

С. Й. Ткаченко

Д. І. Денесяк

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ В ОБМЕЖЕНОМУ ОБ'ЄМІ

Вінницький національний технічний університет

*Обґрунтована можливість застосування методів регулярного теплового режиму для аналізу експериментальних даних, отриманих у обмеженому об'ємі у вигляді циліндричної ємності, заповненої в'язкою рідиною. Встановлено переваги застосування, такі як зменшення кількості вимірювань та визначення області даних обробка яких дасть більш достовірний результат ніж квазістаціонарні методи. Представлені результати розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та теплопередачі нестационарними методами та представлено результати співставлення цих даних з експериментальними.*

**Ключові слова:** регулярний режим, нестационарний теплообмін, коефіцієнт тепловіддачі, коефіцієнт теплопередачі, дослідження теплообміну.

### Вступ

Охолодження та нагрівання тіл широко розповсюдженні у природі та у техніці процеси. Дані процеси досить розрізняються за взаємним впливом температурних полів одне на одне, агрегатним станом тіл та іншими фізичними та геометричними характеристиками [1, 2]. Проведення експериментальних досліджень для визначення теплофізичних параметрів виконують різними методами, які базуються на стаціонарних або нестационарних процесах.

Добре зарекомендував себе для дослідження теплофізичних характеристик твердих тіл нестационарний метод регулярного теплового режиму (РТР) [1-4]. Для дослідження теплових параметрів твердого тіла методом нестационарного теплового режиму використовуються рішення диференціального рівняння Фур'є [3-5]. Зазвичай дані рішення використовуються для тіл простої геометричної форми та для визначених граничних умов.

Згідно теорії регулярного теплового режиму [1-4] процес охолодження (нагрівання) тіла можна розділити в часі на дві стадії: стадію неупорядкованого (ірегулярного) процесу і стадію регулярного режиму. Перша з них характеризується сильним впливом на температурне поле тіла його початкового теплового стану. З плином часу вплив початкових особливостей температурного поля на його подальшу зміну згладжується, процес зі стадії неупорядкованою переходить в стадію упорядковану – "регулярну".

В залежності від заданих граничних умов розрізняють такі види регулярних режимів – РТР першого, другого та третього роду, які детально описані та проаналізовані у [1, 3]. А. В. Ликов вводить загальний признак регуляризації кінетики нагрівання тіл, справедливий для всіх 3-х видів регулярних режимів [2]

$$m = -\frac{d\bar{t}}{(t_p - \bar{t})d\tau} = \text{const}, \quad (1)$$

де  $t_p$  – поточна температура навколишнього середовища (рідини);  $\bar{t}$  – середня по об'єму температура тіла  $\tau$  – час. З цієї точки зору немає необхідності для розгляду окремо регулярних режимів першого, другого та третього роду і дозволяє зосередитись на дослідженні необхідних параметрів.

Методи регулярного режиму в класичній формі розробляли та застосовували для системи «рідина-тверде тіло». Відомими у доступній літературі [1-5 та ін.] прикладами застосування методик регулярного режиму є визначення: коефіцієнтів теплопровідності плоских тіл; коефіцієнтів тепловіддачі; коефіцієнтів теплопровідності металів; коефіцієнтів тепло- та теплопровідності ґрунтів, теплової ізоляції і т. ін. Також методи регулярного режиму використовувались для дослідження теплопровідності газів та рідин під високим тиском.

В загальному нестационарні регулярні методи дозволяють обмежитись вимірюванням температур в 2-х чи декількох точках. Вони дають більш широкі можливості по вибору джерела тепла, є більш швидкоплинними і як наслідок – мають зменшені вимоги для теплового захисту дослідного зразка від теплообміну з навколишнім середовищем [2-3].

Нами встановлено, що аналіз експериментальних даних нестационарних процесів методами квазістационарних дає розкид точок до 40...45% у визначенні коефіцієнта тепловіддачі до дослідного середовища. На нашу думку, можна досягти більшого узгодження експериментальних результатів та розрахунків, використавши методику обробки даних для нестационарних процесів, таку як регулярний тепловий режим. Використання РТР для дослідження коефіцієнтів тепловіддачі проведемо у розрізі експериментально-розрахункового методу дослідження інтенсивності теплообміну (ЕРМ), який розроблений на кафедрі теплоенергетики ВНТУ [6-7]. Планується подальше вдосконалення ЕРМ на основі результатів експериментальних даних представлених у даній статті.

Метою роботи є оцінка можливості застосування методу регулярного теплового режиму для вирішення нестационарної задачі теплообміну в обмеженому об'ємі заповненого в'язкою рідиною.

### Основна частина

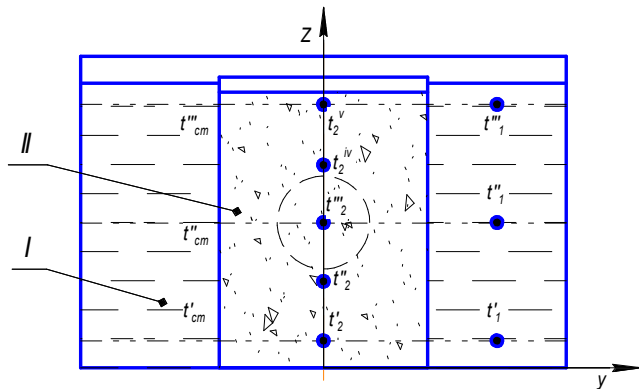


Рисунок 1 – Принципова схема вимірювань температур  $t_1$  і

Згідно накопиченого експериментального досвіду, нами пропонується застосувати метод регулярного теплового режиму для системи «вода-тонка металева стінка-в'язка рідина». Рідину розміщено у металевій циліндричній тонкостінній оболонці, з невеликим термічним опором, менше  $1,1 \cdot 10^{-4}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )/Вт. Шуканою величиною є коефіцієнт тепловіддачі від води до стінки  $\alpha_1$  та від стінки до в'язкої рідини  $\alpha_2$ .

На рис. 1 наведено схему дослідної установки. I – зовнішня порожнина із грійним середовищем (вода); II – внутрішня циліндрична ємність із дослідною рідиною (в'язкий розчин цукру);  $t'_1 \dots t'''_1$  – локальні температури у зовнішній ємності з водою;  $t'_2 \dots t''_2$  – локальні температури у внутрішній ємності з цукровим розчином;  $t'_{ct} \dots t'''_{ct}$  – локальні температури або отримані із розрахунку температури стінки. Позначаємо в подальшому точки вимірювання температури у вигляді  $t^j_i$ , де i – 1, 2 – відповідно датчик встановлений у грійній воді чи цукровому розчині; j – геометричне положення датчика по координаті «у» згідно таблиці 1 і 2.

Таблиця 1

Геометричне положення термодатчиків для грійної води та цукрового розчину, до рисунка 1

№ з/п	Температура	y, мм	z, мм	№ з/п	Температура	y, мм	z, мм
1	$t'_1$	15,85	15	1	$t'_2$	0	15
2	$t''_1$	15,85	60	2	$t''_2$	0	30
3	$t'''_1$	15,85	90	3	$t'''_2$	0	45
				4	$t''_2^{IV}$	0	60
				5	$t'_2^V$	0	90

Експеримент відбувається за умов природної конвекції в об'ємі, який має форму тонкостінного циліндра (товщина стінки 0,5 мм) для дослідної рідини, зовнішнього коаксіального каналу для грійного середовища. Геометричні розміри поверхонь теплообміну: зовнішня кільцева порожнина зовнішнім діаметром 200 мм, внутрішнім – 97 мм, висота – 12 см; внутрішня циліндрична

порожнина діаметром 96 мм; висота – 90 мм. Лабораторний експериментальний стенду розроблений та апробований на кафедрі теплоенергетики ВНТУ (рис. 1) [7].

В якості дослідної рідини в експерименті використовувався цукровий розчин 3-х масових концентрацій: 50%, 60% та 70% твердої частини. Теплофізичні властивості розчинів прийнято згідно [6, 7]. Маса грійного середовища  $\approx 2,3$  кг, дослідної речовини – 0,6...0,8 кг; зміна температур грійного середовища 78...42 °С, нагріваного – 20...65 °С. Температура навколишнього середовища за межами системи 22...30 °С. Попередньо приймаємо, що процес теплообміну у внутрішній ємності (рис. 1, поз. II) відбувається у обмеженому об'ємі.

Для оцінки та обґрунтування можливості використання РТР та виявлення характеру розподілу температур вздовж теплобійної поверхні, проведемо вимірювання температур по висоті дослідної установки (рис 2).

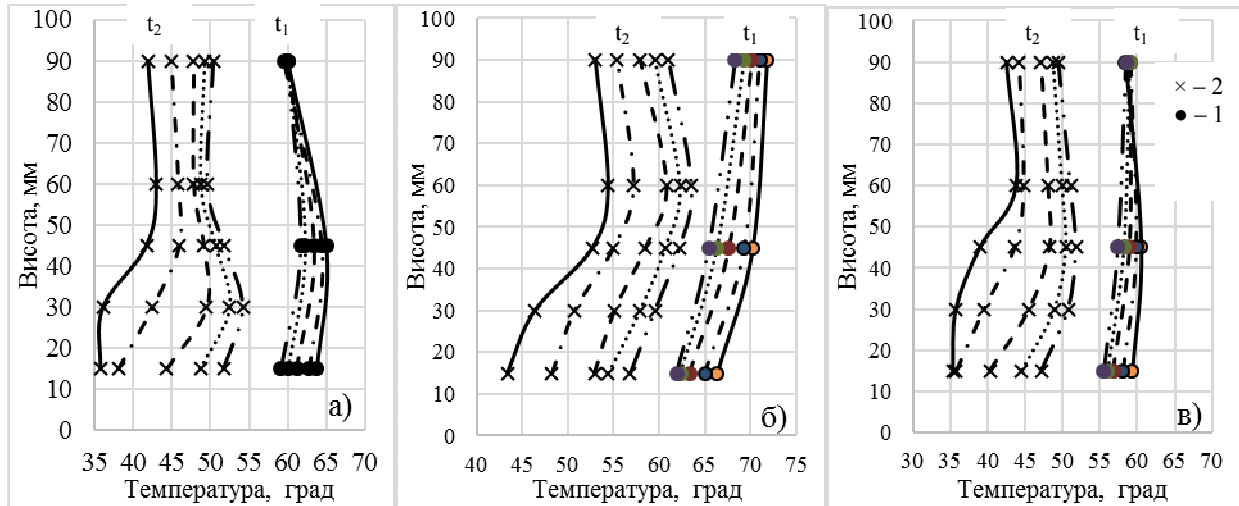


Рисунок 2 – Зміна розподілу локальних температур  $t_1^l$  по вертикалі згідно табл. 1; а), б), в) – масові концентрації цукрового розчину відповідно 50, 60 і 70 %; 1 і 2 – відповідно локальні температури води  $t_1$  та цукрового розчину  $t_2$

На рис. 2 температури цукрового розчину збільшуються з ліва на право із часом експерименту (2), а температури грійної води зменшуються з права наліво (1). Меншу зміну температури грійної води можна пояснити тим, що її маса у три рази більша за масу дослідної рідини. На рисунку 2 показані температури через кожні 60 секунд експерименту. Нахил першої кривої для цукрового розчину має дещо відмінний характер вигину, оскільки на початковому етапі експерименту температурний режим ще не встановився. В подальшому криві розподілу температур описуються профілем ідентичним для всіх кривих. Загальний температурний напір між грійною водою та цукровим розчином  $\Delta t = t_1'' - t_2'''$  змінюється від 29 °С на початковому етапі до 5 °С на кінцевому етапі. Розподіл надлишкових температур дослідного тіла за результатами експерименту представлений на рисунку 3 у вигляді залежності

$$\ln(\vartheta) = f(\tau), \quad (2)$$

де  $\ln(\vartheta)$  – натуральний логарифм надлишкової температури цукрового розчину  $\vartheta = |t_1'' - t_2'''|$ , °С;  $\tau$  – поточний час експерименту, с.

Залежність  $\ln(\vartheta) = f(\tau)$  на рис. 3 характерна для регулярного теплового режиму, який спостерігається у твердих тілах різної форми [1]. В діапазоні  $\tau_n$  формується регулярний тепловий режим. За умов часу  $\tau > \tau_k$  за результатами нашого аналізу загальний температурний напір  $\Delta t = t_1'' - t_2'''$  складає менше 5°С, що може призвести до значних похибок при визначенні інтенсивності теплообміну, тобто  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ .

На рис. 4 по нашим експериментальним результатам представлені залежності темпу охолодження від коефіцієнта тепловіддачі  $m=f(\alpha_{1Nu})$  [1-3].

$$m = \frac{\ln \vartheta' - \ln \vartheta''}{\tau' - \tau''}, \quad (3)$$

де  $\vartheta', \vartheta''$  – надлишкові локальні температури тіла в початковий  $\tau'$  та кінцевий  $\tau''$  момент часу відповідно,  $\vartheta = t_1'' - t_{cr}$ , де  $t_1'', t_{cr}$  визначаються для двох моментів часу  $\tau'$  і  $\tau''$ .

В наших дослідях, температура стінки визначається за допомогою рівняння  $t_{ст} = t_1'' - \bar{q} / \alpha_{1Nu}$  послідовним наближенням, де  $\bar{q}$ ,  $\alpha_{1Nu}$  – відповідно в моменти часу  $\tau'$  і  $\tau''$ , середній тепловий потік через металеву циліндричну стінку та коефіцієнт тепловіддачі від грійної води до стінки, який визначається за відомою критеріальною залежністю для великого об'єму [5].

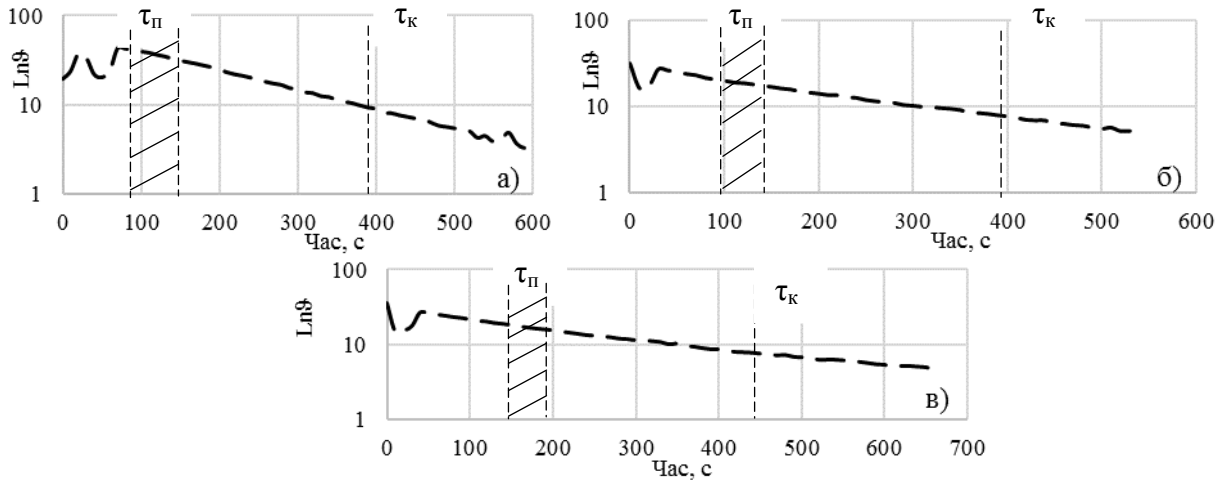


Рисунок 3 – Надлишкові температури цукрового розчину; масові концентрації розчину: а) 50%; б) 60%; в) 70%

Питомий тепловий потік визначено із співвідношення

$$q = \frac{M_2 \cdot C_{p2} \cdot [t_{2(\tau_2)}''' - t_{2(\tau_1)}''']}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (4)$$

де  $M_2$  – маса цукрового розчину у експериментальній ємності, кг;  $C_{p2}$  – питома масова теплоємність цукрового розчину за середньої температури  $C_{p2} = [C_p(t_{2(\tau_2)}''') + C_p(t_{2(\tau_1)}''')]/2$ , кДж/(кг·К);  $t_{2(\tau_1)}'''$ ,  $t_{2(\tau_2)}'''$  – температури розчину, °С, згідно табл. 1 у періоди часу  $\tau_1$  і  $\tau_2$ .

На рисунку 4 розташування експериментальних точок, відповідає якісній кривій, яка описана в [3] для твердих тіл. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі проводимо враховуючи результати наведені на рис. 3, 4 у такому вигляді [1, 3, 6]:  $\alpha_{1m} = \frac{\lambda_e \cdot Bi \cdot V}{K \cdot F}$ .

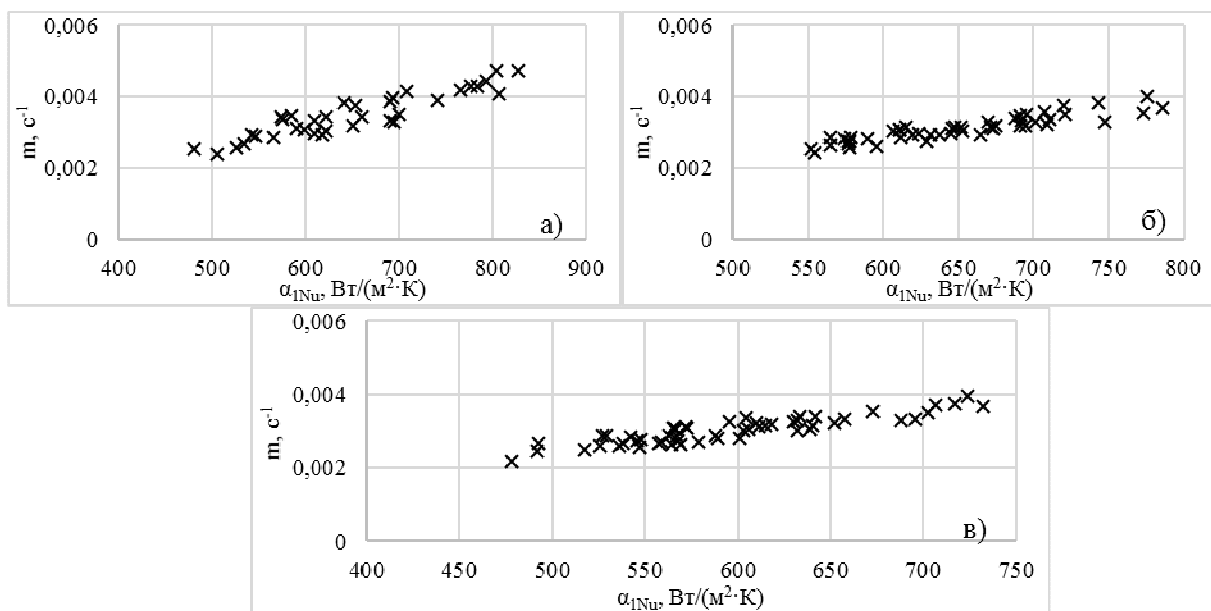


Рисунок 4 – Залежність темпу нагрівання від коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{1Nu}$ . а), б), в) – масові концентрації розчинів відповідно 50, 60 і 70 %.

Критерій Біо та коефіцієнт нерівномірності розподілу температури можна виразити наступними залежностями [1, 3]

$$\psi = (1 + 1.44 \cdot Bi + Bi^2)^{-1/2}, \quad (5)$$

$$\psi = \vartheta_f / \vartheta_v = \frac{m \cdot C_v}{\alpha_{lm} \cdot F}, \quad (6)$$

де  $\vartheta_v$  – надлишкова температура грійного середовища  $\vartheta_v = t_1'' - t_2'''$ , °C;  $\vartheta_f$  – надлишкова температура води по відношенню до середньої температури стінки  $\vartheta_f = |t_1'' - t_{cr}|$ .

Коефіцієнт тепловіддачі для цукрового розчину  $\alpha_{2\text{екс}}$  знаходимо із співвідношення

$$\alpha_{2\text{екс}} = \left( \frac{1}{k_{\text{експ}}} - \frac{1}{\alpha_{1Nu}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

де  $k_{\text{експ}} = q_{\text{екс}} / \Delta t_{\text{екс}}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) – експериментальний коефіцієнт теплопередачі, відношення отриманого в експерименті теплового потоку  $q_{\text{екс}}$  до температурного напору  $\Delta t_{\text{екс}} = t_1'' - t_{cr}$ .

На рисунках 5, 6 дані визначені для однакових періодів часу, але для візуального сприйняття зміщені вздовж осі абсцис.

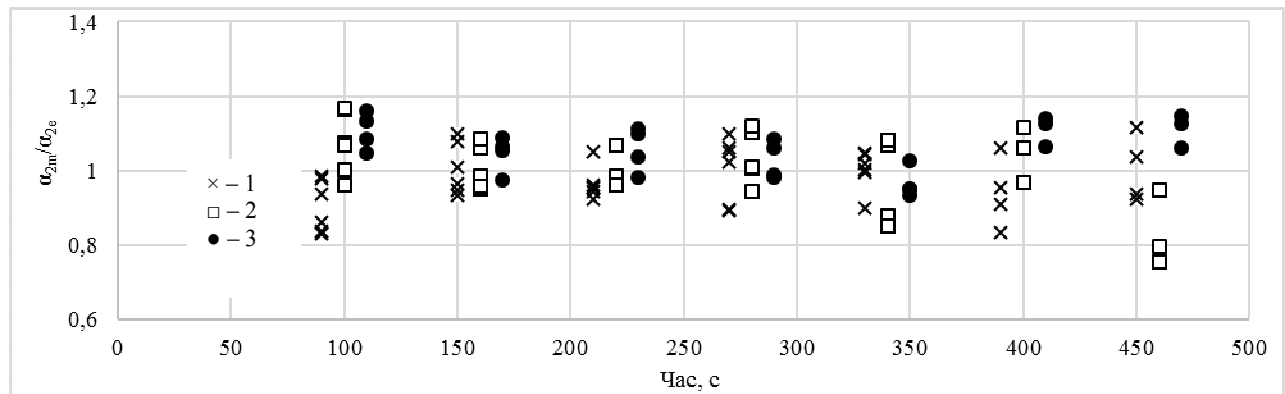


Рисунок 5 – Співвідношення  $\alpha_{2m}/\alpha_{2e}$  на протязі експерименту  
1, 2, 3 – відповідно масові концентрації цукрового розчину 50, 60 і 70 %.

Значення  $K_m$  визначено із рівняння теплопередачі, використавши для розрахунку значення  $\alpha_{2m}$ . Результати співставлення наведені на рис. 6.

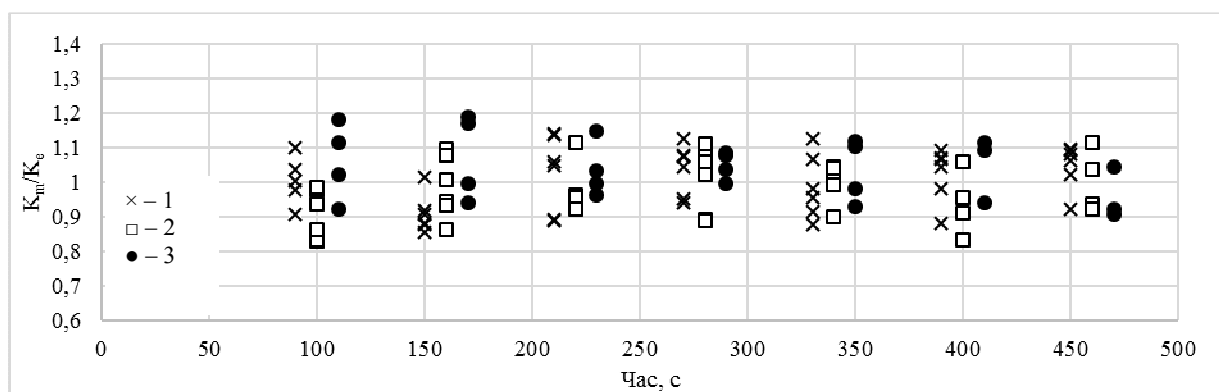


Рисунок 6 – Співвідношення  $K_m/K_e$  на протязі експерименту  
1, 2, 3 – відповідно масові концентрації цукрового розчину 50, 60 і 70 %.

Отримані результати показують збіжність з експериментальними даними. Так значення розкиду точок коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{2m}$  до цукрового розчину масовою концентрацією 50%, 60% та 70% складає: 11...20%. Коефіцієнти теплопередачі ( $k_m$ ) розраховані за методом регулярного режиму мають розбіжність у 8...20% для вибраних концентрацій розчину. Спостерігається загальне збільшення точності визначення  $\alpha_2$  та  $k_m$  із збільшенням в'язкості розчину.

Оцінка похибок визначення величин дала наступні результати [8]: відносна похибка визначення теплового потоку – 4,9...8,72%; коефіцієнту тепловіддачі до цукрового розчину  $\alpha_{2m}$  – 5,4...11,9%; коефіцієнта теплопередачі – 7,0...9,1 %.

Оскільки, попередньо об'єм з цукровим розчином заявлений, як «обмежений об'єм» з позиції теплообміну, для остаточного переконання в правильності цього твердження проведено дослідження відносної товщини граничного теплового шару ( $\delta/R$ ) з врахуванням експериментальних умов.  $\delta$  та  $R$  – відповідно товщина граничного теплового шару та радіус ємності з дослідною рідиною. Граничний тепловий шар визначено згідно [4].

$$\delta = 4,23 \cdot \sqrt[4]{\frac{\nu \cdot \lambda \cdot l}{c_p \cdot \rho \cdot g \cdot (t_{cr} - t_p)}}, \quad (9)$$

Для концентрації цукрового розчину 70 % за умов проедення досліджень спостерігається зміна відносної товщини граничного теплового шару у межах 1,03 до 1,08; для 60% – 0,55...0,87; для 50% – 0,44...0,61. Тобто, для 70% цукрового розчину процес протікає за умов коли  $\delta/R$  близький до 1 – «обмежений об'єм»; для 50 та 60 % – на межі великий об'єм – обмежений об'єм.

Результати отримані за допомогою обробки даних методом регулярного теплового режиму (РТР) дають досить прийнятну з точки зору процесів теплообміну збіжність та можуть бути використані для опису теплообмінних процесів з достатньою точністю. Обробку експериментальних даних за даною методикою можна вважати перспективним продовженням Експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) дослідження теплообміну.

### Висновки

Встановлено, що нестационарний процес теплообміну в обмеженому об'ємі, заповненою в'язкою рідиною, у вигляді циліндричної ємності з відносною довжиною ( $l/d = 1$ ), і в якій відносна товщина теплового граничного шару близька до одиниці ( $\delta/R \approx 1$ ), можна проаналізувати методом регулярного теплового режиму. Обробка методами РТР потребує меншої кількості вимірювань ніж квазістационарні методи, дозволяють визначити область даних, в яких очікується більш достовірний результат.

В даних умовах, визначені за допомогою РТР значення коефіцієнтів теплопередачі від грійної води до розчину дають відхилення від експериментальних до 20%. В той же час аналіз експериментальних даних нестационарних процесів методами стационарних дає відхилення до 40...45%. Відносна похибка визначення коефіцієнту теплопередачі – 7,0...9,1%.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 408 с.
2. Лыков А. В. Теплообмен. Справочник / А. В. Лыков. – М. : «Энергия», 1971. – 560 с.
3. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. Учеб. пособие для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергия, 1979. — 320 с.
4. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – [2-е изд.]. – М. : Энергоатомиздат, 1949 – 396 с.
5. Исаченко В. П. Теплопередача : учебн. для вузов / В. П. Исаченко [и др.]. – [3-е изд. доп.]. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.
6. С. Й. Ткаченко, Д. І. Денесяк Ефективний коефіцієнт теплопровідності за умов теплообміну в обмеженому просторі [Електронний ресурс] режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/16961/3161.pdf?sequence=3>
7. Ткаченко С. Й. Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 148 с.
8. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. Пер. с англ. / Дж. Тейлор. – М. : Мир, 1985. – 272 с.

**Ткаченко Станіслав Йосипович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Теплоенергетики» Вінницького національного технічного університету.

**Денесяк Дмитро Іванович** – аспірант кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет.

S. Tkachenko

D. Denesyak

## PERSPECTIVES OF THE USE OF REGULAR MODE METHODS FOR DEFINITION OF HEAT EXCHANGE INTENSITY IN A LIMITED BOUNDARY

Vinnitsia National Technical University

*The possibility of using the methods of the regular thermal regime for the analysis of experimental data obtained in a limited volume in the form of a cylindrical tank filled with a viscous liquid is substantiated. The advantages of using such as reducing the number of measurements and determining the data area of processing which will give a more reliable result than quasi-stationary methods is established. The results of calculating the heat transfer coefficients and heat transfer by non-stationary methods are presented and the results of comparing these data with the experimental ones are presented.*

**Keywords:** regular regime, non-stationary heat exchange, coefficient of heat transfer, heat transfer coefficient, heat exchange research.

**Stanislav Tkachenko** – doctor of technical sciences, professor, Head of the section «power system», Vinnitsia National Technical University

**Denesyak Dmitry** – graduate student of the power system, Vinnitsia National Technical University.

**С. И. Ткаченко**

**Д. И. Денесяк**

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ

Винницкий национальный технический университет

*Обоснована возможность применения методов регулярного теплового режима для анализа экспериментальных данных, полученных в ограниченном объеме в виде цилиндрической емкости, заполненной вязкой жидкостью. Установлено преимущества применения, такие как уменьшение количества измерений и определения области данных обработка которых даст более достоверный результат чем квазистационарные методы. Представлены результаты расчета коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи нестационарными методами и представлены результаты сопоставления этих данных с экспериментальными.*

**Ключевые слова:** регулярный режим, нестационарный теплообмен, коэффициент теплоотдачи, коэффициент теплопередачи, исследования теплообмена.

**Ткаченко Станислав Иосифович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплоэнергетики» Винницкого национального технического университета.

**Денесяк Дмитрий Иванович** – аспирант кафедры теплоэнергетики, Винницкий национальный технический университет.