

С. Й. Ткаченко¹
О. В. Власенко¹
Н. Д. Степанова¹
Є. О. Павлович¹

НЕСТАЦІОНАРНИЙ ТЕПЛООБМІН У ВЕРТИКАЛЬНОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ ОБ'ЄМІ, ЗАПОВНЕНОМУ РІДИНОЮ

¹Вінницький національний технічний університет

Проаналізовано умови конвективного теплообміну у «обмеженому об'ємі» та у «великому об'ємі». Встановлено, що процес теплообміну в елементах базової експериментальної установки в системі експериментально-розрахункового методу відповідає теплообміну у «великому об'ємі» за умов вільної конвекції. Описаний експериментальний стенд для дослідження нестационарного теплообміну у системі «навколишнє середовище I — тіло II», основними елементами якого є дві робочі порожнини: зовнішня, заповнена водою, об'ємом V_1 , та внутрішня, заповнена досліджуваным рідинним середовищем об'ємом V_2 , причому V_1 більший V_2 в 3 рази. Наведені результати експериментального визначення тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкого металевого циліндра і досліджуваным рідинним середовищем в обмеженому просторі для системи «навколишнє середовище I — тіло II» за умов ламінарного режиму як навколишнього середовища, так і досліджуваного рідинного середовища. Коефіцієнт тепловіддачі досліджувався із застосуванням розрахунково-експериментального методу під час нагрівання та охолодження рафінованої соняшникової олії, дистильованого гліцерину, цукрового розчину концентрації 50 %, 60 % в умовах вільної конвекції. Експериментальні результати зіставлені з результатами досліджень відомих авторів для умов «великого об'єму». Описано умови перебігу теплообмінного процесу під час експерименту за різних напрямів теплообміну в «обмеженому об'ємі» (всередині тонкостінного металевого циліндра із досліджуваною рідиною). Обґрунтовано, що біля поверхні циліндричної металевий стінки в процесі теплообміну утворюється тепловий приграничний шар, в межах якого змінюється температура теплоносія, а перенос теплоти в межах приграничного шару відбувається за рахунок теплопровідності. Отримані критеріальні рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі у разі нагрівання та охолодження досліджуваного рідинного середовища в умовах вільної конвекції.

Ключові слова: коефіцієнт тепловіддачі; досліджуване рідинне середовище; теплообмін, великий об'єм, обмежений об'єм.

Вступ

Для всіх твердих тіл, у яких відсутня пориста структура, перенос теплоти відбувається лише шляхом теплопровідності. Але під час розв'язання задач теплопровідності необхідно для початку встановити процес переносу теплоти: стаціонарна чи нестационарна теплопровідність. Під час розв'язання задач теплопровідності, необхідно встановити де відбувається теплообмін в «обмеженому об'ємі» чи в «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. В «обмеженому об'ємі» за умов вільної конвекції товщина приграничного шару біля обмежувальних поверхонь стає однаковою з геометричними розмірами самого об'єму.

Під «великим об'ємом» розуміється об'єм рідини в якому вільний рух, що виник біля інших тіл в певному об'ємі, не впливає на течію біля теплообмінної поверхні. Вважається, що швидкість руху рідини на відстані від теплообмінної поверхні дорівнює нулю.

Авторам невідомі такі установки і експерименти, на яких би досліджувався нестационарний теплообмін в «обмеженому об'ємі», тому є необхідність перевірити використання стаціонарних методів розрахунку до нестационарної теплопровідності.

Аналізуючи результати досліджень [1], можна зробити висновок, що процес теплообміну в елементах базової експериментальної установки в системі експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) відповідає теплообміну у «великому об'ємі» за умов вільної конвекції.

Метою роботи є визначення коефіцієнта тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевго циліндра і досліджуванім рідинним середовищем із застосуванням критеріально-го рівняння та розрахунково-експериментальним методом.

Основні результати

В роботі досліджений теплообмін в системі «навколишнє середовище (НС) I — тіло II», таких середовищ: рафінованої соняшникової олії марки П (ДСТУ 4492), дистильованого гліцерину, цукрового розчину концентрації 50 % і 60 % під час їхнього нагрівання й охолодження в результаті вільної конвекції. Дослідження проводилися на експериментальному стенді, який описаний в [1].

На рис. 1 показано теплообмін в системі «навколишнє середовище I — тіло II».

Основними елементами експериментальної установки є дві робочі порожнини: зовнішня I-4 (зовнішній циліндр з теплоізолюваною поверхнею заповнений водою III), об'ємом V_1 , та внутрішня II-2 (тонкий металевий циліндр діаметром 100/99 мм, заповнений досліджуванім рідинним середовищем I), об'ємом V_2 , де V_1 більший V_2 в 3 рази. Тому авторами зовнішній кільцевий об'єм вважається як «великий об'єм».

Визначення коефіцієнта тепловіддачі α_2 між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевго циліндра і досліджуванім рідинним середовищем виконується із застосуванням критеріального рівняння (*crit*) [2], [3]

$$\alpha_2^{-crit} = Nu_2 \cdot \lambda_2 / H, \quad (4)$$

де Nu_2 — критерій Нуссельта; H — визначальний розмір циліндра II-3 (висота), м; λ_2 — коефіцієнт теплопровідності досліджуваної рідини, Вт/(м·К).

Коефіцієнти тепловіддачі α_2^{-crit} визначаються за відомим критеріальним рівнянням стаціонарного режиму для «великого об'єму» [3], [4] $\overline{Nu}_2 = 0,76(Gr_2 \cdot Pr_{I2})_h^{0,25} (Pr_{I2}/Pr_w)^{0,25}$ за умови ламінарного режиму $10^3 < (Gr_2 \cdot Pr_I) < 10^8$. В цьому випадку: $Gr_2 = (g\beta_2 \overline{\Delta t} H^3) / \nu_2^2$ — критерій Грасгофа для дослідного рідинного середовища [5]; Pr_{I2} — критерій Прандтля — за середньооб'ємною температурою досліджуваної рідини; Δt — різниця температур між стінкою та рідиною, $\overline{\Delta t} = t_w - t_{I2}$, °C; β — коефіцієнт температурного розширення дослідного рідинного середовища, °C⁻¹; λ — теплопровідність дослідного рідинного середовища, визначена за визначальною температурою, Вт/(м·К); ν — кінематична в'язкість дослідного рідинного середовища, м²/с; C_p — питома теплоємність дослідного рідинного середовища визначена за визначальною температурою, кДж/(кг·К); g — прискорення вільного падіння, м/с²; μ — коефіцієнт динамічної в'язкості середовища, визначений за температурою дослідного рідинного середовища, Па·с; Pr_w — критерій Прандтля для досліджуваної рідини (за температурою стінки в процесі ітерацій).

Визначення коефіцієнта тепловіддачі $\overline{\alpha}_2$ розрахунково-експериментальним методом

$$\overline{\alpha}_2^{cem} = 1 / \left(1/K_{exp} - 1/\overline{\alpha}_1 - \delta_w/\lambda_w \right), \quad (5)$$

де $K_{exp} = Q / (F \cdot \overline{\Delta t})$ — експериментальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); Q — тепловий потік, що сприймається досліджуваною рідиною, кДж; $\overline{\Delta t}$ — середній температурний напір, °C;

δ_w — товщина стінки тонкого металевго циліндра, м; λ_w — теплопровідність стінки тонкого металевго циліндра, Вт/(м·К).

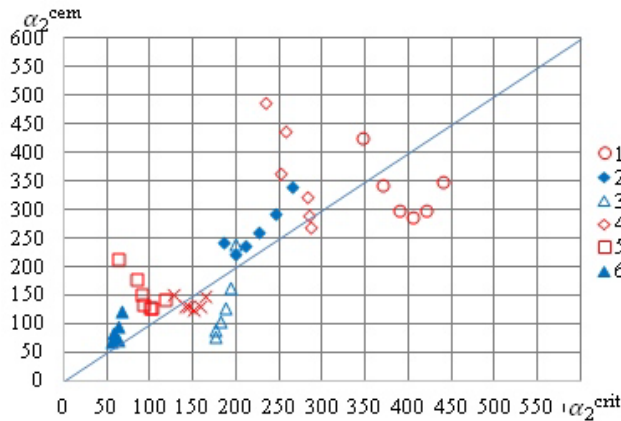


Рис. 2. Зіставлення коефіцієнтів тепловіддачі α_2^{sem} та α_2^{crit}
 1 — цукровий розчин концентрацією 50% при нагріванні;
 2 — цукровий розчин концентрацією 50% при охолодженні;
 3 — цукровий розчин концентрацією 60% при охолодженні;
 4 — цукровий розчин концентрацією 60% при нагріванні;
 5 — соняшникова олія при нагріванні; 6 — соняшникова олія при охолодженні

Для визначення інтенсивності теплообміну за умов вільної конвекції у зовнішньому об'ємі використовується критеріальне рівняння для «великого об'єму» [3], [4] за умови ламінарного режиму $10^3 < (Gr \cdot Pr_{fl}) < 10^8$:

$$\overline{Nu}_1 = 0,76 (Gr_1 \cdot Pr_{fl})_h^{0,25} \left(\frac{Pr_{fl}}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

В цьому випадку: $Gr_1 = (g \cdot \beta_1 \Delta t H^3) / \nu_1^2$ — критерій Грасгофа для навколишнього середовища (води); Pr_{fl} — критерій Прандтля — за середньо-об'ємною температурою води; Δt — різниця температур між стінкою та водою, $\Delta t = t_w - t_{fl}$, °C; β_1 — коефіцієнт температурного розширення води, °C⁻¹; ν_1 — кінематична в'язкість дослідного рідинного середовища, м²/с; C_{p1} — питома теплоємність води визначена за визначальною температурою, кДж/(кг·К); g — прискорення вільного падіння, м/с²; Pr_w — критерій Прандтля для води — за температурою стінки в процесі ітерацій.

Коефіцієнти тепловіддачі між водою і зовнішньою поверхнею тонкостінного металевго циліндра визначаються так: $\alpha_1 = Nu_1 \cdot \lambda_1 / H$; де λ_1 — теплопровідність води, Вт/(м·К); H — визначальний лінійний розмір, м.

Біля поверхні циліндричної металевго стінки в процесі теплообміну утворюється тепловий приграничний шар, в межах якого змінюється температура теплоносія (рис. 3б, в). 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 досліджуваної рідини (розчина). Перенос теплоти у разі ламінарної течії відбувається за рахунок теплопровідності.

На рис. 3 показана картина руху рідини вздовж вертикальної циліндричної металевго стінки у «обмеженому об'ємі» (тонкостінний металевий циліндр) за різних напрямів теплообміну та у «великому об'ємі» під час вільної конвекції. За умови нагрівання досліджуваної рідини (рис. 3б) тепловий потік передається від зовнішнього гарячого теплоносія (води) до циліндричної металевго стінки, від циліндричної металевго стінки до досліджуваної рідини і далі розповсюджується по об'єму рідини. Теплі маси рідини рухаються (швидкість не дорівнює нулю $u \neq 0$) донизу ємності заміщаючи холодні в приграничному тепловому шарі. За умови охолодження ($u \neq 0$) тепловий потік передається від досліджуваної рідини до циліндричної металевго стінки, від циліндричної металевго стінки до зовнішнього теплоносія (води) і далі розповсюджується по кільцевому об'єму зовнішньої посудини. У «великому об'ємі» (рис. 3а) чим більший перепад температур, тим більше відрізняється в'язкість, теплопровідність та теплоємність теплоносія у різних точках приграничного шару, що суттєво впливає на інтенсивність тепловіддачі.

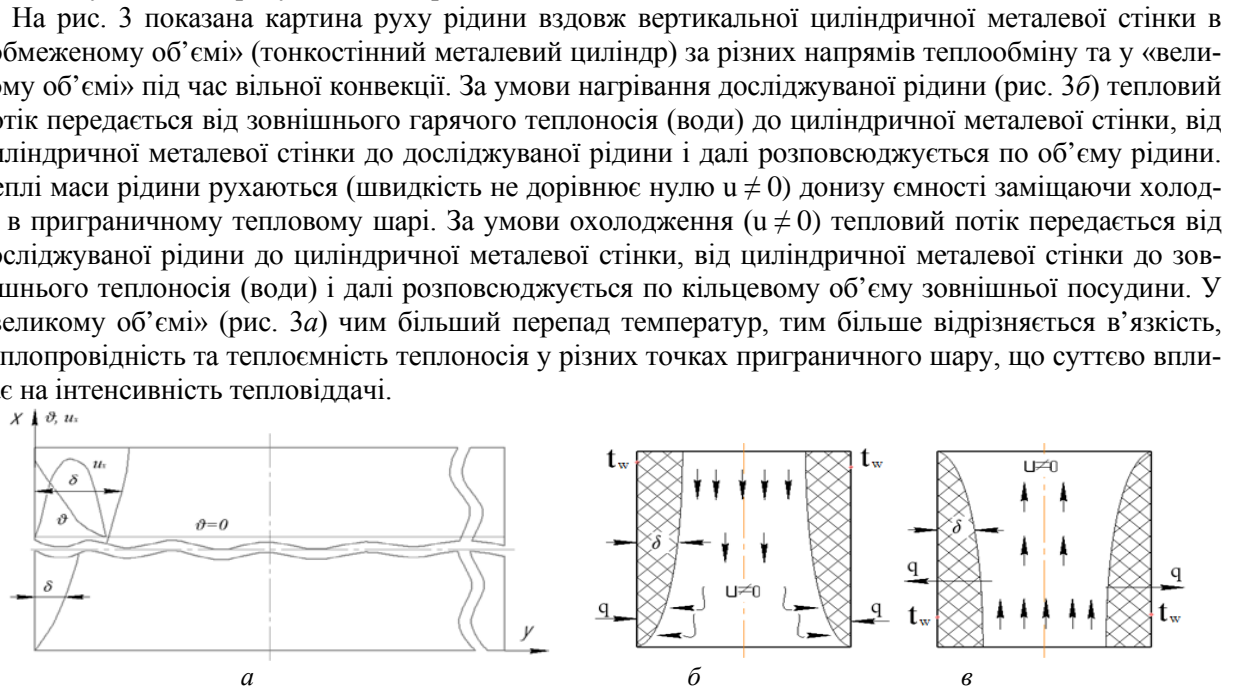


Рис. 3. Характер зміни температури в приграничному тепловому шарі: а — при нагріванні у великому об'ємі; б — при нагріванні в обмеженому об'ємі; в — при охолодженні в обмеженому об'ємі

На основі проведених експериментальних розрахунків, отримано критеріальні рівняння для опису процесів теплообміну у внутрішній порожнині експериментальної установки.

У авторів [3], [4] в тому ж проміжку визначального параметра $Gr \cdot Pr_l$ критеріальне рівняння набуває вигляд $\overline{Nu}_2 = 0,76(Gr_2 \cdot Pr_2)_h^{0,25} \left(\frac{Pr_l}{Pr_w} \right)^{0,25}$. Апроксимація отриманих результатів (рис. 4а, б) дає структуру рівняння в діапазоні $10^3 < (Gr \cdot Pr_l) < 10^8$ за умови нагрівання досліджуваного рідинного середовища $\overline{Nu}_1 = 0,675(Gr_1 \cdot Pr_2)_h^{0,258} \left(\frac{Pr_{l1}}{Pr_w} \right)^{0,25}$, а за умови охолодження —

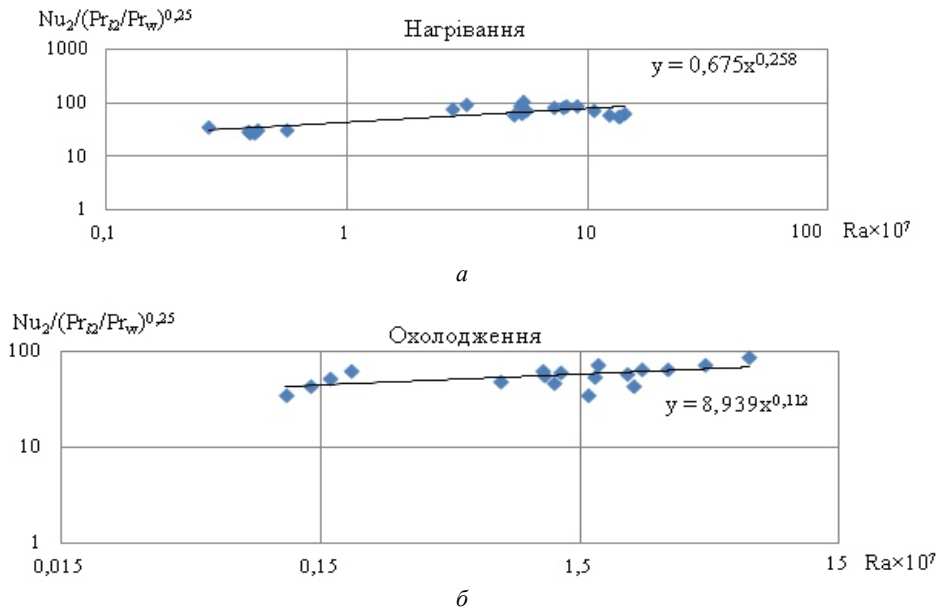
$$\overline{Nu}_2 = 8,939(Gr_2 \cdot Pr_2)_h^{0,112} \left(\frac{Pr_l}{Pr_w} \right)^{0,25}.$$


Рис. 4. Уточнення критеріальної залежності для опису теплообміну при нагріванні і охолодженні досліджуваного рідинного середовища

Висновки

Проведено аналіз теплообмінних процесів під час нагрівання й охолодження рідини у «обмеженому об'ємі» та у «великому об'ємі». Проаналізовано результати досліджень і виявлено, що процес теплообміну в елементах базової експериментальної установки в системі експериментально-розрахункового методу відповідає теплообміну у «великому об'ємі» за умов вільної конвекції.

Описані основні елементи експериментальної установки для дослідження нестационарного теплообміну у системі «навколишнє середовище I — тіло II», а саме дві робочі порожнини: зовнішня, заповнена водою об'ємом V_1 , та внутрішня, заповнена досліджуваним рідинним середовищем об'ємом V_2 , причому V_1 більший V_2 в 3 рази. Тому під час розрахунково-експериментального методу вважали зовнішній кільцевий об'єм як «великий об'єм». Досліджувалися процеси нагрівання і охолодження рафінованої соняшникової олії марки П ДСТУ 4492, дистильованого гліцерину, цукрового розчину концентрації 50 %, 60 % за умов вільної конвекції.

Отримані експериментальні результати тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкого металевого циліндра і досліджуваним рідинним середовищем в обмеженому просторі для системи «навколишнє середовище I — тіло II» дають уявлення про механізм теплообміну у досліджуваних рідинних середовищах в обмеженому об'ємі за різних напрямків теплообміну. Обґрунтовано, що біля поверхні циліндричної металевій стінки в процесі теплообміну утворюється тепловий приграничний шар, в межах якого змінюється температура теплоносія, а перенос теплоти в межах приграничного шару відбувається за рахунок теплопровідності.

Експериментальні результати зіставленні з результатами досліджень відомих авторів для умов «великого об'єму». Отримані критеріальні рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі під час нагрівання та охолодження внутрішньої порожнини експериментальної установки в умовах

вільної конвекції в діапазоні $10^3 < (Gr \cdot Pr_l) < 10^8$.

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] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*. Danvers: John Wiley & Sons, Inc, 2011, 997 p.
- [3] В. П. Исаченко, В. А. Осипова, и А. С. Сукомел, *Теплопередача*, учеб. для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп.. Москва, Россия, 1975, 488 с.
- [4] М. А. Михеев, и И. М. Михеева, *Основы теплопередачи*, изд. 2-е, стереотип. Москва, Россия: Энергия, 1977, 344 с.
- [5] А. В. Лыков, *Тепломассообмен*, справ. Москва, Россия: Энергия, 1971, 560 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 4.11.2021

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

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

Степанова Наталія Дмитрівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: Stepanovand@i.ua ;

Павлович Євгеній Олексійович — аспірант кафедри теплоенергетики, e-mail: evgenijpavlovic3@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

S. Yo. Tkachenko¹
O. V. Vlasenko¹
N. D. Stepanova¹
Ye. O. Pavlovych¹

Non-stationary Heat Exchange in a Vertical Cylindrical Volume Filled with Liquid

¹Vinnitsia National Technical University

The paper analyzes the conditions of convective heat transfer in the "limited volume" and in the "large volume". It is established that the process of heat exchange in the elements of the basic experimental setup in the system of experimental calculation method corresponds to heat exchange in a "large volume" under conditions of free convection. An experimental stand for the study of nonstationary heat exchange in the system "environment I — body II", the main elements of which are two working cavities — the outer filled with water, volume V_1 , and the inner filled with the studied liquid medium volume V_2 , and V_1 is larger V_2 3 times. The results of experimental determination of heat transfer between the inner surface of a thin metal cylinder and the investigated liquid medium in a limited space for the system "environment I — body II" under the conditions of laminar regime of both the environment and the investigated liquid medium are presented. The heat transfer coefficient was investigated using the calculation-experimental method during heating and cooling of refined sunflower oil, distilled glycerin, sugar solution with a concentration of 50 %, 60 % under conditions of free convection. The experimental results are compared with the results of studies by well-known authors for "large volume" conditions. The conditions of the heat exchange process during the experiment at different directions of heat exchange in a "limited volume" (inside a thin-walled metal cylinder with the liquid under study) are described. It is substantiated that at the surface of a cylindrical metal wall in the process of heat exchange a thermal boundary layer is formed, within which the coolant temperature changes and heat transfer within the boundary layer occurs due to thermal conductivity. The criterion equations for determining the heat transfer coefficient during heating and cooling of the investigated liquid medium under free convection conditions are obtained.

Keywords: heat transfer coefficient; the studied liquid medium; heat exchange; large volume; limited volume.

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

Vlasenko Olga V. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Engineering, e-mail: olgakysak7@gmail.com ;

Stepanova Nataliya D. — Cand. Sc. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Thermal Power Engineering, e-mail: Stepanovand@i.ua ;

Pavlovych Yevgeniy O. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Engineering, e-mail: evgenijpavlovic3@gmail.com