

С. Й. Ткаченко¹
 О. В. Власенко¹
 В. С. Ткачук¹

ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ У ВІДХОДАХ ПТАХІВНИЦТВА

¹Вінницький національний технічний університет

Досліджено систему «навколишнє середовище (вода в кільцевому об'ємі) — тонка циліндрична металева стінка — досліджуване рідинне середовище». Досліджено теплообмін під час нагрівання/охолодження розбавленого водою курячого посліду в умовах вимушеної конвекції. Курячий послід є багатофазним середовищем, оскільки до його складу входять як тверді частинки, так і рідина.

Дослідження проведено на експериментальному стенді, розробленому на кафедрі теплоенергетики ВНТУ, за умов вимушеної конвекції.

Усередненні температури визначаються як середньоарифметичні, за результатами замірювань температур терморезисторами на вертикальних термозондах у певний момент часу. Обробку здійснено методом стаціонарного теплообміну, досліджуючи весь проміжок часу.

Провівши аналіз розподілу надлишкової температури за часом $\ln \vartheta = f(T)$ у дослідженні теплообміну курячого посліду в умовах його охолодження і нагрівання, визначено лінійний темп охолодження/нагрівання $m = \text{const}$, що характерно для регулярного теплового режиму у разі охолодження/нагрівання твердого тіла (системи твердих тіл) і підтримки сталої температури навколишнього середовища.

Експериментально встановлено, що в дослідній системі існує регулярний тепловий режим: темп нагрівання/охолодження сталей, $m = \text{const}$; коефіцієнт тепловіддачі в процесі регулярного теплового режиму практично сталий $\bar{\alpha}_1 \approx \text{const}$.

Визначено коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої стінки циліндра до досліджуваного середовища методом регулярного теплового режиму $\bar{\alpha}_2^{\text{ТР}}$ та розрахунково-експериментальним методом $\bar{\alpha}_2^{\text{РЕМ}}$.

Провівши аналіз і зіставлення коефіцієнтів тепловіддачі, розрахованих із застосуванням розрахунково-експериментального методу $\bar{\alpha}_2^{\text{РЕМ}}$ та знайдених методом регулярного теплового режиму $\bar{\alpha}_2^{\text{ТР}}$, встановлено розбіжність в межах 20 %.

Встановлено, що метод регулярного теплового режиму можна застосовувати для визначення інтенсивності теплообміну у багатофазних середовищах.

Ключові слова: регулярний тепловий режим, субстрат, біогазова установка, теплообмінне устаткування, термостабілізація, теплофізичні властивості, експериментально-розрахунковий метод, математична модель.

Вступ

Розвиток птахівництва приводить до високої концентрації птиці на обмеженій території, що сприяє зростанню надходження і накопичення великих обсягів пташиного посліду на територіях птахівницьких господарств, в ярах, поблизу річок і населених пунктів, створюючи екологічну небезпеку для людей, флори і фауни.

Невирішеним етапом в технології є переробка твердої фракції зброшеного пташиного посліду, яка є цінним органічним добривом з високим вмістом поживних речовин і біологічно активних стимуляторів росту рослин.

Застосування тих чи інших способів переробки пташиного посліду дозволяє вирішити питання утилізації його, проте це досягається за рахунок додаткових затрат енергії, нерационального використання енергетичного та хімічного його потенціалу і підвищенням негативного впливу на навколишнє середовище.

Тому на сьогодні актуальним є використання пташиного посліду для виробництва біогазу.

Мета роботи — дослідити теплоперенос в системі «вода в кільцевому об'ємі — тонка циліндрична стінка — досліджуване рідинне середовище».

Основні результати

Досліджено систему «навколишнє середовище (вода в кільцевому об'ємі) — тонка циліндрична металева стінка — досліджуване рідинне середовище». Вивчається теплообмін під час нагрівання/охолодження розбавленого водою курячого посліду (далі — курячого посліду) в умовах вимушеної конвекції. Курячий послід є багатофазним середовищем, оскільки до його складу входять тверді частинки на основі рідинного середовища.

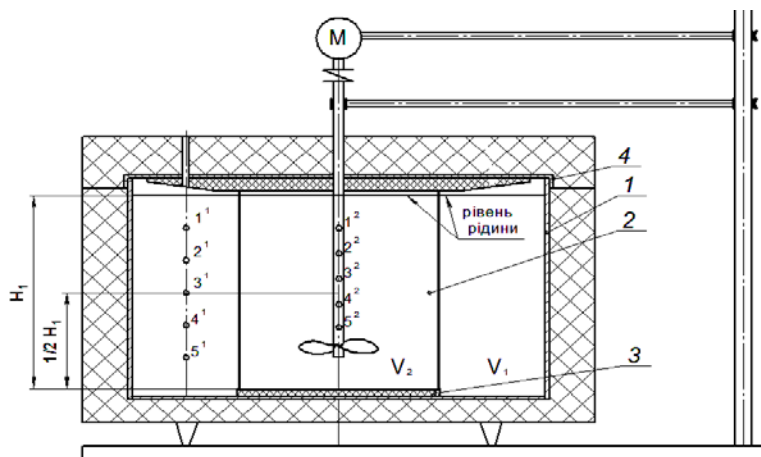


Рис. 1. Експериментальний стенд: 1 — зовнішня посудина; 2 — внутрішня посудина; 3 — теплоізоляційна підставка; 4 — кришка; 1¹...5¹, 1²...5² — точки вимірювання температури (одночасна фіксація)

Дослідження проведено на експериментальному стенді (рис. 1), розробленому на кафедрі теплоенергетики ВНТУ [1]. Серії дослідів проводились в умовах вимушеної конвекції. Експериментальна установка обладнана змінною пропелерною мішалкою ($d_m = 0,058$ м). Співвідношення діаметрів мішалки та внутрішньої робочої ємності $d_m/D_{вн} = 0,6$; V_1 — зовнішня робоча ємність; V_2 — внутрішня робоча ємність. Висота циліндричної теплообмінної поверхні $H = 0,108$ м. Діапазон регулювання частоти обертання мішалки 26...150 об/хв. Характеристики експериментальної установки: висота циліндричної тепло-

обмінної поверхні $H_1 = 0,108$ м; діаметр мішалки $d_m = 0,058$ м; співвідношення діаметрів мішалки та внутрішньої робочої порожнини $d_m/D_v = 0,6$ ($D_v = 0,096$ м); маса навколишнього середовища (води) — 3 кг.

У робочу ємність V_1 заливається гарячий теплоносій — вода. Об'єм V_2 заповнюється холодним теплоносієм — досліджуваним рідинним середовищем — курячим послідом. Рівні V_1 та V_2 однакові. Приводиться в дію перемішувальний пристрій. Вимірювання температури у робочих об'ємах здійснюється за допомогою вертикально встановлених термопар в п'яти точках. Фіксування температур відбувається кожних 10 секунд. У межах однієї серії вимірювання кількість обертів мішалки не змінюється. Експериментальне дослідження зупиняється з досягненням середнього температурного перепаду між «гарячим» та «холодним» теплоносіями $\Delta t = 3$ °C [1]. Розподіл температур в робочих об'ємах показано на рис. 2.

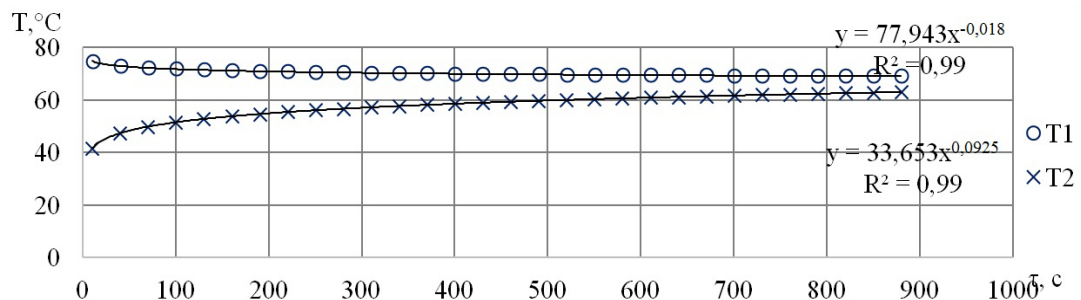
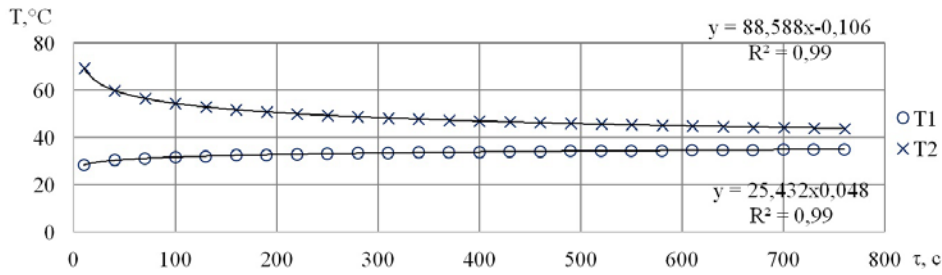


Рис. 2. Розподіл температур T_2 під час нагрівання; від часу τ , с за кількістю обертів мішалки 33 об/хв: T_1 — температура навколишнього середовища (води), °C; T_2 — температура курячого посліду, °C



Продовження рис. 2. Розподіл температур T_2 під час охолодження курячого посліду в залежності від часу τ , с за кількістю обертів мішалки 33 об/хв: T_1 — температура навколишнього середовища (води), °C; T_2 — температура курячого посліду, °C

Усередненні температури визначаються як середньоарифметичні за результатами вимірювання температур термopарами на вертикальних термозондах в певний момент часу [2] (рис. 3).

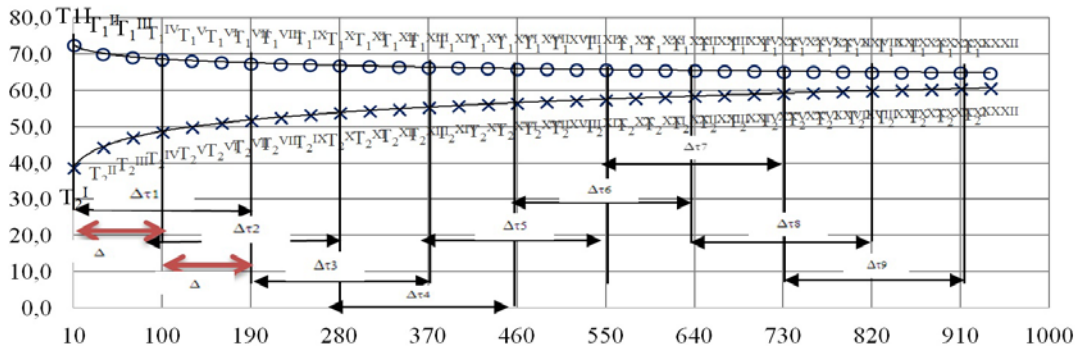


Рис. 3. Усередненні температури досліджуваного середовища під час нагрівання

Обробка здійснюється методом стаціонарного теплообміну, досліджуючи весь проміжок часу, беручи крок $\Delta = 90$ с та інтервал часу $\Delta\tau = \Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = \dots = \Delta\tau_9 = 180$ с [2].

До прикладу, розраховуємо теплообмін на першій ділянці ($T_1^I - T_1^{VII}$; $T_2^I - T_2^{VII}$), визначаємо середні температури навколишнього середовища \bar{T}_1 та досліджуваного середовища \bar{T}_2 .

$$\bar{T}_1 = \frac{\bar{T}_1^I + \bar{T}_1^{II} + \bar{T}_1^{III} + \bar{T}_1^{IV} + \bar{T}_1^V + \bar{T}_1^{VI} + \bar{T}_1^{VII}}{7}; \tag{1}$$

$$\bar{T}_2 = \frac{\bar{T}_2^I + \bar{T}_2^{II} + \bar{T}_2^{III} + \bar{T}_2^{IV} + \bar{T}_2^V + \bar{T}_2^{VI} + \bar{T}_2^{VII}}{7}. \tag{2}$$

Різниця температур

$$\Delta\bar{T}_1 = |\bar{T}_1^{VII} - \bar{T}_1^I|; \tag{3}$$

$$\Delta\bar{T}_2 = |\bar{T}_2^{VII} - \bar{T}_2^I|. \tag{4}$$

Температурний напір

$$\Delta\bar{T}_{зар} = |\bar{T}_1 - \bar{T}_2|. \tag{5}$$

З літературних довідників за середньою температурою \bar{T}_1 визначаємо теплофізичні властивості води — густину ρ_1 , питому теплоємність C_{p1} , коефіцієнт теплопровідності λ_1 , коефіцієнт температурного розширення β_1 , кінетичну в'язкість ν_1 , динамічну в'язкість μ_1 , критерій Прандтля Pr. Задаємо температуру стінки теплообмінної поверхні $\bar{T}_{ст} < 7 \dots 10$ °C за \bar{T}_1 .

Раніше отримано результати зміни логарифму надлишкової температури в часі в умовах нагрівання «модельних рідин» [2], [3]. Встановлено, що на досліджуваному проміжку темп охолодження/нагрівання) сталий $m = const$, що характерно для регулярного теплового режиму в твердому тілі (системі з твердих тіл) [4].

Крива (рис. 4) є апроксимацією дослідних даних надлишкової температури у вигляді функції $Ln\theta = m \cdot \tau + C$, де m — темп охолодження (нагрівання); C — коефіцієнт рівняння; R^2 — коефіцієнт детермінації.

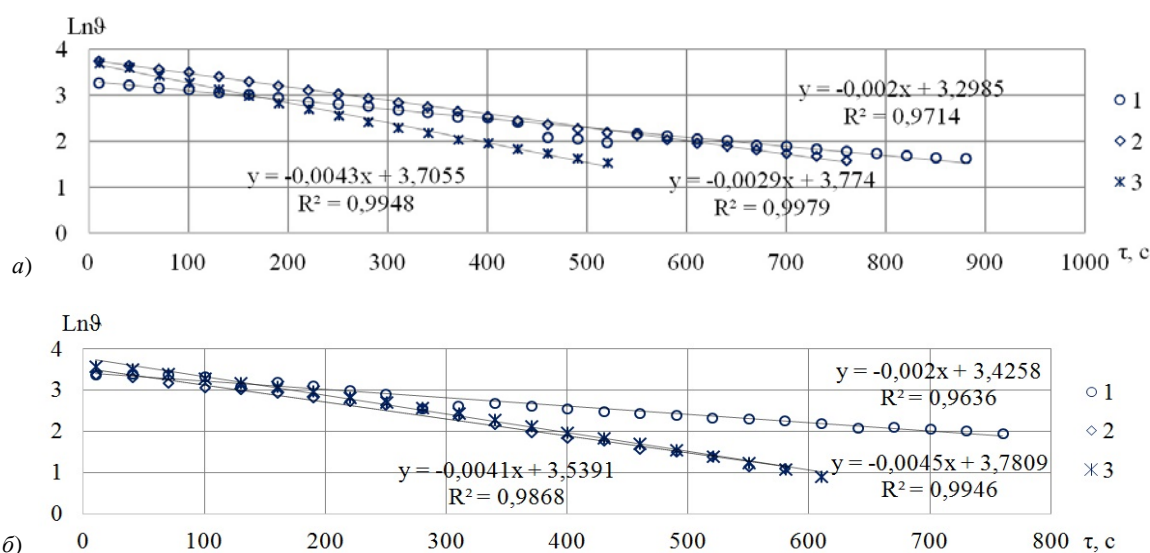


Рис. 4. Темп охолодження (нагрівання) під час: а — нагрівання; б — охолодження курячого посліду за таких обертів мішалки: 1 — 33 об/хв; 2 — 114 об/хв; 3 — 156 об/хв

В табл. 1 подано темп охолодження/нагрівання курячого посліду (вологість 90 %) в залежності від частоти обертів пропелерної мішалки.

Таблиця 1

Темп охолодження/нагрівання курячого посліду

№	Кількість обертів мішалки, об/хв	Процес теплообміну	Функція вигляду $\text{Ln}\theta = m \cdot \tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	33	Нагрівання	$y = -0,002x + 3,2985$	$R^2 = 0,9714$
2	114	Нагрівання	$y = -0,0029x + 3,774$	$R^2 = 0,9979$
3	156	Нагрівання	$y = -0,0043x + 3,7055$	$R^2 = 0,9948$
4	33	Охолодження	$y = -0,002x + 3,4258$	$R^2 = 0,9636$
5	114	Охолодження	$y = -0,0041x + 3,5391$	$R^2 = 0,9868$
6	156	Охолодження	$y = -0,0045x + 3,7809$	$R^2 = 0,9946$

Провівши аналіз розподілу надлишкової температури за часом $\text{Ln}\theta = f(\tau)$ в дослідженні теплообміну курячого посліду в умовах його охолодження і нагрівання (див. рис. 4), визначено лінійний темп охолодження/нагрівання $m = \text{const}$, що характерно для регулярного теплового режиму під час охолодження/нагрівання твердого тіла за підтримки сталості температури навколишнього середовища [4].

Існують декілька основних параметрів, які описують існування регулярного теплового режиму в системі «рідина—тверде тіло» в умовах нестационарних теплових процесів. Одним з них є сталість коефіцієнта тепловіддачі між навколишнім середовищем та металевою стінкою. $\bar{\alpha}_1$

Коефіцієнти тепловіддачі $\bar{\alpha}_1$ визначаються за відомим критеріальним рівнянням стаціонарного режиму для «великого об'єму» [5] $\overline{Nu}_1 = 0,76 \cdot (Gr_1 \cdot Pr_1)_h^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ct}} \right)^{0,25}$ в умовах ламінарного режиму

$10^3 < (Gr \cdot Pr_p) < 10^8$. У критеріальному рівнянні: $Gr_1 = (g \cdot \beta_1 \cdot \Delta t \cdot H^3) / \nu_1^2$ — критерій Грасгофа; g — прискорення вільного падіння, m/s^2 ; β_1 — коефіцієнт температурного розширення води, $^\circ\text{C}^{-1}$; $\Delta t = |\bar{t}_1 - \bar{t}_{ct}|$ — температурний напір; \bar{t}_1 — середньооб'ємна температура води, $^\circ\text{C}$; \bar{t}_{ct} — середня температура стінки, $^\circ\text{C}$; Pr_{p1} — критерій Прандтля для середньооб'ємної температури води; Pr_{ct} — критерій Прандтля для води за температури стінки в процесі ітерацій; ν_1 — кінематична в'язкість води, m^2/s .

Коефіцієнти тепловіддачі $\bar{\alpha}_1$ між водою (навколишнім середовищем) та металевою циліндричною стінкою із застосуванням критеріального рівняння [6] визначаються за формулою

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{Nu_1 \lambda_1}{H}, \quad (6)$$

де Nu_1 — критерій Нуссельта; H — визначальний розмір внутрішньої циліндричної посудини (висота), м; λ_1 — коефіцієнт теплопровідності води, Вт/(м·К).

Відхилення локальних коефіцієнтів тепловіддачі α_1 від середнього коефіцієнта тепловіддачі усього діапазону досліджень в основному знаходиться в межах 25 % (рис. 5).

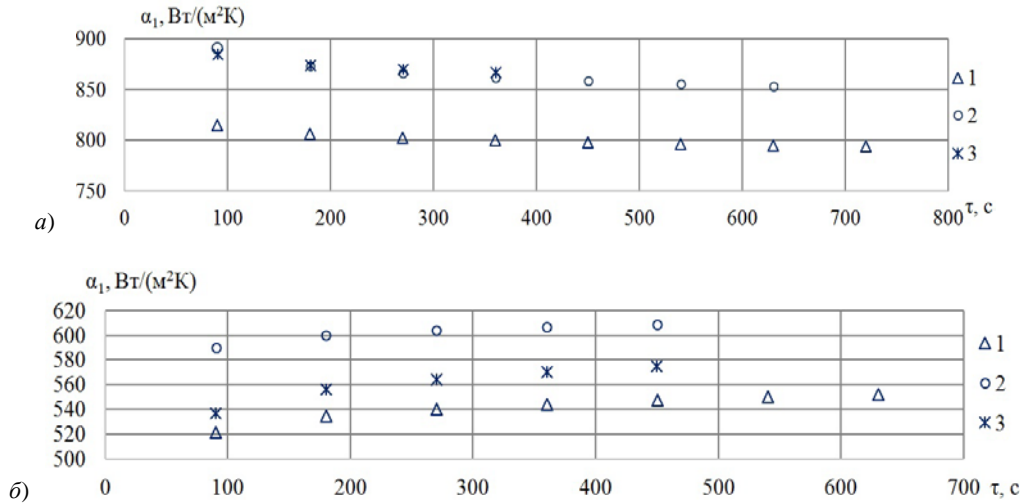


Рис. 5. Коефіцієнт тепловіддачі α_1 під час: а — нагрівання; б — охолодження курячого посліду за таких обертів мішалки: 1 — 33 об/хв; 2 — 114 об/хв; 3 — 156 об/хв

Експериментально встановлено, що в дослідній системі існує регулярний тепловий режим: темп охолодження/нагрівання сталий, $m = \text{const}$; коефіцієнт тепловіддачі в процесі регулярного теплового режиму практично сталий $\bar{\alpha}_1 \approx \text{const}$.

Виявлені ознаки регулярного теплового режиму в дослідній системі дозволяють провести прогнозування інтенсивності теплообміну $\bar{\alpha}_2^{\text{пр}}$ [3] до багатозафазних середовищ з використанням методу регулярного теплового режиму (рис. 6).

$$\bar{\alpha}_2^{\text{пр}} = 1 / \left(\frac{1}{k_{\text{експ}}} - \frac{F \bar{\psi}}{m C_1} \right), \tag{7}$$

де $k_{\text{експ}} = Q / (F \Delta \bar{t})$ — експериментальний коефіцієнт теплопередачі від води до досліджуваного середовища, Вт/(м²·К); Q — тепловий потік, що сприймається досліджуваним рідинним середовищем, Вт; F — площа тонкостінного металевго циліндра, м²; $\bar{\psi}$ — коефіцієнт нерівномірності розподілу температур; C_1 — питома теплоємність навколишнього середовища (води), Дж/(кг·К).

Коефіцієнт тепловіддачі $\bar{\alpha}_2^{\text{рем}}$ від внутрішньої стінки циліндра до досліджуваного середовища визначено розрахунково-експериментальним методом

$$\bar{\alpha}_2^{\text{рем}} = 1 / \left(\frac{1}{k_{\text{експ}}} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \right), \tag{8}$$

де $\delta_{\text{ст}}$ — товщина стінки тонкого металевго циліндра, м; $\lambda_{\text{ст}}$ — теплопровідність стінки тонкого металевго циліндра, Вт/(м·К).

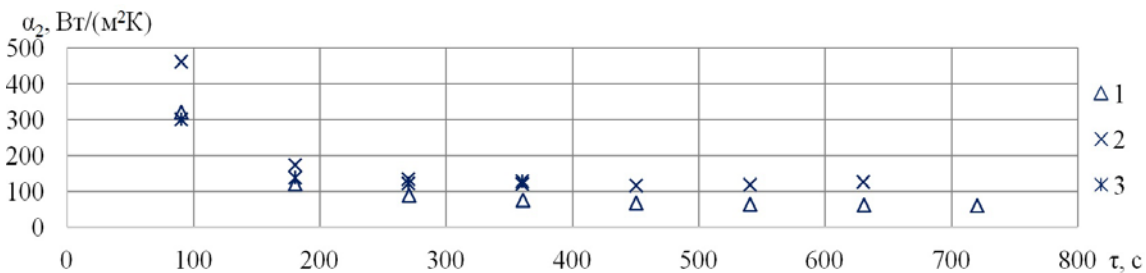
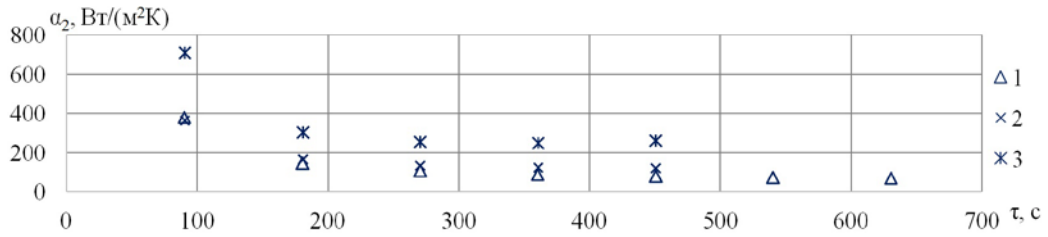


Рис. 6. Коефіцієнт тепловіддачі α_2 під час нагрівання курячого посліду за таких обертів мішалки: 1 — 33 об/хв; 2 — 114 об/хв; 3 — 156 об/хв



Продовження рис. 6. Коефіцієнт тепловіддачі α_2 під час охолодження курячого посліду за таких обертів мішалки: 1 — 33 об/хв; 2 — 114 об/хв; 3 — 156 об/хв

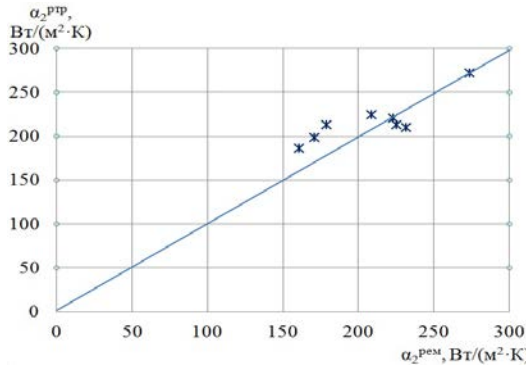


Рис. 7. Зіставлення коефіцієнтів тепловіддачі $\bar{\alpha}_2^{PTR}$ і $\bar{\alpha}_2^{PEM}$ в часі τ

Провівши аналіз і зіставлення коефіцієнтів тепловіддачі, розрахованих із застосуванням розрахунково-експериментального методу $\bar{\alpha}_2^{PEM}$ та знайдених методом регулярного теплового режиму $\bar{\alpha}_2^{PTR}$, встановлена розбіжність в межах 20 % (рис. 7).

Залежність коефіцієнта тепловіддачі α_2 від темпу охолодження (нагрівання) показано на рис. 8.

Отже, метод регулярного теплового режиму можна застосовувати для визначення інтенсивності теплообміну в багатофазних середовищах.

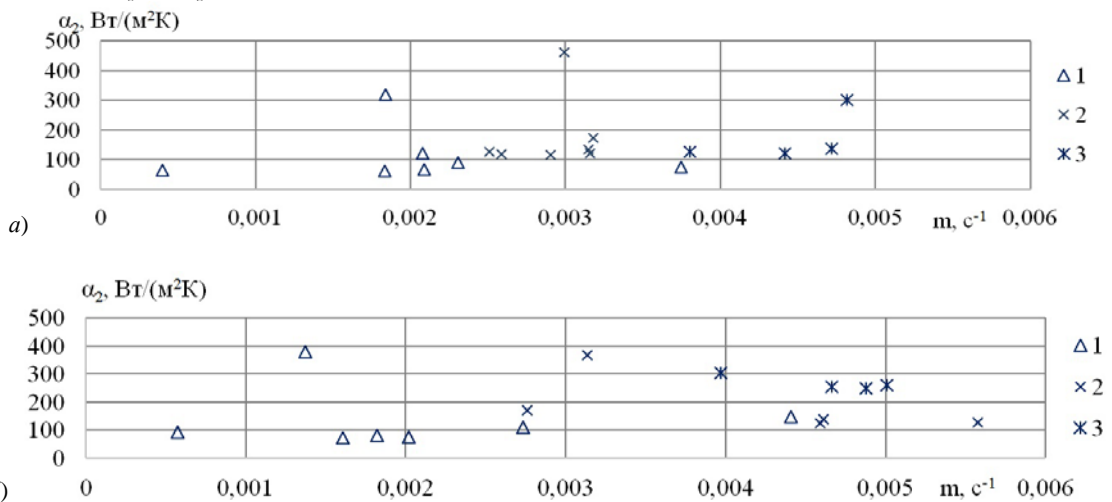


Рис. 8. Залежність коефіцієнта тепловіддачі α_2 від темпу охолодження (нагрівання) під час: а — нагрівання; б — охолодження курячого посліду за таких обертів мішалки: 1 — 33 об/хв; 2 — 114 об/хв; 3 — 156 об/хв

Висновки

1. В досліджуваній системі «вода в кільцевому об'ємі — тонка циліндрична металева стінка — досліджуване рідинне середовище» реалізується регулярний тепловий режим.
2. З використанням методу регулярного теплового режиму визначено інтенсивність теплообміну між циліндричною стінкою та курячим послідом, розбавленим водою.
3. Провівши аналіз і зіставлення коефіцієнтів тепловіддачі, розрахованих із застосуванням розрахунково-експериментального методу $\bar{\alpha}_2^{PEM}$ та знайдених методом регулярного теплового режиму $\bar{\alpha}_2^{PTR}$, встановлена розбіжність в межах 20 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] С. Й. Ткаченко, і Н. В. Пішеніна, *Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів*, моногр. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2017.
 [2] S. Tkachenko, O. Vlasenko, N. Resident, D. Stepanov, and N. Stepanova, "Cooling and of the fluid in the cylindrical volume," *Acta Innovations*, no. 42. pp. 15-26, 2021. <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.42.2>.

[3] С. Ткаченко, О. Власенко, і Н. Резидент, «Теплообмін циліндричного рідинного тіла обмеженої висоти з навколишнім середовищем,» *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, № 2, с. 27-30. 2021. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.05> .

[4] Г. М. Кондратьев, *Регулярный тепловой режим*. Москва, 1954, 408 с.

[5] М. А. Михеев, и И. М. Михеева. *Основы теплопередачи*, изд. 2-е, стереотип. Москва, РФ: Энергия, 1977, 344 с.

[6] В. П. Исаченко, В. А. Осипова, и А. С. Сукомел. *Теплопередача*, учеб. для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп., Москва, РФ, 1975, 488 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 19.09.2022

Ткаченко Станіслав Йосипович — д-р. техн. наук, професор кафедри теплоенергетики, e-mail: stahit6937@gmail.com ;

Власенко Ольга Володимирівна — науковий співробітник кафедри теплоенергетики, e-mail: olgakysak7@gmail.com ;

Ткачук Владислав Сергійович — аспірант кафедри теплоенергетики, e-mail: tmmlbpr@gmail.com

S. Yo. Tkachenko¹
O. V. Vlasenko¹
V. S. Tkachuk¹

Using the Regular Thermal Regime for Predicting the Intensity of Heat Exchange in Poultry Waste

¹Vinnitsia National Technical University

The system "environment (water in an annular volume) — a thin cylindrical metal wall — the investigated liquid medium" is being studied. Heat exchange during heating and cooling of water-diluted chicken litter under conditions of forced convection is studied. Chicken droppings represent a multiphase medium, as it consists of solid particles based on a liquid medium.

The research is carried out on an experimental stand developed at the Department of Thermal Power Engineering of the National Technical University of Ukraine. Experiments are conducted under conditions of forced convection.

Average temperatures are defined as arithmetic averages, based on the results of temperature measurement by thermocouples on vertical thermoprobes at a certain point in time. Processing is carried out by the method of stationary heat exchange, examining the entire period of time.

After conducting an analysis of the distribution of excess temperature over time $\ln \theta = f(T)$ during the study of heat exchange of chicken litter under the conditions of its cooling and heating, a linear rate of cooling/heating $m = \text{const}$ was determined, which is characteristic of a regular thermal regime during cooling/heating of a solid body (system of solid bodies) and maintaining the stability of the ambient temperature.

It was experimentally established that there is a regular thermal regime in the experimental system: the rate of cooling/heating is constant, $m = \text{const}$; the heat transfer coefficient during the regular thermal regime is practically constant.

The coefficient of heat transfer from the inner wall of the cylinder to the studied environment was determined by the method of regular thermal regime and the calculation-experimental method.

After analyzing and comparing the heat transfer coefficients calculated using the calculation-experimental method and found by the method of regular thermal regime, a discrepancy of 20 % was established.

It was established that, the method of a regular thermal regime can be used to determine the intensity of heat exchange in multiphase media.

Keywords: regular thermal regime, substrate, biogas plant, heat exchange equipment, thermal stabilization, thermophysical properties, experimental and calculation method, mathematical model.

Tkachenko Stanislav Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Heat Power Engineering, e-mail: stahit6937@gmail.com ;

Vlasenko Olha V. — Researcher of the Chair of Heat Power Engineering, e-mail: olgakysak7@gmail.com ;

Tkachuk Vladyslav S. — Post-Graduate Student of the Chair of Heat Power Engineering, e-mail: tmmlbpr@gmail.com