

## **НЕСТАЦІОНАРНИЙ ТЕПЛООБМІН — ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ СТАЦІОНАРНИМ МЕТОДОМ ТА МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ**

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет;

<sup>2</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Проведено дослідження на експериментальному стенді, який складається із зовнішньої металевої посудини, що має циліндричну форму, внутрішньої металевої циліндричної посудини, ізольованої ззовні металевої кришки, термопар, пристрою збирання інформації з термопар та її передавання на ЕОМ.*

*У робочих об'ємах зовнішньої та внутрішньої посудин відхилення значень температури від середньооб'ємної за висотою температури в момент часу знаходиться в межах 10...38 % для тарувальних рідин. Нерівномірність розподілу температур показує, що умови теплообміну нестационарні, питомий тепловий потік змінний та температура стінки змінна.*

*На основі експериментальних даних з рідинами за математичною моделлю визначено коефіцієнт тепловіддачі між навколишнім середовищем (водою) та циліндричною стінкою стаціонарним методом (розрахунковим) і методом регулярного теплового режиму. Запропонована напівемпірична залежність, яка ґрунтується на теорії регулярного теплового режиму, лежить в основі оціночного методу експериментальних даних дослідних рідинних середовищ у разі їхнього нагрівання і охолодження в межах похибки  $\pm 30\%$ .*

*Отримані експериментальні дані підтверджують можливість використання методу регулярного теплового режиму та стаціонарного методу, розробленого для обчислення у «великому об'ємі», для дослідження інтенсивності тепловіддачі середовищ з відомою інформацією про теплофізичні властивості за нестационарного теплообміну в «обмеженому об'ємі».*

*В умовах зростання температури досліджуваного рідинного середовища коефіцієнт тепловіддачі, знайдений розрахунковим методом, відрізняється від коефіцієнта тепловіддачі, знайденого методом регулярного теплового режиму, більше ніж на 30 %. Це пояснюється тим, що тепловіддача залежить від зміни температури поверхні по її довжині. В результаті зміни температури стінки  $T_{cm}$  змінюється розподіл температури в тепловому приграничному шарі, змінюється його товщина і значення градієнта температури в рідині біля поверхні тіла.*

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

### **Вступ**

Раніше розроблено декілька швидкісних методів визначення теплових властивостей різних матеріалів, теорію застосовували для рішення питань термометрії, анемометрії і гідрометрії, для теплових розрахунків з визначення коефіцієнтів тепловіддачі та ін. Теорію регулярного режиму багатоконпонентних, особливо двоконпонентних, тіл використано до побудови нових приладів: бікалориметрів для вимірювання теплозахисних властивостей тканин і одягу, приладів для визначення теплопровідності рідин та інших нових приладів.

Таким чином, на сьогодні теорія регулярного режиму стала корисна для розв'язання різних практичних задач, частково вона стала основою техніки теплових вимірювань. З іншої сторони, основні

положення теорії регулярного режиму не є результатом одних лише аналітичних операцій.

*Метою статті є перевірка застосування методу стаціонарної теплопровідності для визначення інтенсивності теплообміну між навколишнім середовищем (водою) та циліндричною стінкою в системі «вода в коаксіальному об'ємі — циліндричний об'єм рідини (розчина)».*

### Основні результати

Для всіх твердих тіл, у яких відсутня пориста структура, перенос теплоти відбувається лише шляхом теплопровідності. Але для розв'язання задач теплопровідності необхідно для початку встановити процес переносу теплоти: стаціонарна чи нестаціонарна теплопровідність [1]—[3].

Процеси стаціонарної теплопровідності виникають під час переносу теплоти всередині твердого тіла за рахунок сталих у часі температур, а також сталих теплових потоків в кожній точці тіла ( $dt/d\tau = 0$ ). Температура і теплопровідність циліндричної стінки з часом залишаються незмінними. Методи стаціонарної теплопровідності створені за властивостями стаціонарного температурного поля, які описуються законом Фур'є. Стаціонарна теплопровідність спостерігається і в тому випадку, коли кількість тепла, що входить і виходить з тіла на одиницю часу, однакова [2], [3].

Нестаціонарними тепловими процесами називають процеси теплообміну, які відбуваються зі змінною температурного поля в часі. Нестаціонарні процеси теплопровідності виникають, коли нагрівання або охолодження твердих тіл відбуваються у разі їхнього безпосереднього зіткнення з гарячими або холодними потоками рідин або газів. У розрахунках нестаціонарних процесів теплообміну визначають або час, необхідний для нагрівання чи охолодження до заданої температури, або кінцеву температуру, яка досягається за той самий час, а також кількість тепла, передану тілу чи забране від нього [2], [3].

До нестаціонарних процесів належать охолодження та нагрівання тіл, які поширені в природі і техніці та вивчаються теорією теплопровідності (регулярний тепловий режим) і теплопередачі.

Під час розв'язання задач стаціонарної і нестаціонарної теплопровідності, досить важливим є встановлення де відбувається теплообмін в «обмеженому об'ємі» чи у «необмеженому об'ємі».

В «обмеженому об'ємі» процеси нагрівання та охолодження рідини відбуваються поблизу один від одного і розділити їх неможливо; в цьому випадку тепловіддачу треба розглядати в цілому. Внаслідок обмеженості простору і наявності висхідних і низхідних потоків ускладнюються умови руху. Вони залежать від форми і геометричних розмірів, від роду рідини і температурного напору. В «обмеженому об'ємі» за вільної конвекції товщина приграничного шару біля обмежувальних поверхонь стає однаковою з геометричними розмірами самого об'єму [3].

Під «великим об'ємом» вважається об'єм рідини, в якому вільний рух, що виник біля інших тіл в цьому об'ємі, не впливає на течію біля теплообмінної поверхні. Прийнято, що швидкість руху рідини на відстані від теплообмінної поверхні дорівнює нулю [3].

У «великому об'ємі» середня тепловіддача вертикальної пластини визначається за такими залежностями [1]:

$$\text{– ламінарна течія} \quad \overline{Nu} = 0,76(Gr \cdot Pr_p)^{0,25} (Pr_p / Pr_{ст})^{0,25};$$

$$\text{– турбулентний рух} \quad \overline{Nu} = 0,15(Gr \cdot Pr_p)^{0,33} (Pr_p / Pr_{ст})^{0,25}.$$

Огляд та вивчення інформації стаціонарного та нестаціонарного теплообміну в «обмеженому об'ємі» і у «великому об'ємі» показав необхідність проведення досліджень умов теплообміну в елементах базового експериментального стенда ЕРМ. Коефіцієнти тепловіддачі, отримані розрахунками, порівнювалися з розрахунково-експериментальними значеннями і з коефіцієнтами тепловіддачі, отриманими методами регулярного теплового режиму. Варіанти розрахунку теплообміну в елементах експериментального стенду описані в роботі [3].

На сьогодні не відомі такі установки і експерименти, на яких би досліджувався нестаціонарний теплообмін в «обмеженому об'ємі», тому важливо перевірити використання стаціонарних методів розрахунку до нестаціонарної теплопровідності [3].

Досліджено теплообмін в системі «вода в коаксіальному об'ємі — циліндричний об'єм рідини (розчину)». Проаналізована зміна теплофізичних властивостей таких середовищ: рафінованої соняшникової олії марки П ДСТУ 4492, дистильованого гліцерину, цукрового розчину концентрації  $c = 50\%$ ,  $60\%$  та  $70\%$ , субстрату з діючої біогазової установки, курячого посліду вологістю  $W = 88\%$  і  $90\%$  під час їхнього нагрівання і охолодження в результаті вільної конвекції.

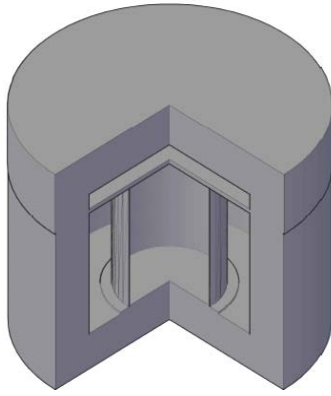


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Експериментальний стенд (рис. 1) складається із зовнішньої металевої посудини, яка має циліндричну форму і утворює з внутрішньою емністю кільцевий об'єм; внутрішньої металевої циліндричної посудини висотою  $h_m = 115$  мм, діаметром  $d_m = 100$  мм і товщиною стінки  $\delta_{ст} = 0,35$  мм та ізолюваної ззовні металевої кришки. У внутрішню посудину, поміщається досліджуване середовище, з температурою  $t_2$ ; в експериментальну установку — гаряча вода з температурою  $t_1$ . Внутрішня посудина поміщається в експериментальну установку, накривається ізолюваною кришкою і знаходиться там до вирівнювання температур  $\pm 3 \dots 5$  °С в обох рідинах. Відповідно, в гарячу та холодну рідини поміщаються зонди з п'яти термопар для фіксування температур, які підключенні до комп'ютера та значення яких записуються одразу в програму Excel [4], [5].

На рис. 2 спостерігається відхилення значень температур від середньооб'ємної на різній висоті зонда термопар та у різний момент часу, на початку, всередині та наприкінці досліду за умов вільної конвекції у внутрішній циліндричній металевій посудині. Таке відхилення значень температури від середньооб'ємної виникає через термічну інерцію. Відставання у фіксуванні температур термопар виникає через те, що вона переходить від свого теперішнього теплового стану у новий, відповідний температурі певного моменту часу, із запізненням.

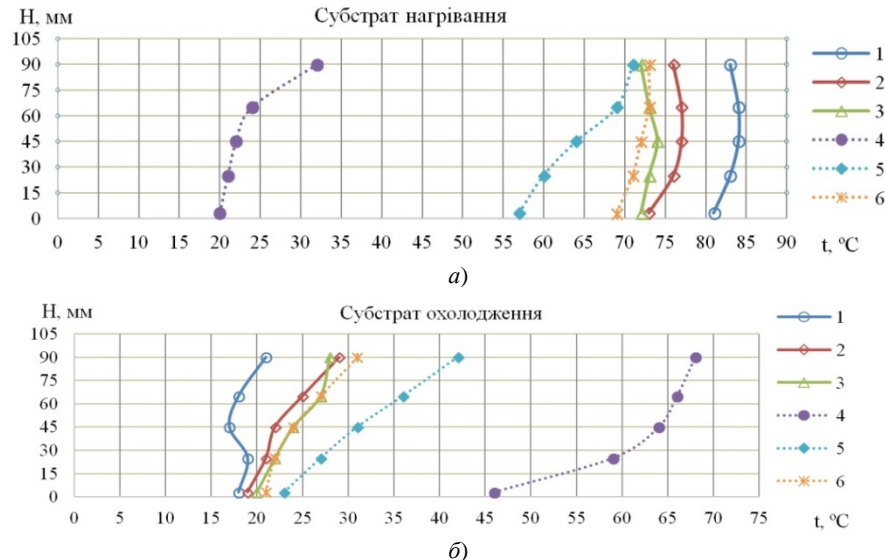


Рис. 2. Розподіл температур вздовж теплообмінної поверхні, вільна конвекція, напрям теплообміну: а — нагрівання; б — охолодження. Передача теплоти вода—субстрат: 1, 2, 3 — розподіл температур у зовнішній порожнині; 4, 5, 6 — розподіл температур у внутрішній порожнині

У робочих об'ємах зовнішньої та внутрішньої посудин відхилення значень температури від середньооб'ємної по висоті температури в момент часу знаходиться в межах  $10 \dots 38$  % для тарувальних рідин. Нерівномірність розподілу температур показує, що умови теплообміну нестационарні, питомий тепловий потік змінний  $\overline{q_{ст}} \neq \text{const}$  та температура стінки змінна  $\overline{t_{ст}} \neq \text{const}$ .

Біля поверхні циліндричної металевої стінки в процесі теплообміну утворюється тепловий приграничний шар, в межах якого змінюється температура теплоносія. Характер розподілу температури залежить від режиму течії рідини, а характер формування теплового шару є схожим з характером розвитку динамічного шару. Товщина ламінарного приграничного шару залежить від теплофізичних властивостей рідини (розчина). Перенос теплоти за ламінарної течії відбувається за рахунок теплопровідності.

Зміна товщини приграничного в залежності від діапазону зміни температури зовнішнього і внутрішнього теплоносія і напрямку теплообміну ламінарного шару подана у табл. 1. Залежність (1) взята для тепловіддачі за вільного ламінарного руху вздовж вертикальної пластини у «великому об'ємі» [6]

$$\delta = 4,234 \sqrt{\frac{\mu \lambda x}{c_p \beta \rho_0^2 g \vartheta_c}}, \quad (1)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  $x$  — визначальний розмір (висота внутрішньої посудини), м;  $c_p$  — питома теплоємність, Дж/(кг·К);  $\beta$  — коефіцієнт температурного розширення,  $K^{-1}$ ;  $\rho_0$  — густина дослідного рідинного середовища,  $kg/m^3$ ;  $g$  — прискорення вільного падіння,  $m/c^2$ ;  $\vartheta_c$  — різниця температури стінки і дослідної рідини,  $\vartheta_c = |t_c - t_2|$ ,  $^{\circ}C$ .

Таблиця 1

Товщина приграничного ламінарного шару

Досліджуване рідинне середовище	Напрямок теплообміну	Діапазон зміни температури зовнішнього теплоносія $T_1$ , $^{\circ}C$	Діапазон зміни температури внутрішнього теплоносія $T$ , $^{\circ}C$	Товщина приграничного ламінарного шару, м
Цукровий розчин $c = 50\%$	нагрівання	77,2...74,1	48...64,9	0,0046...0,0053
	охолодження	20,2...23,3	38,2...28,3	0,0048...0,0082
Цукровий розчин $c = 60\%$	нагрівання	78,1...73,8	53,2...67,9	0,0056...0,0072
	охолодження	20,4...22,1	42,6...33,8	0,0063...0,0078
Цукровий розчин $c = 70\%$	нагрівання	74,3...68,7	44,1...62	0,0094...0,0113
	охолодження	19,8...22	39,5...30,1	0,0053...0,015
Соняшникова олія	нагрівання	78,5...73,2	45,9...70,1	0,0051...0,0062
	охолодження	21,4...23,2	40,9...30,3	0,0059...0,009
Дистильований гліцерин	нагрівання	78,5...73,8	31,8...55,3	0,0107...0,0120
	охолодження	18,5...21,14	44,4...31,8	0,0114...0,0155

Необхідно зазначити, що дослідження проводилося в «обмеженому об'ємі» дослідної системи, для якої задано такі умови: коефіцієнт нерівномірного розподілу температур між гарячою водою і рідиною в циліндричній посудині практично сталий  $\Psi \approx \text{const}$ ; коефіцієнт тепловіддачі від гарячої води в кільцевому об'ємі до металевої стінки  $\alpha_1 \approx \text{const}$ ; темп нагріву дослідної рідини в циліндричній посудині  $m = \text{const}$  [7].

Аналізуючи дані, подані в табл. 1, залежно від напрямку теплообміну товщина приграничного ламінарного шару змінюється по різному. При нагріванні товщина шару може змінюватися до 5 %, а при охолодженні — до 38 %.

Під час проведення досліджень необхідно звернути увагу на умови перебігу процесу, що відрізняються від умов у роботах, адже досліджено не лише процес теплообміну під час нагрівання, а й під час охолодження [4]. На основі експериментальних даних з рідинами за математичною моделлю визначено коефіцієнт тепловіддачі між навколишнім середовищем (водою) та циліндричною стінкою  $\alpha_1$  стаціонарним методом (розрахунковим) та методом регулярного теплового режиму.

Коефіцієнт тепловіддачі від води до циліндричної стінки визначається за відомим критеріальним рівнянням (розрахунковий метод) для великого об'єму у стаціонарному режимі [8] при ламінарному режимі, за умови  $10^3 < (Gr \cdot Pr_p) < 10^8 \cdot \overline{Nu} = 0,76 (Gr \cdot Pr_p)_h^{0,25} \left( \frac{Pr_p}{Pr_{ct}} \right)^{0,25}$ . У критеріально-

му рівнянні  $Pr_p$  — критерій Прандтля для води;  $Gr_h = (g\beta\overline{\Delta t}H^3)/v^2$  — критерій Грасгофа;  $Pr_{ct}$  — критерій Прандтля для води, визначений за температурою стінки;  $g$  — прискорення вільного падіння,  $m/c^2$ ;  $H$  — визначальний лінійний розмір в умовах вимушеної конвекції [4], [5], м;  $\overline{\Delta t} = (\overline{t}_{ct} - \overline{t}_p)$  — температурний напір,  $^{\circ}C$ ;  $\beta$  — коефіцієнт температурного розширення води,  $^{\circ}C^{-1}$ ;  $v$  — кінематична в'язкість води,  $m^2/c$ .

Визначення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_1$  розрахунковим методом, Вт/( $m^2 \cdot K$ ) [8]

$$\alpha_1^{\text{розн}} = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{H}, \quad (2)$$

де  $Nu_1$  — критерій Нуссельта;  $H$  — визначальний розмір внутрішньої посудини (висота), м;  $\lambda_1$  — коефіцієнт теплопровідності навколишнього середовища (води), Вт/(м·К).

Потрібно зазначити, що розрахунок критерія Нуссельта подано [8] для таких умов: вимушена конвекція; тепловіддача для вертикальної поверхні (труба, пластина); стаціонарний режим, в якому температура зовнішнього середовища не змінюється з часом; тепловіддача в «великому об'ємі»; за визначальну температуру взято температуру навколишнього середовища; за лінійний розмір взято висоту вертикальної поверхні. В цій роботі критерій Нуссельта застосовуємо для своїх умов: вимушена конвекція, тепловіддача у вертикальному циліндричному об'ємі, нестационарний режим, в

якому температура зовнішнього середовища змінюється з часом, тепловіддача в «обмеженому об'ємі».

За умови  $F = \text{const}^*$ ;  $\alpha_1 \approx \text{const}^*$ ;  $Cp(t) \approx \text{const}^*$ ;  $m = \text{const}$  для рідини;  $K = \text{var}$  методом регулярного теплового режиму отримано залежність для визначення коефіцієнта тепловіддачі [9]

$$\alpha_1^{\text{пр}} = \frac{m \cdot C_p}{F \cdot \bar{\psi}} \quad (3)$$

де  $m$  — темп охолодження (нагрівання)  $m$  дослідного рідинного середовища визначається з рівняння,  $\text{с}^{-1}$  [7];  $m = (\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2) / (\tau_1 - \tau_2) = \text{const}$ , 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  $\tau_2$ ,  $\vartheta = |\bar{T}_1 - \bar{T}_2|, ^\circ\text{C}$ ;  $C_p$  — питома теплоємність навколишнього середовища (води), Дж/(кг·К);  $F$  — площа тонкостінного металевого циліндра,  $\text{м}^2$ ;  $\bar{\psi}$  — коефіцієнт нерівномірності розподілу температур.

За наведеними методиками здійснено дослідження інтенсивності тепловіддачі за умов вимушеної конвекції біля вертикальної циліндричної стінки. За результатами розрахунків (рис. 2) побудовані залежності — відношення  $\alpha_1^{\text{пр}}$  до  $\alpha_1^{\text{розр}}$  в залежності від зміни температури дослідного рідинного середовища  $T_2$ .

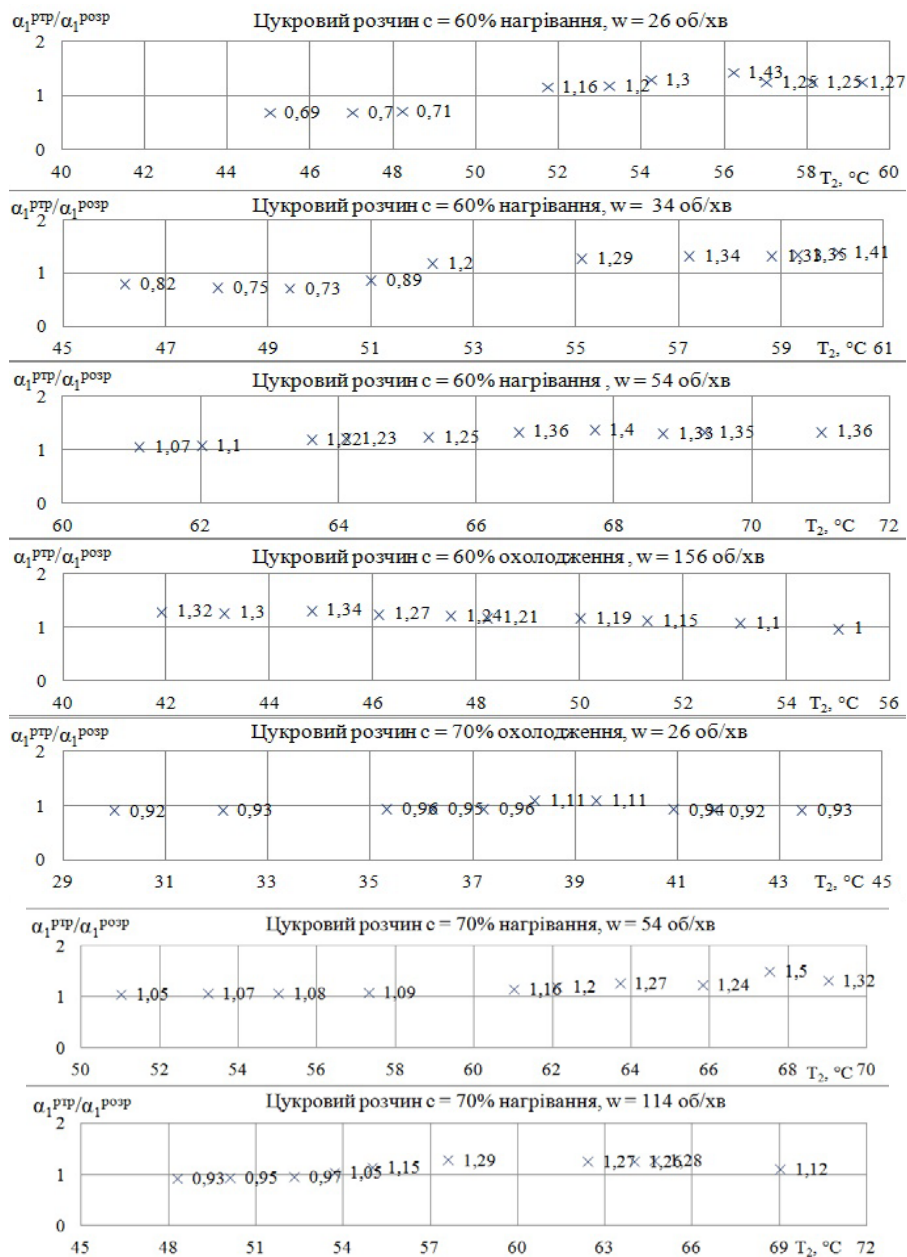
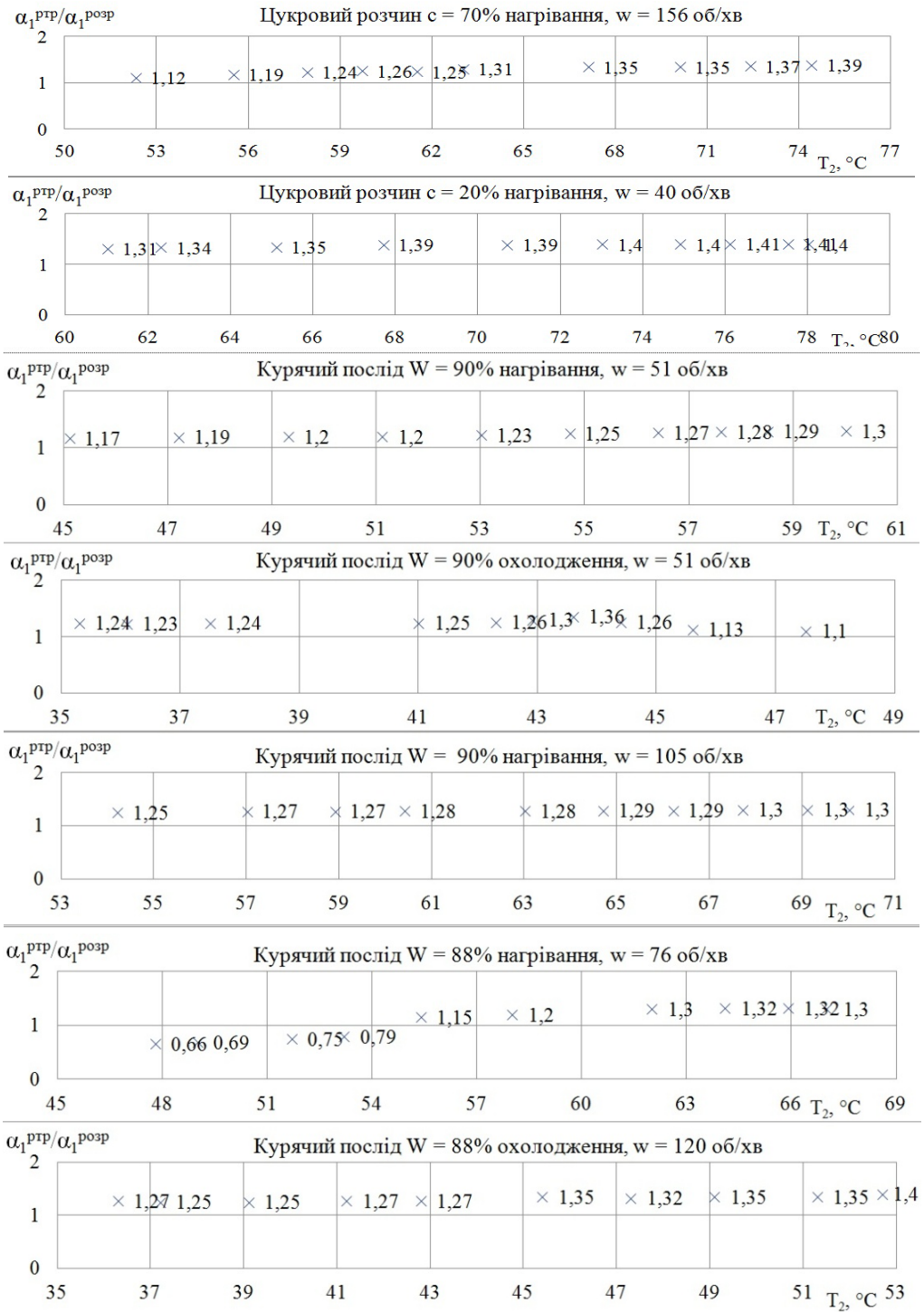


Рис. 3. Зіставлення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_1^{\text{пр}}$  з  $\alpha_1^{\text{розр}}$



Продовження рис. 3. Зіставлення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_1^{ртр}$  з  $\alpha_1^{розр}$

Аналіз рис. 3 свідчить, що на запропонованій напівемпіричній залежності (3), яка ґрунтується на теорії регулярного теплового режиму, оснований оціночний метод експериментальних даних дослідних рідинних середовищ за їхнього нагрівання і охолодження в межах похибки  $\pm 30\%$ .

З рис. 3 очевидно, що в результаті зростання температури досліджуваного рідинного середовища, коефіцієнт тепловіддачі, знайдений розрахунковим методом [8] відрізняється від коефіцієнта тепловіддачі, знайденого методом регулярного теплового режиму більше ніж на 30%. Це пояснюється тим, що тепловіддача залежить від зміни температури поверхні по її довжині [6]. В результаті зміни температури стінки  $T_{ст}$  змінюється розподіл температури в тепловому приграничному шарі, змінюється його товщина і значення градієнта температури в рідині біля поверхні тіла.

Зміну температури поверхні або температурного напору можна описати степеневим законом

$$\vartheta_f(x) = A \cdot x^m, \quad (4)$$

де  $\vartheta_f(x) = T_{\text{ст}}(x) - T_1$ ;  $T_{\text{ст}}(x)$  — місцеве значення температури поверхні;  $T_1$  — температура навколишнього середовища (води).

Вплив поздовжнього градієнта температури поверхні можна врахувати відношенням тепловіддачі зі змінною і постійною температурою поверхні, таке відношення позначено через  $\varepsilon$ . Значення  $\varepsilon$  визначається аналітично [6].

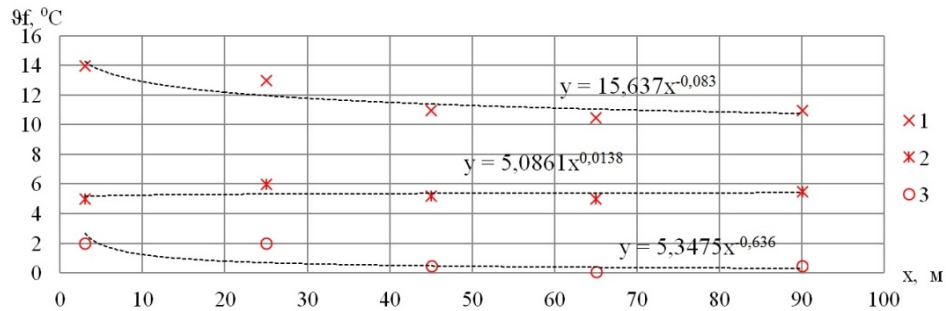


Рис. 4. Цукровий розчин 50 % під час нагрівання в моменти часу: початковий, середній, кінцевий

На рис. 4 показано функцію виду  $\vartheta_f(x) = f(x)$ . Крива є апроксимацією дослідних даних градієнта температури у вигляді функції  $\vartheta_f(x) = A \cdot x^m$ , де  $A$  і  $m$  — постійні, які не залежать від координати  $x$ . Отримані залежності пояснюють вплив розподілу температури в тепловому приграничному шарі на тепловіддачу.

У [6] розглянуто великий об'єм, коли вертикальна пластина з температурою  $T_{\text{ст}}$  занурена в рідину або газ. Рідина вдалині від пластини нерухлива (відсутній вимушений рух), температура рідини  $T_2$ . Вважається, що  $T_{\text{ст}} > T_2$ . При цьому в пластині виникає підймальний рух нагрітого шару рідини. Вдалині від пластини швидкість рідини дорівнює нулю. Товщина рухливого шару рідини змінна по висоті і пов'язана зі швидкістю руху в цьому шарі. Оскільки рух відбувається в сторону  $Ox$ , то використовується рівняння руху тільки в проекції  $Ox$ . Вільний рух в рідині виникає через нерівномірний розподіл масових (об'ємних) сил. Такими силами є сили тяжіння і відцентрова сила.

## Висновки

1. На основі експериментальних даних рідин за математичною моделлю визначено коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_1$  між навколишнім середовищем (водою) та циліндричною стінкою стаціонарним методом (розрахунковим) і методом регулярного теплового режиму.
2. Запропонована напівемпірична залежність ґрунтується на теорії регулярного теплового режиму і є основою оцінювального методу експериментальних даних дослідних рідин (розчинів) під час їхнього нагрівання і охолодження в межах похибки  $\pm 30\%$ .
3. Отримані експериментальні дані підтверджують можливість використання методу регулярного теплового режиму та стаціонарного методу, розробленого для обчислень у «великому об'ємі», для дослідження інтенсивності тепловіддачі середовищ з відомою інформацією про теплофізичні властивості за нестационарного теплообміну в «обмеженому об'ємі».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. І. Погорелов *Тепломасообмін (основи теорії і розрахунку)*, навч. посіб. для вузів, 2-ге видання. Львів, Україна: Новий Світ-2000, 2004, 144 с.
- [2] С. В. Юшко, О. Є. Борщ, і Г. І. Токар, *Нестационарна теплопровідність*, навч. посіб. Харків, Україна: НТУ «ХПІ», 2012, 112 с.
- [3] С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко, Н. Д. Степанова, і С. О. Павлович, «Нестационарний теплообмін у вертикальному циліндричному об'ємі, заповненому рідиною», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 16-20, 2022. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-16-20>.
- [4] С. Й. Ткаченко, і Н. В. Пішеніна, *Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів*, моногр. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2017.
- [5] 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>.
- [6] В. П. Исаченко, В. А. Осипова, и А. С. Сукомел, *Теплопередача*, учеб. для вузов, изд. 3-е, перер. и доп. М.: Энергия, 1975, 488 с.

- [7] Г. М. Кондратьев, *Регулярный тепловой режим*. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1954, 408 с.
- [8] М. А. Михеев, и И. М. Михеева. *Основы теплопередачи*, изд. 2-е, стереотип. Москва, РФ: Энергия, 1977, 344 с.
- [9] С. Ткаченко, О. Власенко, і Н. Резидент, «Теплообмін циліндричного рідинного тіла обмеженої висоти з навколишнім середовищем,» *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, № 2, с. 27-30, 2021. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.05> .

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 06.02.2023

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

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Власенко Ольга Володимирівна** — д-р філософії, науковий співробітник кафедри теплової та альтернативної енергетики, e-mail: olgakysak7@gmail.com .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**S. Yo. Tkachenko<sup>1</sup>**  
**O. V. Vlasenko<sup>2</sup>**

## Non-Stationary Heat Exchange — Determination of the Heat Transfer Coefficient Using Stationary Methods and Regular Thermal Mode Methods

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University;

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

*The research was conducted on an experimental stand, which consists of an outer metal vessel of a cylindrical shape, an inner metal cylindrical vessel, metal cover with an external insulation, thermocouples, a device for collecting information from thermocouples and its transfer to the computer.*

*In the working volumes of the outer and inner vessels, the deviation of the temperature values from the average volume by the high temperature at the moment of time is within 10...38% for tare liquids. The non-uniformity of the temperature distribution shows that the heat exchange conditions are non-stationary, the specific heat flux is variable and the wall temperature is variable.*

*On the basis of the experimental data with liquids, the coefficient of heat transfer between the environment (water) and the cylindrical wall was determined using the stationary method (calculation) and the method of the regular thermal mode. The proposed semi-empirical dependence, which is based on the theory of the regular thermal mode, provides the basis of the estimating method of the experimental data of the studied liquid media in case of their their heating and cooling within ±30% of error.*

*The obtained experimental data confirm the possibility of using the regular thermal mode method and the steady-state method developed for the calculation of a "large volume" to study the heat transfer intensity of the media with the known information on thermophysical properties during non-stationary heat exchange in a "limited volume".*

*Under the conditions of growing temperature of the investigated liquid medium, the heat transfer coefficient determined by the calculation method differs from the heat transfer coefficient determined by the regular thermal mode method by more than 30%. This is explained by the fact that heat transfer depends on the change of the surface temperature along its length. As a result of the temperature change of the  $T_{st}$  wall, the temperature distribution in the thermal boundary layer changes, its thickness and the value of the temperature gradient in the liquid near the surface of the body changes.*

**Keywords:** regular thermal regime, unsteady heat exchange, cooling rate, heat transfer coefficient.

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

**Vlasenko Olha V.** — Phd, Researcher of the Chair of Thermal and Alternative Energy, e-mail: olgakysak7@gmail.com