

**С. Й. ТКАЧЕНКО, О. В. ВЛАСЕНКО, Н. В. РЕЗИДЕНТ**

### ТЕПЛООБМІН ЦИЛІНДРИЧНОГО РІДИННОГО ТІЛА ОБМЕЖЕНОЇ ВИСОТИ З НАВКОЛИШНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Виконано експериментальні дослідження тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкого металевго циліндра і досліджуванім рідинним середовищем з відомою інформацією про теплофізичні властивості. Коефіцієнти тепловіддачі від стінки до досліджуваного рідинного середовища визначено з застосуванням методу регулярного теплового режиму, розрахунково-експериментального методу та із застосуванням критеріального рівняння в системі «навколишнє середовище  $I$  – тіло  $II$ ».

**Ключові слова:** коефіцієнт тепловіддачі, регулярний тепловий режим, нестационарний теплообмін, темп охолодження (нагрівання).

**С. И. ТКАЧЕНКО, О. В. ВЛАСЕНКО, Н. В. РЕЗИДЕНТ**

### ТЕПЛООБМЕН ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЖИДКОСТНОГО ТЕЛА ОГРАНИЧЕННОЙ ВЫСОТЫ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Выполнены экспериментальные исследования теплоотдачи между внутренней поверхностью тонкого металлического цилиндра и исследуемой жидкостной средой с известной информацией о теплофизических свойствах. Коэффициенты теплоотдачи от стенки к исследуемому жидкостной среды определены с применением метода регулярного теплового режима, расчетно-экспериментального метода и с применением критерияльного уравнения в системе «окружающая среда  $I$  – тело  $II$ ».

**Ключевые слова:** коэффициент теплоотдачи, регулярный тепловой режим, нестационарный теплообмен, темп охлаждения (нагревания).

**S. TKACHENKO, O. VLASENKO, N. REZYDENT**

### HEAT EXCHANGE OF THE CYLINDRICAL LIQUID BODY OF A LIMITED HEIGHT WITH THE ENVIRONMENT

The experimental investigations of the intensity of the heat exchange between the internal surface of the thin-wall metal cylinder and the studied liquid medium were carried out in conditions of its cooling (heating), i.e. under nonstationary heat exchange conditions. The existence of the regular thermal mode in the liquid medium surrounded by the thin-wall metal cylinder has been established. Local in time heat loss coefficients were derived using appropriate dimensionless equations for the stationary mode conditions of heat-exchange in a large volume. Heat loss coefficients were determined using regular thermal mode methods and computational-&-experimental heat loss coefficients. The changes in the relative values of the heat loss coefficients were analyzed using the method of regular thermal mode and computational-&-experimental heat loss coefficients. The deviations in the values of given coefficients in time are mainly within  $\pm 10\%$ . Relative values of the heat loss coefficients deviate within  $\pm 40\%$  using appropriate dimensionless equations for the conditions of the stationary mode of heat exchange in a large volume. This conclusion is natural because the cooling (heating) process is nonstationary.

**Key words:** heat loss coefficient, regular heat mode, nonstationary heat exchange, and the cooling (heating) rate.

#### Вступ

В роботах [1–2] експериментально встановлені ознаки регулярного теплового режиму в рідинному середовищі, яке знаходиться в тонкостінному металевому циліндрі кінцевих розмірів. Кількість досліджень інтенсивності теплообміну між рідинами і твердими стінками в посудинах з обмеженими розмірами явно недостатня, якщо до уваги прийняти запити існуючих і перспективних технологій [3]. Тобто заплановані дослідження цікаві в двох аспектах: інтенсивність теплообміну в рідинах залитих в посудину з обмеженими розмірами і зв'язок між інтенсивністю теплообміну та показниками регулярного теплового режиму.

#### Мета роботи

Перевірити можливість застосування методів регулярного теплового режиму нестационарної теплопровідності для прогнозування інтенсивності теплообміну між металевю стінкою і досліджуванім

рідинним середовищем з відомою інформацією про теплофізичні властивості в системі «навколишнє середовище  $I$  – тіло  $II$ ».

#### Основні результати

На рис. 1 показано вибрану авторами формалізацію об'єкта досліджень (рис. 1). В роботі вивчається теплообмін в системі «навколишнє середовище  $I$  – тіло  $II$ ». Навколишнє середовище  $I$  – вода. Рідинні середовища в тілі  $II$ , які охолоджуються (нагріваються) – рафінована соняшникова олія марки П ДСТУ 4492, дистильований гліцерин, цукровий розчин концентрацією 50 %, 60 %, 70 %. Дослідження проводяться на експериментальному стенді, який описаний в [3–4].

Основними елементами експериментальної установки є дві робочі порожнини – зовнішня (зовнішній циліндр з теплоізолюваною поверхнею, заповнений водою), об'ємом  $V_1$ , та внутрішня (тонкий металевий циліндр діаметром 100/99 мм, заповнений досліджуванім рідинним середовищем),

© С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко, Н. В. Резидент, 2021

об'ємом  $V_2$ , де  $V_1$  більший за  $V_2$  в 3 рази. Тому авторами зовнішній кільцевий об'єм  $V_1$  взято як «великий об'єм».

На рис. 1 показано схему теплообміну в системі «навколишнє середовище I – тіло II».

Встановлено, що в системі «навколишнє середовище I – тіло II» виконуються ознаки регулярного теплового режиму (рис. 2). Про це свідчить сталість темпу охолодження (нагрівання) в досліджуваному рідинному середовищі [5]

$$m = (\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2) / (\tau_1 - \tau_2) = \text{const},$$

де  $\vartheta_1, \vartheta_2$  – надлишкова середньооб'ємна температура досліджуваного рідинного середовища в циліндричній посудині зі сторони води відповідно в моменти часу  $\tau_1$  і  $\tau_2$ ,  $\vartheta = |\bar{T}_1 - \bar{T}_2|$ , °C. Числові значення темпу охолодження (нагрівання)  $m$  визначені з графічних залежностей (рис. 2) показано в табл. 1.

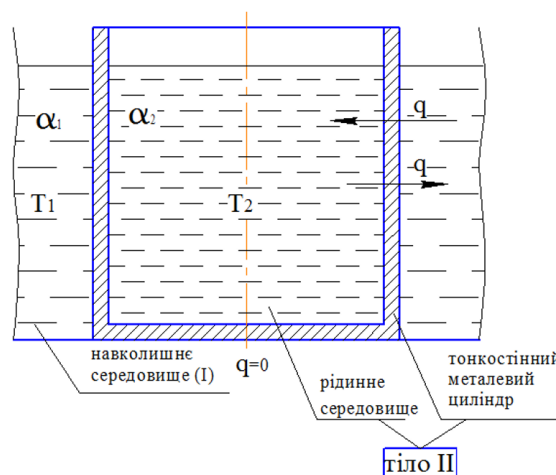
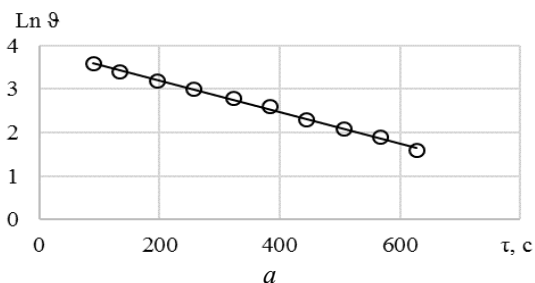


Рис. 1 – Схема теплообміну тіла II з навколишнім середовищем I

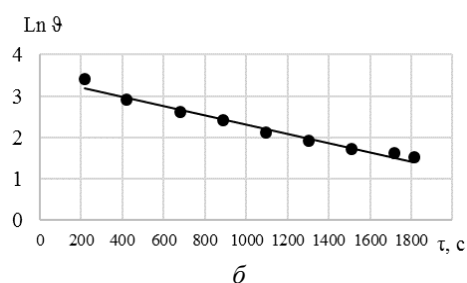


Рис. 2 – Розподіл надлишкової температури за часом:

а – цукровий розчин  $c = 60\%$  під час нагрівання; б – цукровий розчин  $c = 60\%$  під час охолодження

Таблиця 1 – Темп охолодження (нагрівання) досліджуваного рідинного середовища

Досліджуване рідинне середовище		Напрямок теплообміну	Темп охолодження (нагрівання) $m, c^{-1}$
Цукровий розчин	$c = 50\%$	Нагрівання	0,0032
		Охолодження	0,0029
	$c = 60\%$	Нагрівання	0,0036
		Охолодження	0,0015
Соняшникова олія	Нагрівання	0,0046	
	Охолодження	0,0033	
Дистильований гліцерин		Нагрівання	0,0027

З використанням отриманих експериментальних даних розраховуються коефіцієнти тепловіддачі  $\bar{\alpha}_2$  між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевго циліндра і досліджуваним рідинним середовищем за умов охолодження (нагрівання) в діапазоні регулярного теплового режиму. Цей діапазон в часі  $\tau_1 - \tau_n$  ( $\tau_1$  – початок РТР,  $\tau_n$  – кінець експериментального дослідження в межах РТР). У вказаному діапазоні охолодження – нагрівання визначається середнє значення коефіцієнтів тепловіддачі між водою (навколишнє середовище) і тілом II  $\bar{\alpha}_1$  та коефіцієнтів нерівномірності розподілу температур в тілі II  $\bar{\psi}$  для всього діапазону проведення експерименту. Крім того, визначаються локальні коефіцієнти  $\bar{\alpha}_1$  та  $\bar{\psi}$  в обмежених діапазонах часу  $\tau_{li} - \tau_{1(n+i)}$ .

Для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі  $\bar{\alpha}_2^{\text{РТР}}$  необхідно визначити середні температури води  $\bar{T}_1$  та досліджуваного рідинного середовища  $\bar{T}_2$ . Температура  $\bar{T}_1$  потрібна для визначення теплофізичних властивостей води для розрахунку інтенсивності тепловіддачі  $\bar{\alpha}_1$ ,  $\bar{T}_2$  – для визначення питомої теплоємності  $C_2$  досліджуваного рідинного середовища.

За умови  $F = \text{const}^*$ ,  $\alpha_1 \approx \text{const}^*$ ,  $C(t) \approx \text{const}^*$ ,  $m = \text{const}$  для досліджуваного рідинного середовища і  $k = \text{var}$  отримуємо залежність для визначення локальних за часом коефіцієнтів тепловіддачі методом регулярного теплового режиму (РТР)

$$\bar{\alpha}_2^{\text{РТР}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{експ}}} - \frac{F\bar{\psi}}{mC_2}}, \quad (1)$$

де  $k_{\text{експ}} = Q/(F\Delta t)$  – експериментальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$Q$  – тепловий потік, що сприймається досліджуваним рідинним середовищем, Вт;

$\Delta t$  – середній температурний напір, °С;

$F$  – площа тонкостінного металевого циліндра, м<sup>2</sup>;

$C_2$  – питома теплоємність досліджуваного рідинного середовища, Дж/К.

Для розрахунку  $\bar{\alpha}_2$  методом регулярного теплового режиму показники  $m$ ,  $\bar{\alpha}_1$  і  $\bar{\psi}$  розраховуються для всього діапазону досліджень, коефіцієнт теплопередачі  $k_{\text{експ}}$  – окремо для кожної дослідної ділянки.

Коефіцієнти тепловіддачі  $\bar{\alpha}_2$  розраховуються експериментальним методом (РЕМ) визначаються локально за часом таким чином

$$\bar{\alpha}_2^{\text{РЕМ}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{експ}}} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}}, \quad (2)$$

де  $\delta_{\text{ст}}$  – товщина стінки тонкого металевого циліндра, м;

$\lambda_{\text{ст}}$  – теплопровідність стінки тонкого металевого циліндра, Вт/(м·К).

Коефіцієнт тепловіддачі  $\bar{\alpha}_2$  визначений за методом теорії подібності (МТП) визначається локально за часом за формулою [6–7]

$$\bar{\alpha}_2^{\text{МТП}} = \frac{\text{Nu}_2 \lambda_2}{H}, \quad (3)$$

де  $\text{Nu}_2$  – критерій Нуссельта;

$H$  – визначальний розмір внутрішньої циліндричної посудини (висота), м;

$\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності досліджуваного рідинного середовища, Вт/(м·К).

Коефіцієнти тепловіддачі  $\bar{\alpha}_2^{\text{МТП}}$  визначаються локально за часом за відомим критеріальним рівнянням стаціонарного режиму для «великого об'єму» [7] в умовах ламінарного режиму  $10^3 < (\text{GrPr}_p) < 10^8$

$$\text{Nu}_2 = 0,76(\text{Gr}_2 \text{Pr}_2)_H^{0,25} \left( \frac{\text{Pr}_p}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

де  $\text{Gr}_2$  – критерій Грасгофа,

$$\text{Gr}_2 = \frac{g\beta_2 \Delta T H^3}{\nu^2};$$

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\beta_2$  – коефіцієнт температурного розширення досліджуваного рідинного середовища, °С<sup>-1</sup>;

$\Delta T = |\bar{T}_2 - \bar{T}_{\text{ст}}|$  – температурний напір;

$\bar{T}_2$  – середньооб'ємна температура досліджуваного рідинного середовища, °С;

$\bar{T}_{\text{ст}}$  – середня температура стінки, °С;

$\text{Pr}_{p2}$  – критерій Прандтля для середньооб'ємної температури досліджуваної рідини в межах  $\tau_1 - \tau_n$ ;

$\text{Pr}_{\text{ст}}$  – критерій Прандтля для досліджуваної рідини для температури стінки в процесі ітерацій;

$\nu_2$  – кінематична в'язкість досліджуваної рідини, м<sup>2</sup>/с.

З використанням рівнянь (1)–(3) проаналізовано залежності  $\bar{\alpha}_2^{\text{РТП}}/\bar{\alpha}_2^{\text{РЕМ}} = f(\tau)$  і  $\bar{\alpha}_2^{\text{МТП}}/\bar{\alpha}_2^{\text{РЕМ}} = f(\tau)$  в межах часу регулярного теплового режиму. На рис. 3 подано залежності  $\bar{\alpha}_2^{\text{РТП}}/\bar{\alpha}_2^{\text{РЕМ}} = f(\tau)$ .

Проаналізовано відносні значення  $\bar{\alpha}_2^{\text{РТП}}/\bar{\alpha}_2^{\text{РЕМ}}$ ,  $\bar{\alpha}_2^{\text{МТП}}/\bar{\alpha}_2^{\text{РЕМ}}$ . Коливання значень  $\bar{\alpha}_2^{\text{РТП}}/\bar{\alpha}_2^{\text{РЕМ}}$  за часом в основному не перевищує  $\pm 10\%$ . В результаті аналізу і порівняння коефіцієнтів тепловіддачі, розрахованих із застосуванням теорії подібності  $\bar{\alpha}_2^{\text{МТП}}$  та знайдених методом регулярного теплового режиму  $\bar{\alpha}_2^{\text{РТП}}$ , встановлено, що між результатами є суттєва розбіжність, яка знаходиться в межах 40%. Таким чином, застосування методу регулярного теплового режиму дозволяє описати закономірності теплообміну між рідинним середовищем і металевою циліндричною стінкою.

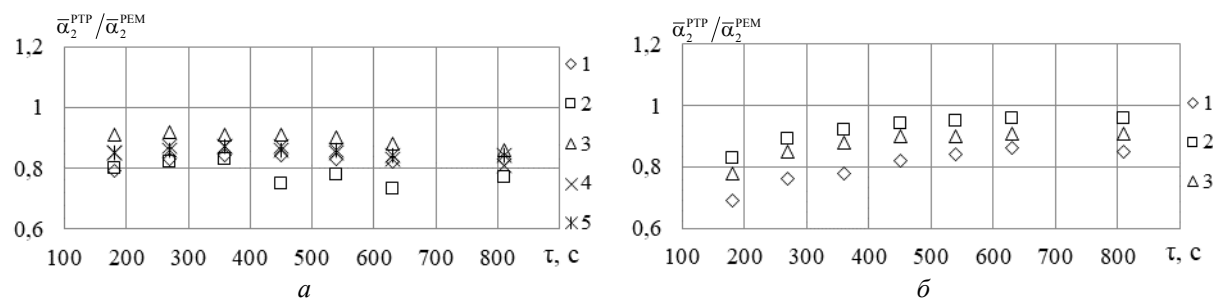


Рис. 3 – Результати розрахунків  $\bar{\alpha}_2^{\text{РТП}}/\bar{\alpha}_2^{\text{РЕМ}}$  за часом  $\tau$ : *a* – під час нагрівання: 1 – цукровий розчин концентрацією 50%; 2 – 60%; 3 – 70%; 4 – соняшникова олія; 5 – гліцерин дистильований; *б* – під час охолодження: 1 – цукровий розчин концентрацією 50%; 2 – 60%; 3 – соняшникова олія

## Висновки

1 Досліджено інтенсивність тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра і досліджуваним рідинним середовищем за умов його охолодження (нагрівання), тобто за умов нестационарного теплообміну. Встановлено існування регулярного теплового режиму в рідинному середовищі обмеженому тонкостінним металевим циліндром (тіло II).

2 Визначено коефіцієнти тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра і досліджуваним рідинним середовищем в процесі охолодження (нагрівання) методом регулярного теплового режиму ( $\bar{\alpha}_2^{\text{PTP}}$ ), розрахунково-експериментальним методом ( $\bar{\alpha}_2^{\text{PEM}}$ ) та за методом теорії подібності ( $\bar{\alpha}_2^{\text{МТП}}$ ).

3 Проаналізовано відносні локальні за часом значення  $\bar{\alpha}_2^{\text{PTP}}/\bar{\alpha}_2^{\text{PEM}}$ ,  $\bar{\alpha}_2^{\text{МТП}}/\bar{\alpha}_2^{\text{PEM}}$ . Коливання значень  $\bar{\alpha}_2^{\text{PTP}}/\bar{\alpha}_2^{\text{PEM}}$  за часом, в основному не перевищує  $\pm 10\%$ ,  $\bar{\alpha}_2^{\text{МТП}}/\bar{\alpha}_2^{\text{PEM}}$  – знаходиться в межах  $\pm 40\%$ . Метод регулярного теплового режиму дозволяє описати закономірності теплообміну між рідинним середовищем і металевим циліндричною стінкою в посудині обмежених розмірів.

## Список літератури

1. Ткаченко С. Й. Експериментальне дослідження нестационарного теплообміну в суміші / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, Д. І. Денесяк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2018. – № 1. – ISSN 2307-5376 (on-line). – URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/562/538> (дата звернення: 05.09.2021).
2. Ткаченко С. Й. Дослідження темпу нагрівання гетерогенного рідкого середовища / С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко // Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві. – 2019. – № 1. – С. 127–133. – ISSN 2311-1429 (print). – ISSN 2311-1437 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-127-133>.
3. Ткаченко С. Й. Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів: моногр. / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 148 с.

4. Tkachenko S. I. Processes of Heat Transfer in Rheologically Unstable Mixtures of Organic Origin has now been published in the following paginated issue / S. I. Tkachenko, N. V. Pishenina, T. Yu. Rummyantseva // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2014. – Vol. 87, Is. 3. – P. 721–728.
5. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 408 с.
6. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – изд. 2-е, стереотип. – Москва: Энергия, 1977. – 344 с.
7. Исаченко В. П. Теплопередача: учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – изд. 3-е, перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1975. – 488 с.

## References (transliterated)

1. Tkachenko S. J., Rezydent N. V., Denesjak D. I. (2018), "Eksperymental'ne doslidzhennja nestacionarnogo teploobminu v sumishi [Experimental study of the nonstationary heat exchange in the mixture]", *Naukovi praci Vinnyts'kogo nacional'nogo tehničnogo universytetu* [Scientific Works of Vinnytsia National Technical University], no. 1, ISSN 2307-5376 (on-line), Access mode: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/562/538> (accessed 05 September 2021).
2. Tkachenko S. J., Vlasenko O. V. (2019), "Doslidzhennja tempu nagrivanja heterogennogo rідkogo seredovyshha [Studying the Temple of Heating of Heterogeneous Related Environment], *Suchasni tehnologii' materialy i konstrukcii' v budivnyctvi* [Modern technology, materials and design in construction], no. 1, pp. 127–133, ISSN 2311-1429 (print), ISSN 2311-1437 (on-line), <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-127-133>.
3. Tkachenko S. I., Pishenina N. V. (2017), *Novi metody vyznachennja intensyvnosti teploobminu v systemah pererobky organichnyh vidhodiv* [New methods for determining the intensity of heat transfer in organic waste processing systems] Vinnyts'kyj nacional'nyj tehničnyj universytet [Vinnytsia National Technical University], Vinnytsia, 148 p. ISBN 978-966-641-699-8
4. Tkachenko S. I., Pishenina N. V., Rummyantseva T. Yu. Processes of Heat Transfer in Rheologically Unstable Mixtures of Organic Origin has now been published in the following paginated issue. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2014. Vol. 87, Is. 3. P. 721–728.
5. Kondrat'ev G. M. (1954), *Regulyarnyj teplovoj rezhim* [Regular thermal regime]. Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehniko-teoreticheskoy literatury [State publishing house of technical and theoretical literature], Moscow, 408 p.
6. Miheev M. A., Miheeva I. M. (1977) *Osnovy teploperedachi* [Heat Transfer Basics] Jenergija [Energy], Moscow, 344 p.
7. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. (1975) *Teploperedacha* [Heat transfer] Jenergija [Energy], Moscow, 488 p.

Надійшла (received) 08.03.2021

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Ткаченко Станіслав Йосифович (Ткаченко Станислав Иосифович, Tkachenko Stanislav)** – доктор технічних наук, професор кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна; e-mail: [stahit6937@gmail.com](mailto:stahit6937@gmail.com).

**Власенко Ольга Володимирівна (Власенко Ольга Владимировна, Vlasenko Olga)** – аспірант кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна; e-mail: [olgakysak7@gmail.com](mailto:olgakysak7@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8975-0873>.

**Резидент Наталія Володимирівна (Резидент Наталия Владимировна, Rezydent Natalia)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна; e-mail: [rezidentnvl@ukr.net](mailto:rezidentnvl@ukr.net).