

УДК 681.12

<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-11-18>**С. Й. Ткаченко¹**
О. В. Власенко²

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ В МОЛОЧНИХ ПРОДУКТАХ

¹Вінницький національний технічний університет;²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Молоко — складна рідина. Його основними компонентами є вода, лактоза, жир, білок і мінерали, але їхня відносна кількість залежить від генетики, пори року, харчування тварин, рівня виробництва тощо. Для переробки різних молочних продуктів: вершкового масла, сиру, згущеного молока, йогурту тощо, — потрібно багато технологічних шляхів.

Однією з найважливіших вимог сучасного молочного виробництва є можливість контролювати температуру продуктів на кожному етапі процесу. Тому нагрівання та охолодження є дуже поширеними операціями на молокозаводі.

Теплообмінники стали критично важливим компонентом переробки молока, і без них багато молочних продуктів вважалися б небезпечними для споживання через ріст шкідливих мікроорганізмів. Теплообмінники використовуються для багатьох процесів обробки, включно з пастеризацією, стерилізацією та іншими потребами харчової промисловості.

В роботі встановлюється існування регулярного теплового режиму в системі «навколишнє середовище (вода в кільцевому об'ємі) — тонка циліндрична металева стінка — дослідне рідинне середовище». Як дослідне рідинне середовище вибрано молоко та молочну сироватку. Вивчається теплообмін в умовах вільної конвекції.

Експериментально встановлено, що в дослідній системі «навколишнє середовище (вода в кільцевому об'ємі) — тонка циліндрична металева стінка — дослідне рідинне середовище» мають місце ознаки регулярного теплового режиму, тобто, сталість темпу охолодження (нагрівання) дослідного рідинного середовища в тонкій циліндричній металевій посудині; сталість коефіцієнта тепловіддачі в процесі регулярного теплового режиму; сталість коефіцієнта нерівномірності розподілу температур.

За використання методу регулярного теплового режиму визначено коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія молочним продуктам в умовах використання експериментально-розрахункового методу.

Коефіцієнт тепловіддачі молоку під час нагрівання знаходиться в межах 640...700 Вт/(м²·К), молочній сироватці під час нагрівання — 710...820 Вт/(м²·К), молочній сироватці під час охолодження — 430...500 Вт/(м²·К).

Ключові слова: регулярний тепловий режим, нестационарний теплообмін, темп охолодження, коефіцієнт тепловіддачі, теплообмінник, молочні продукти.

Вступ

Процеси теплообміну мають велике значення у хімічній, енергетичній, металургійній, харчовій та інших галузях промисловості. У теплообмінних апаратах теплопередавання від одного середовища до іншого через стінку, що розділяє їх, обумовлена низкою факторів і є складним процесом, який розділяють на три елементарних види теплообміну: теплопровідність, конвекцію і теплове випромінювання [1].

Молочна промисловість — це високорозвинена галузь, оснащена передовою сучасною технікою. У її склад входять підприємства з виробництва цільномолочної продукції, тваринної олії, молочних консервів, різних видів сирів та інших продуктів.

Теплова обробка молока є комбінацією режимів впливу температури (нагріву або охолодження) і тривалістю витримки за цієї температури. При цьому тривалість витримки за заданої температури повинна бути такою, щоби був отриманий потрібний ефект. У молочній галузі тепла обробка здійснюється за температури до 100 і понад 100 °С. Під час нагрівання до 100 °С в молоці гинуть тільки вегетативні форми, а за температури більше 100 °С — вегетативні і спорові форми. Під час теплової обробки молоко піддають охолодженню, підігріванню (нагріванню), термовакуумній обробці [2].

Режим теплової обробки молока для виробництва кожного виду продукції визначений технологічною інструкцією. При цьому молоко нагрівають до пастеризації, а потім витримують і швидко охолоджують до необхідної температури. Поєднання операцій нагрівання та охолодження описане технологічними та санітарними вимогами, а також можливістю використання теплоти гарячого продукту. Для цього гарячий продукт прямує до спеціальної секції апарата (пластинчастого або трубчастого) для попереднього нагрівання холодного продукту, що надходить на пастеризацію. Цю операцію називають регенерацією теплоти, а апарати або їхні частини — регенераторами чи секціями регенерації. Застосування цієї операції дозволяє отримати певну економію теплової енергії, що витрачається на пастеризацію [1], [2].

Однією з найважливіших вимог сучасного молочного виробництва є можливість контролювання температури продуктів на кожному етапі процесу. Нагрівання та охолодження є дуже поширеними операціями на молокозаводі. Гаряча вода або іноді пара низького тиску використовується, як теплоносії для нагрівання молока. Певна кількість теплоти передається від теплоносія молоку так, що температура останнього підвищується, а температура теплоносія відповідно знижується [2].

Мета роботи — визначення інтенсивності тепловіддачі до молочних продуктів з використанням методу регулярного теплового режиму в умовах використання експериментально-розрахункового методу.

Основні результати

Молоко — складна рідина. Його основними компонентами є вода, лактоза, жир, білок і мінерали, але їхня відносна кількість залежить від генетики, пори року, харчування тварин, рівня виробництва тощо. Для переробки різних молочних продуктів — вершкового масла, сиру, згущеного молока, йогурту тощо, потрібно багато технологічних процесів. Найпоширенішим технологічним процесом є пастеризація. Пастеризація — це процес нагрівання рідких молочних продуктів, щоб зробити їх безпечними для споживання людиною шляхом знищення мікроорганізмів, що викликають хвороби (патогенів) [3].

Для досягнення вищезазначених цілей використовуються два процеси — періодичний або безперервний, кожний з яких використовує різні комбінації температури та часу. З цих двох безперервний процес є ширше використовуваним завдяки його економічним перевагам. У цьому методі тепла обробка зазвичай здійснюється за допомогою пластинчастого теплообмінника, який нагріває молоко до температури вище 60 °С. Коли молоко нагрівається вище цієї температури, починає утворюватися молочний наліт [3].

В основному існує три типи теплообмінників, які використовуються в молочній промисловості: пластинчасті, трубчасті та зі скребковою поверхнею. Пластинчастий теплообмінник (рис. 1) є найпоширенішим завдяки його відносно вищому коефіцієнту конвекції, меншій схильності до забруднення (висока турбулентність), легкості очищення та компактності. Трубчасті теплообмінники (рис. 2) можна використовувати, коли необхідний тривалий час роботи. Для в'язких продуктів використовують теплообмінники зі скребковою поверхнею [3], [4].

Теплообмінники стали критично важливим компонентом переробки молока, і без них багато молочних продуктів вважалися б небезпечними для споживання через ріст шкідливих мікроорга-

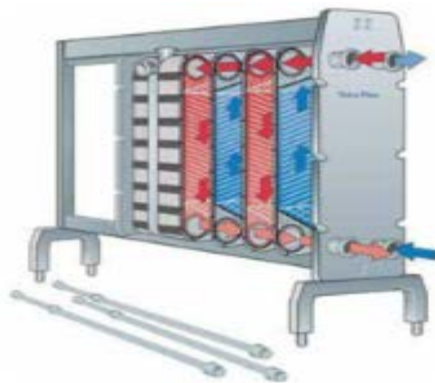


Рис. 1. Пластинчастий теплообмінник [4]



Рис. 2. Трубчастий теплообмінник [4]

нізмів. Теплообмінники використовуються для багатьох процесів обробки, зокрема пастеризації, стерилізації та інших потреб харчової промисловості. Більшість молочних компаній використовують пластинчасті теплообмінники для виконання цих завдань через їхню універсальність у конструкції та розмірах. Різні молочні продукти вимагають різних температур і часу обробки, тому для виробника надзвичайно важливо переконатися, що він вибирає теплообмінники, які найкраще підходять для ефективної обробки молочного продукту перед його споживанням [5].

В роботі встановлюється існування регулярного теплового режиму в системі «навколишнє середовище (вода в кільцевому об'ємі) — тонка циліндрична металева стінка — дослідне рідинне середовище». Як дослідне рідинне середовище вибрано молоко та молочну сироватку. Вивчається теплообмін в умовах вільної конвекції.

Дослідження проводяться на експериментальному стенді, розробленому на кафедрі теплоенергетики ВНТУ [6]. Експериментальна установка складається з ізолюваної зовнішньої, металевої тонкостінної внутрішньої робочих ємностей та ізолюваної кришки. Висота циліндричної теплообмінної поверхні $H = 0,108$ м, маса навколишнього середовища (води) — 3 кг, маса дослідного рідинного середовища — 1 кг. У зовнішню ємність заливається гарячий теплоносій (вода) з температурою T_1 , у внутрішню — дослідне рідинне середовище з температурою T_2 . Після чого експериментальна установка закривається ізолюваною кришкою. В обидві ємності поміщаються зонди з термодатчиками для зняття температур. Дослід закінчується, коли температури у воді і рідинному середовищі вирівнюються ($\pm 3 \dots 5$ °C).

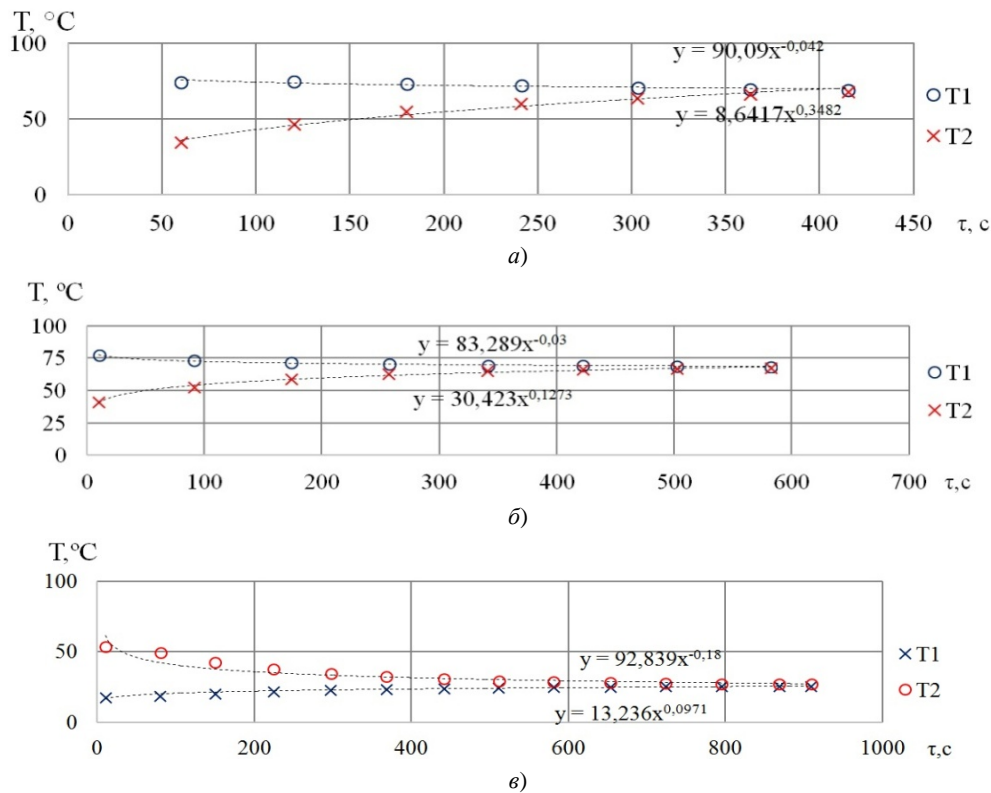


Рис. 3. Розподіл температур дослідного рідинного середовища в залежності від часу τ , с:
 T_1 — температура навколишнього середовища (води), °C; T_2 — температура молока, °C;
 а — нагрівання молока; б — нагрівання молочної сироватки; в — охолодження молочної сироватки

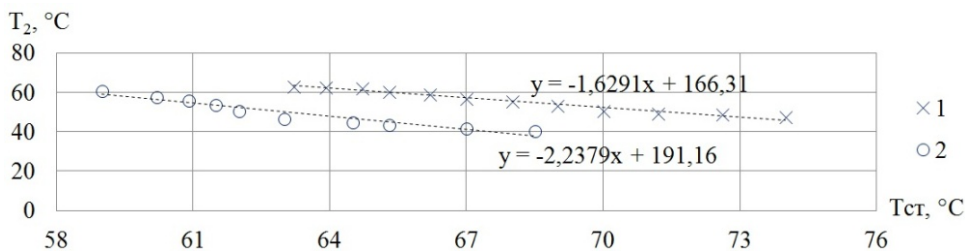
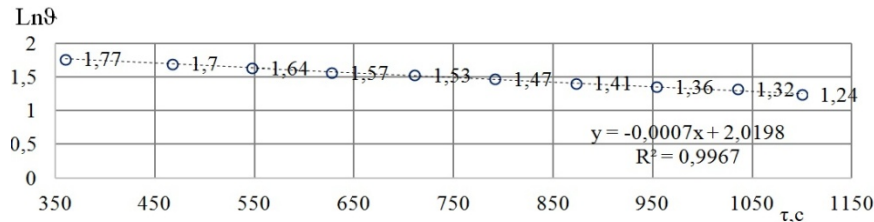


Рис. 4. Залежність зміни температури дослідного рідинного середовища в залежності від зміни температури стінки: 1 — для молока; 2 — для молочної сироватки

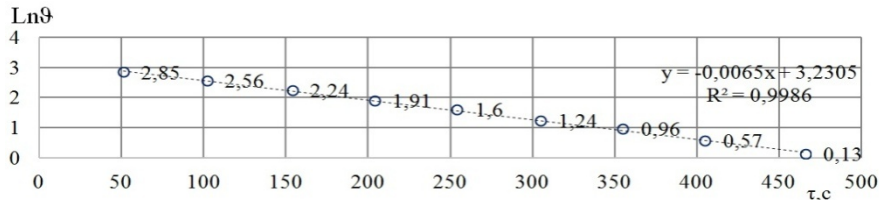
Раніше авторами встановлено, що в тілі II, яке складається з рідинного середовища в тонкій металевій циліндричній оболонці, мають місце ознаки регулярного теплового режиму: темп охолодження (нагрівання) тіла II — $m = \text{const}$; коефіцієнт тепловіддачі між водою (навколишнє середовище I) і тілом II практично сталий $\alpha_1 \approx \text{const}$; коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі II $\psi \approx \text{const}$ [6], [7].

В роботі встановлено існування регулярного теплового режиму, коли як дослідне рідинне середовище взято продукти молочної галузі. Встановлено сталість темпу охолодження (нагрівання) $m = \text{const}$, що характерно для регулярного теплового режиму в твердому тілі (системі з твердих тіл) [6].

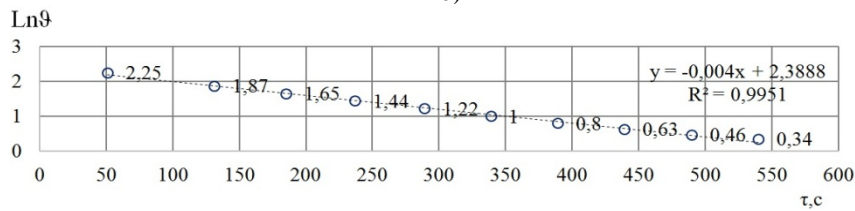
Крива (рис. 5б) є апроксимацією дослідних даних надлишкової температури у вигляді функції $\text{Ln} \theta = m \cdot \tau + C$, де m — темп охолодження (нагрівання), C — коефіцієнт рівняння, R^2 — коефіцієнт детермінації.



a)

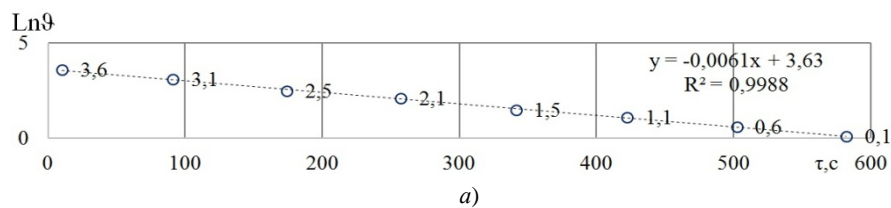


б)

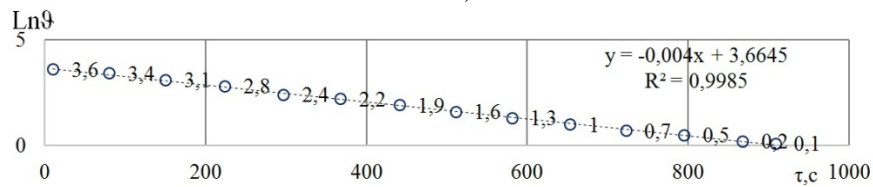


в)

Рис. 5. Значення надлишкової температури під час нагрівання молока:
а — I серія дослідів; б — II серія дослідів; в — III серія дослідів



a)



б)

Рис. 6. Значення надлишкової температури під час: а — нагрівання та б — охолодження молочної сироватки

Для порівняння результатів молочних продуктів з водою, на рис. 7 показані значення надлишкової температури під час нагрівання (а) та охолодження (б) води.

Обробка здійснюється методом стаціонарного теплообміну, досліджуючи весь проміжок часу з початку експерименту, кожну наступну ділянку збільшуючи на 90 с від попередньої (рис. 8), $\Delta\tau_n = \Delta\tau_{n-1} + 90$ с.

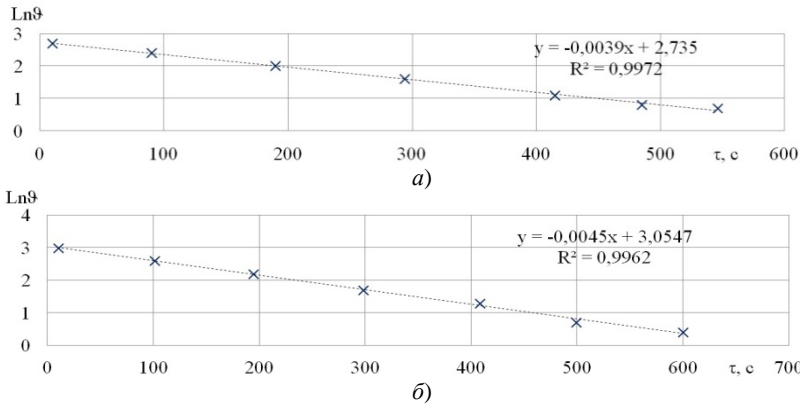


Рис. 7. Значення надлишкової температури під час: *a* — нагрівання та *б* — охолодження води.

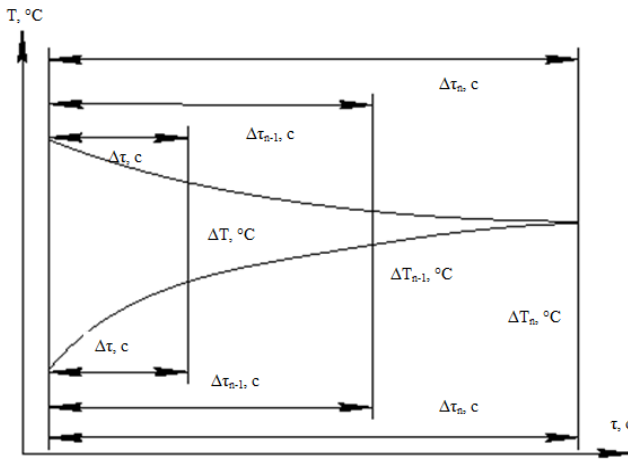


Рис. 8. До обробки експериментальних даних під час охолодження (нагрівання) дослідного рідинного середовища

На основі експериментальних даних з рідинами, використовуючи математичну модель, визначено коефіцієнт тепловіддачі між навколишнім середовищем (водою) та циліндричною стінкою внутрішньої ємності α_1 за умов стаціонарного режиму [6], [7] ламінарного режиму та виконання $10^3 < (Gr \cdot Pr_p) < 10^8$

$$\overline{Nu} = 0,76 (Gr \cdot Pr_p)_h^{0,25} \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (1)$$

де Pr_p — критерій Прандтля для води;
 $Gr_H = (g\beta\Delta t H^3)/\nu^2$ — критерій Грасгофа;
 Pr_c — критерій Прандтля для води, визначений за температурою стінки; g — прискорення вільного падіння, m/c^2 ; H — визначальний розмір внутрішньої посудини (висота), m ; $\Delta t = (\bar{t}_{ст} - \bar{t}_p)$ — температурний напір, $^{\circ}C$; β — коефіцієнт температурного розширення води, $^{\circ}C^{-1}$; ν — кінематична в'язкість води, m^2/c .

Визначення коефіцієнта тепловіддачі α_1 розрахунковим методом, $Вт/(m^2 \cdot K)$ [6], [7]

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

де Nu_1 — критерій Нуссельта; λ_1 — коефіцієнт теплопровідності навколишнього середовища (води), $Вт/(m \cdot K)$.

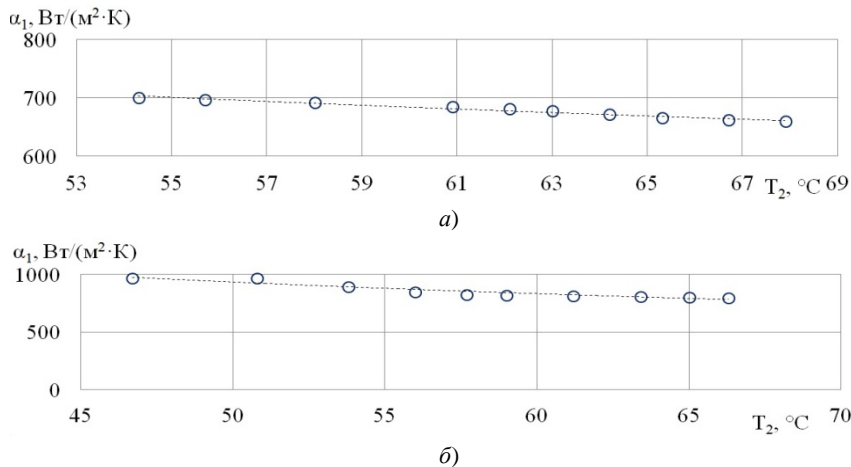
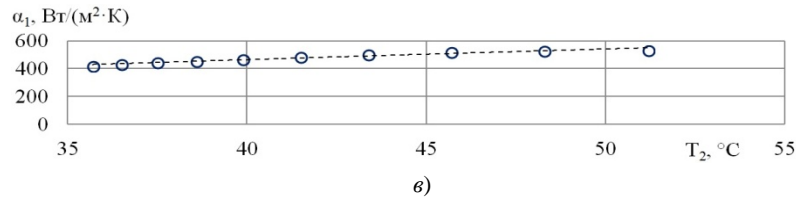


Рис. 9. Коефіцієнт тепловіддачі між водою та циліндричною стінкою в залежності від T_2 : *a* — молоко під час нагрівання; *б* — молочна сироватка під час нагрівання



Продовження рис. 9. Коефіцієнт тепловіддачі між водою та циліндричною стінкою в залежності від T_2 :
 ϵ — молочна сироватка під час охолодження

З рис. 9 випливає, що коефіцієнт тепловіддачі в процесі регулярного теплового режиму практично сталий ($\bar{\alpha}_1 \approx \text{const}$).

З рис. 10 очевидно, що коефіцієнт нерівномірності розподілу температур практично сталий ($\bar{\psi} \approx \text{const}$).

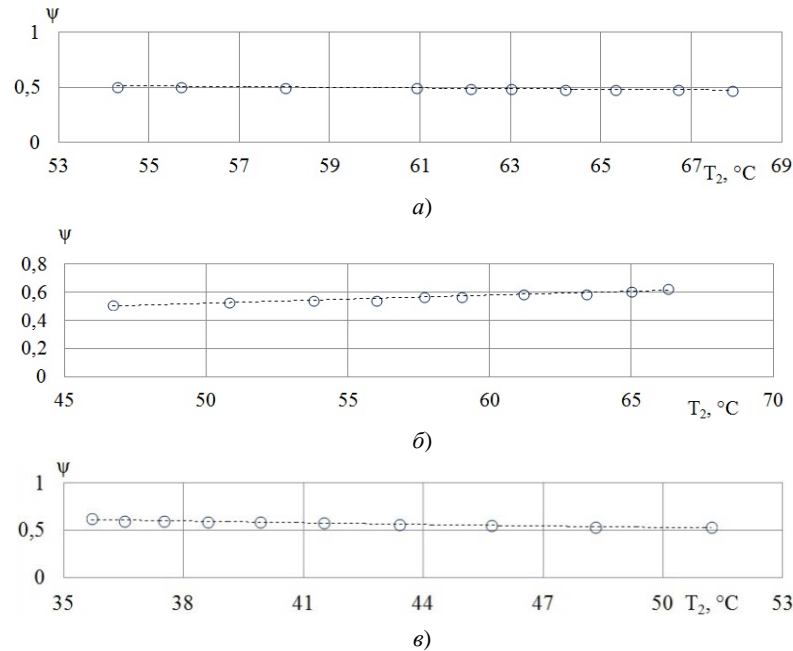


Рис. 10. Коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в дослідній системі в залежності від T_2 :
 a — молоко під час нагрівання; b — молочна сироватка під час нагрівання; v — молочна сироватка під час охолодження

Експериментально встановлено, що в дослідній системі «навколишнє середовище (вода в кільцевому об'ємі) — тонка циліндрична металева стінка — дослідне рідинне середовище» мають місце ознаки регулярного теплового режиму, тобто, темп нагрівання дослідного рідинного середовища в тонкій циліндричній металевій посудині $m = \text{const}$; коефіцієнт тепловіддачі в процесі регулярного теплового режиму практично сталий $\bar{\alpha}_1 \approx \text{const}$; коефіцієнт нерівномірності розподілу температур $\bar{\psi} \approx \text{const}$.

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі молочним продуктам (рис. 11) за використання методу регулярного теплового режиму та експериментально-розрахункового методу [7], [8]

$$\bar{\alpha}_2^{pmp} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{експ}}} - \frac{F \cdot \bar{\psi}}{m \cdot C_1}}, \quad (3)$$

де $k_{\text{експ}} = Q/(F \cdot \Delta t)$ — експериментальний коефіцієнт теплопередачі від води до досліджуваного рідинного середовища, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; Q — тепловий потік, що сприймається досліджуваним рідинним середовищем, Вт ; F — площа тонкостінного металевого циліндра (внутрішня ємність), м^2 ; C_2 — питома теплоємність молочних продуктів, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

З рис. 11 видно, що коефіцієнт тепловіддачі молоку під час нагрівання знаходиться в межах $\bar{\alpha}_2 = 640 \dots 700 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, молочній сироватці під час нагрівання — $\bar{\alpha}_2 = 710 \dots 820 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, молочній сироватці під час охолодження — $\bar{\alpha}_2 = 430 \dots 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

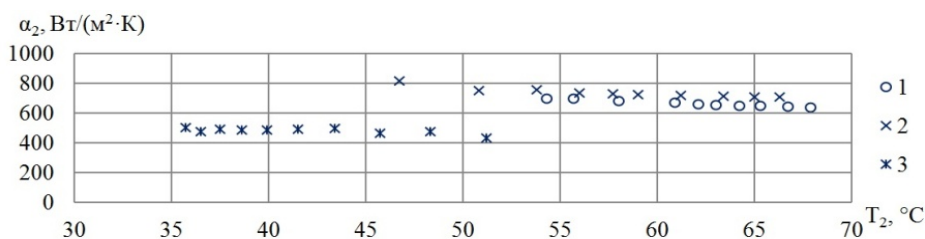


Рис. 11. Коефіцієнт тепловіддачі між циліндричною стінкою та дослідним рідинним середовищем в залежності від T_2 : 1 — молоко під час нагрівання; 2 — молочна сироватка під час нагрівання; 3 — молочна сироватка під час охолодження

Висновки

1. Експериментально встановлено, що в дослідній системі «навколишнє середовище (вода в кільцевому об'ємі) — тонка циліндрична металева стінка — дослідне рідинне середовище» мають місце ознаки регулярного теплового режиму. Темп нагрівання дослідного рідинного середовища в тонкій циліндричній металевій посудині — сталий; коефіцієнт тепловіддачі між водою та циліндричною стінкою в процесі регулярного теплового режиму практично сталий; коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в дослідній системі практично сталий.

2. За використання методу регулярного теплового режиму визначені коефіцієнти тепловіддачі до молочних продуктів.

3. Коефіцієнти тепловіддачі, визначенні на експериментальному стенді під час нагрівання, знаходяться в межах: молоку — $\bar{\alpha}_2 = 640 \dots 700$ Вт/(м²·К), молочній сироватці під час нагрівання — $\bar{\alpha}_2 = 710 \dots 820$ Вт/(м²·К), молочній сироватці під час охолодження — $\bar{\alpha}_2 = 430 \dots 500$ Вт/(м²·К).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *A hot market for heat exchangers in dairy processing*. [Electronic resource]. Available: <https://www.dairyfoods.com/articles/94602-a-hot-market-for-heat-exchangers-in-dairy-processing>. Accessed on: January 19, 2023.
- [2] *Applications of Heat Exchangers in the Dairy Industry*. [Electronic resource]. Available: <https://thermtest.com/applications-of-heat-exchangers-in-the-dairy-industry>. Accessed on: January 15, 2023.
- [3] *Featured Story — Milk fouling in heat exchangers*. [Electronic resource]. Available: <https://heat-exchanger-world.com/featured-story-milk-fouling-in-heat-exchangers>. Accessed on: January 10, 2023.
- [4] *Tetra Pak, Designing a process line*. [Electronic resource]. Available: <https://dairyprocessinghandbook.tetrapak.com/chapter/designing-process-line>. Accessed on: January 10, 2023.
- [5] K. Garver, *The Latest in Heat Exchangers for Food Processing*. [Electronic resource]. Available: <https://thermtest.com/heat-exchangers-and-thermal-fluids-in-the-food-processing-industry>. Accessed: 2016, September 26.
- [6] 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>.
- [7] 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>.
- [8] О. В. Власенко, «Дослідження теплообміну в об'ємі двофазної рідини за умов вимушеної її конвекції», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 14-20, 2021.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 16.02.2023

Ткаченко Станіслав Йосипович — д-р техн. наук, професор, 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: olgakytsak7@gmail.com .

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

S. Yo. Tkachenko¹
O. V. Vlasenko²

Using the Method of Regular Thermal Mode for Determining the Coefficient of Heat Transfer in Dairy Products

¹Vinnitsia National Technical University;

²National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Milk is a complex liquid. Its main components are water, lactose, fat, protein and minerals, but their relative amounts depend on genetics, season, diet and production level, etc. Processing of various dairy products - butter, cheese, condensed milk, yogurt, etc. requires many technological ways.

One of the most important requirements of modern dairy production is the ability to control the temperature of products at each stage of the process. Therefore, heating and cooling are very common operations at a dairy plant.

Heat exchangers have become a critical component of milk processing, and without them many dairy products would be considered unsafe for consumption due to the growth of harmful microorganisms. Heat exchangers are used in numerous processes, including pasteurization, sterilization, and other needs of the food industry.

The work establishes the existence of a regular thermal mode in the system “environment (water in an annular volume) — thin cylindrical metal wall — experimental liquid medium”. Milk and whey were chosen as the experimental liquid medium. Heat exchange under conditions of free convection is studied.

It was experimentally established that in the experimental system “environment (water in an annular volume) — thin cylindrical metal wall — experimental liquid medium” there are signs of a regular thermal mode, that is, the constancy of the rate of cooling (heating) of the experimental liquid medium in a thin cylindrical metal vessels; the constancy of the heat transfer coefficient in the process of a regular thermal mode is practically constant; constancy of the coefficient of non-uniformity of temperature distribution.

Using the method of a regular thermal mode, the coefficient of heat transfer to dairy products was determined using the experimental and calculation method.

The coefficient of heat transfer to milk during heating is within 640...700 W/(m²·K), to whey during heating — 710...820 W/(m²·K), to milk whey during cooling — 430...500 W/(m²·K).

Keywords: regular thermal regime, non-stationary heat exchange, cooling rate, heat transfer coefficient, heat exchanger, dairy products.

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