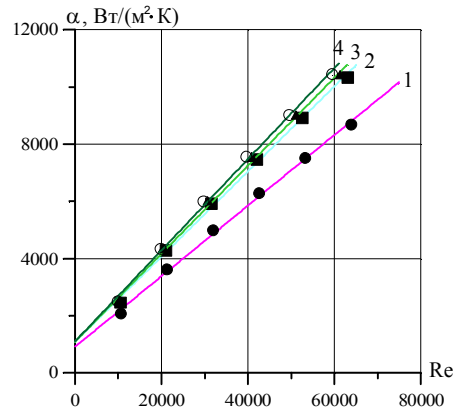


Рис. 5. Зміна коефіцієнта тепловіддачі залежно від критерію Рейнольдса для теплового агента з температурою 12,5 °С у неопалювальний період: 1 – вода; 2 – нанорідина з наночастинками  $Al_2O_3$  0,38 % об.; 3 – нанорідина з наночастинками  $Al_2O_3$  0,81 % об.; 4 – нанорідина з наночастинками  $Al_2O_3$  1,30 % об.

На підставі отриманих результатів розрахунку і з використанням залежностей (7) і (8) побудовано графічну залежність (рис. 6), представлену відношенням коефіцієнта теплопередачі для нанорідини з різними об'ємними концентраціями наночастинок  $Al_2O_3$  до коефіцієнта теплопередачі для базової рідини.

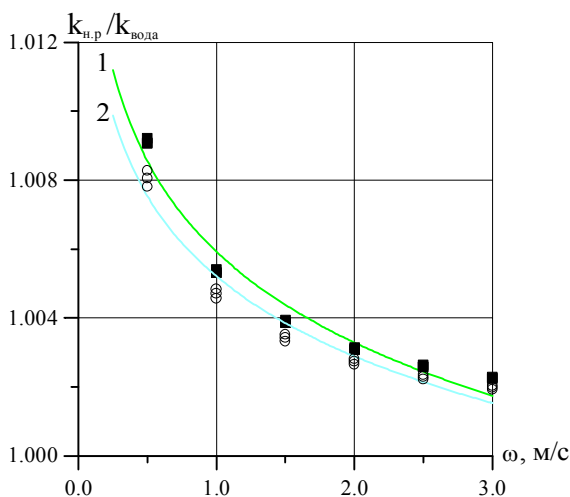


Рис. 6. Відношення коефіцієнта теплопередачі для нанорідини з різними об'ємними концентраціями наночастинок  $Al_2O_3$  до коефіцієнта теплопередачі для води від швидкості руху теплового агента поліетиленовими трубами  $\varnothing 32 \times 3$  мм річкового горизонтального колектора теплового насоса у системі тепlopостачання будинку:  
1 – з усередненою температурою теплового агента 2 °C; 2 – з усередненою температурою теплового агента 12,5 °C

Для опалювального періоду роботи системи тепlopостачання за експлуатаційної швидкості руху теплового агента 0,64 м/с у трубах збільшується коефіцієнт теплопередачі для нанорідини з дослідженими об'ємними концентраціями наночастинок  $Al_2O_3$  порівняно із базовою рідиною на 3,51 %. Для неопалювального періоду роботи системи тепlopостачання за подібних умов спостерігається збільшення коефіцієнта теплопередачі для нанорідини з дослідженими об'ємними концентраціями наночастинок  $Al_2O_3$  на 3,15 % порівняно із базовою рідиною. Тобто бачимо, що ефективність теплопередачі у опалювальний період вища, ніж у неопалювальний, однак різниця є незначною.

Варто також зазначити, що чим менша швидкість руху теплового агента у трубах колектора, тим більшим є відношення коефіцієнта теп-

лопередачі для нанорідини до коефіцієнта теплопередачі для води. Зростання об'ємної частки наночастинок  $Al_2O_3$  у нанорідині неістотно впливає на збільшення коефіцієнта теплопередачі у двох періодах роботи системи тепlopостачання. У випадку застосування нанорідини у горизонтальному колекторі отримано на 0,37 кВт теплової енергії більше, ніж для базової рідини в опалювальному періоді роботи системи тепlopостачання. Для неопалювального періоду роботи у горизонтальному колекторі отримано:

- на 0,44 кВт більше теплової енергії для нанорідини з 0,38 % об. наночастинок  $Al_2O_3$ ;
- на 0,46 кВт більше теплової енергії для нанорідини з 0,81 % об. наночастинок  $Al_2O_3$ ;
- на 0,47 кВт більше теплової енергії для нанорідини з 1,3 % об. наночастинок  $Al_2O_3$ .

### Висновки

За результатами виконаних теоретичних досліджень можемо стверджувати, що додавання незначної кількості наночастинок  $\gamma$ -глинозему до теплового агента збільшує його тепловіддачу. Це пов'язано зі зростанням теплофізичних показників теплового агента, зокрема, питомої теплоємності та теплопровідності. Конвективний коефіцієнт тепловіддачі нанорідини зростає зі збільшенням числа Рейнольдса, а також концентрації частинок. Результати розрахунків, виконаних у діапазоні зміни числа Рейнольдса  $10000 < Re < 66\ 000$ , чітко показали, що нанорідини можуть збільшувати коефіцієнт тепловіддачі навіть за низької концентрації. Порівняно із базовою рідиною, максимальне значення коефіцієнта тепловіддачі для нанорідини “вода –  $Al_2O_3$ ” спостерігалось за об'ємної частки  $Al_2O_3$  1,3 %. У цьому випадку коефіцієнт тепловіддачі зростає на 20,2 %. Для опалювального періоду роботи системи тепlopостачання коефіцієнт теплопередачі збільшився порівняно із базовою рідиною на 3,51 %; для неопалювального режиму роботи системи тепlopостачання – на 3,15 %. Тобто бачимо, що ефективність теплопередачі в опалювальний період вища, ніж у неопалювальний.

### References

1. Kizilova, N. M., & Tkachenko, Y. D. (2018). Features of heat and mass exchange in laminar flows of micro and nanofluids in tubes and channels. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu im. T. Shevchenka. Seriya: fizyko-matematychni nauky*, 4, 62–67 (in Ukrainian).

2. Rymar, T. (2021). Heat exchange and hydrodynamic characteristics of unified package of cold layer of RAH. *NTU "KhPI" Bulletin: Power and Heat Engineering Processes and Equipment*, 3, 51–54. DOI: 10.20998/2078-774X.2021.03.07 (in Ukrainian).
3. Wang, Z., Wu, Z., Han, F., Wadsö, L., & Sunden, B. (2018). Experimental comparative evaluation of a graphene nanofluid coolant in miniature plate heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 130, 148–156. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.04.021.
4. Kim, H. J., Lee, S. H., Lee, J. H., & Jang, S. P. (2015). Effect of particle shape on suspension stability and thermal conductivities of water-based bohemite alumina nanofluids. *Energy*, 90, 1290–1297. DOI: 10.1016/j.energy.2015.06.084.
5. Gupta, M., Singh, V., Kumar, R., & Said, Z. (2017). A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 638–670. DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.073.
6. Pak, B. C., & Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11, 151–170. DOI: 10.1080/08916159808946559.
7. Heris, S. Z., Etemad, S. G., & Esfahan, M. N. (2006) Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, 529–535. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.01.005.
8. Williams, W., Buongiorno, J., & Wen, Hu. L. (2008). Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids (Nanofluids) in horizontal tube. *Journal of Heat Transfer*, 130(4), 42412–42419. DOI: 10.1115/1.2818775.
9. Xuan, Y., & Li, Q. (2003). Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluid. *Journal of Heat Transfer*, 125(1), 151–155. DOI: 10.1115/1.1532008.
10. Wen, D., & Ding, Y. (2004). Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(24), 5181–5188. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.07.012.
11. Rymar, T., Kazmiruk, M. & Shyika I. (2021). *The Efficiency of Nanofluid Use in the Heat Supply System of a House with a Geothermal Heat Pump, 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*. Odessa, Ukraine: IEEE. DOI: 10.1109/NAP51885.2021.9568625.
12. Rymar, T. (2022). Use of water-TiO<sub>2</sub> nanofluid in horizontal Slinky collector of heat pump. *Energy Engineering and Control Systems*, 8(1), 7–14. DOI: 10.23939/jeecs.2022.01.007.
13. Bock, Choon Pak & Young, I. Cho (1998). Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids With Submicron Metallic Oxide Particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151–170. DOI: 10.1080/08916159808946559.
14. Vasylenko, S. M., Ukrainets, A. I., & Olishchuk, V. V. (2004). *Basics of heat and mass transfer*. Kyiv: NUKHT (in Ukrainian).

T. I. Rymar, M. V. Vodko

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Heat Engineering and Thermal and Nuclear Power Plants

#### THE HEAT TRANSFER EFFICIENCY IN SLINKY HORIZONTAL COLLECTOR WITH “Water – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>” NANOFLUID

The heat transfer of the “water – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>” nanofluid in the Ø 32 × 3 mm horizontal Slinky collector of spiral configuration of a heat pump have been studied. Nanofluid has good characteristics for use in the energy sector due to its high thermal properties. Studies were performed in the range of changes in the concentration of nanoparticles from 0.38 to 1.3 % vol. for the energy system of an energy-independent building, in particular, for the heating and non-heating periods of the heat supply system for the Kyiv region.

**Key words:** nanofluids; convective heat transfer coefficient; overall heat transfer coefficient; thermal characteristics; heat supply system.