

УДК 536.24:620.92

ОЦІНОЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВІДДАЧІ В ОБЛАДНАННІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Ткаченко С.Й., д-р техн. наук, професор, Румянцева Т. Ю., аспірант,
Пішеніна Н.В., канд. техн. наук
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Запропоновано експрес-метод прогнозування інтенсивності теплообміну в рідинах і сумішах, інформація про теплофізичні властивості яких обмежена. Подано результати числового і фізичного експерименту дослідження рівня інтенсивності конвективного теплообміну в рідинах теплотехнологічних процесів. Наведені оцінки достовірності розробленого методу.

A rapid method has been proposed for the prediction of the intensity of heat transfer in liquids and mixtures, the information on thermal properties is limited. The results of numerical and experimental studies the ratio of the intensity of convective heat transfer in thermal processes has been presented. The estimation of the reliability of the developed method has been presented.

Ключові слова: інтенсивність теплообміну, коефіцієнт тепловіддачі, експериментально-розрахунковий метод, рідина, суміш з невизначеними теплофізичними властивостями.

Вступ. Постановка задачі. Кількісні дослідження не завжди призводять до точного рішення. В багатьох випадках достатньо наближеної оцінки значень величин, суттєвих для поставленого завдання або які характеризують певний процес, і не потрібно шукати способів їх точного визначення. Наприклад, зіставлення оціночних значень коефіцієнтів тепловіддачі утворює підґрунтя для побудови вірної картини розвитку процесу теплообміну в сумішах, рідинах. Такий порівняльний аналіз можна застосувати як метод визначення відносного ступеня впливу різних фізичних ефектів, суттєвих для процесу теплообміну в сумішах. А також, це дозволяє виключити фактори, вплив яких на процес незначний, щоб спростити поставлену задачу [1, 2]

У технологічних процесах різних галузей промисловості (табл.) середовищами, що нагріваються і охолоджуються, є суміші і рідини, в яких закономірності теплообміну достатньо не вивчені, а інформація про їх теплофізичні властивості (ТФВ) обмежена. Для контролю технологічного процесу, покращення показників роботи натурального теплотехнологічного обладнання (НТО) необхідно мати уявлення про інтенсивність процесів теплообміну в конкретних умовах. Велика кількість таких сумішей і рідин ускладнює детальне вивчення процесу на спеціалізованих експериментальних стендах.

Таблиця 1 – Деякі області застосування оціночного методу визначення коефіцієнтів тепловіддачі [3, 4]

Область застосування (промисловість)	Технологічний процес	Робочі речовини
Аграрна (утилізація)	нагрів, охолодження	відходи виробництва сільськогосподарської продукції; гній та стоки тваринницьких ферм.
Алкогільна	пастеризація, нагрів, охолодження	вино, пиво, виноматеріал, мезга, барда, бражка, сусло, вода, спирт, горілка.
Безалкогольна	пастеризація, нагрів, охолодження	мінеральна вода, сік, квас, холодний чай; миючі розчини.
Кондитерська	нагрів та охолодження	шоколад; какао; сироп.
Молочна	пастеризація, нагрів, охолодження	молоко; молочні продукти: вершки, сироватка, йогурт, десерти, суміші для морозива, згущене молоко, кефір, вершкові масла, молочні концентрати, дитяче харчування та ін.
Олійно-жирова	нагрів та охолодження	харчові олії; жирні кислоти.
Цукрова	нагрів	сік: густий, сирий, газований, концентрований; сироп; патока.

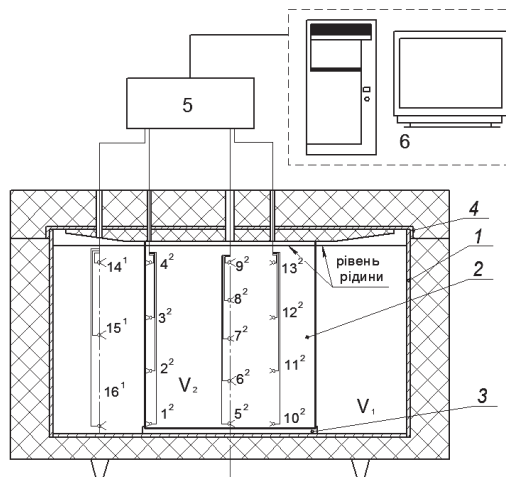
Для забезпечення надійності роботи НТО, діагностики його ефективності у разі переходу на інший вид сировини, рекомендується в процесі проектування застосувати новий розроблений експерименталь-

но-розрахунковий метод (ЕРМ) визначення коефіцієнтів тепловіддачі в складних сумішах [5–7]. ЕРМ включає експериментальні й аналітичні дослідження властивостей натурних рідин процесу теплообміну в них та відповідальних за нього параметрів. У рамках ЕРМ проводиться фізичний базовий експеримент, який дає уявлення про закономірності теплообміну в рідині, суміші.

Оскільки коефіцієнт тепловіддачі в деякій мірі «договірна» величина [2], то важливим для наукових досліджень є визначення границь його значень для встановлених умов теплообміну і режимів руху натурального середовища. Тобто, особливості застосування ЕРМ для різних типів натурних рідин, а також контролювання результатів подальших детальних розрахунків за ЕРМ, потребує попереднього формування уявлень про рівень теплообміну в натурній рідині за допомогою оціночних методів.

Тому метою роботи є розробка експрес-методу прогнозування інтенсивності теплообміну в рідинах і сумішах, інформація про теплофізичні властивості яких обмежена.

Основні дослідження. Спосіб вирішення поставленої мети ґрунтується на гіпотезі, що співвідношення рівнів інтенсивності конвективного теплообміну в рідкому середовищі і в воді залишається при-



1 – зовнішня посудина, грійний теплоносієй вода; 2 – внутрішня посудина, досліджувана натурна суміш; 3 – теплоізоляційна підставка; 4 – кришка; 5 – система «МІРАТ-Т»; 6 – персональний комп'ютер

Рис. 1 – Експериментальна установка для дослідження теплообміну за умов природної конвекції – базовий експериментальний стенд ЕРМ

близно однакового порядку у різних системах, незалежно від їх геометричних параметрів. Але при цьому вид конвекції, температурні напори і температурні режими, тобто умови теплообміну, повинні бути однакові.

Оціночний метод визначення коефіцієнтів тепловіддачі розробляється в рамках ЕРМ. Відповідно до цього зі зразком натурної рідини проводиться фізичний експеримент на базовому експериментальному стенді. Його опис, методика проведення експерименту й обробки результатів наведено у [5, 6]. Висота теплообмінної стінки в експериментальній установці дорівнює 0,108 м. Порівняно з [5, 6] в установці базового стенду ЕРМ для дослідження вільної конвекції модернізовано спосіб вимірювання розподілу температур в робочих об'ємах (рис. 1) шляхом застосування шістнадцяти мідь-константанових термопар і встановлення автоматичної системи «мірат – т» збору й обробки даних, автоматичного запису в пам'ять персонального комп'ютера. Тарувальні дослідження показали, що в базовому стенді ЕРМ реалізується теплообмінний процес за умов вільної конвекції, ламінарний рух рідини біля вертикальної стінки [6].

Згідно з нашою гіпотезою, повинна виконуватись умова наближеної рівності співвідношень коефіцієнтів тепловіддачі

$$\frac{\alpha_{розр}^{води}}{\alpha_{розр}^p} \approx \frac{\alpha_{експ}^{води}}{\alpha_{експ}^p} ; \quad k = \frac{\alpha_{розр}^{води}}{\alpha_{розр}^p} ; \quad n = \frac{\alpha_{експ}^{води}}{\alpha_{експ}^p} , \quad (1)$$

де $\alpha_{розр}^{води}$, $\alpha_{розр}^p$ – коефіцієнти тепловіддачі до води і досліджуваної натурної рідини, відповідно, розраховані за критеріальними рівняннями з використанням довідникових теплофізичних властивостей;

$\alpha_{експ}^{води}$, $\alpha_{експ}^p$ – експериментальні коефіцієнти тепловіддачі до води і натурної рідини, отримані на експериментальній установці (рис. 1).

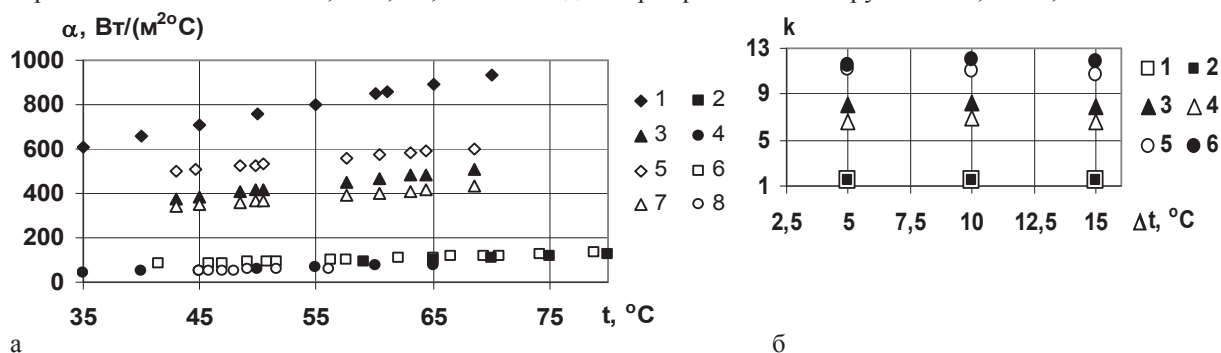
Порівнюючи k і n , які характеризують рівень інтенсивності теплообміну в натурних і базових умовах, відповідно, можна оцінити коефіцієнти тепловіддачі в натурних теплообмінних установках $\alpha_{НТО}^p$, знаючи коефіцієнти тепловіддачі для умов у базовій експериментальній установці (у подальшому – базові

коефіцієнти тепловіддачі) і розрахункові до води $\alpha_{розр.НТО}^{води}$ за умов теплообміну в НТО, визначені за критеріальними рівняннями,

$$\alpha_{НТО}^p = \frac{\alpha_{розр.НТО}^{води}}{m}, \quad \text{за умов } n \approx k \text{ приймаємо } m = n. \quad (2)$$

Розглянемо інтенсивність теплообміну за умов вільної конвекції. Для числового і базового експериментів вибрано рідини: вода, гліцерин безводний, соняшникова олія рафінована, цукровий розчин концентрацією 40, 60, 70%, для яких ТФВ досліджені. В прикладі оцінки коефіцієнтів тепловіддачі вони фігурують як натурні рідини з невизначеними теплофізичними властивостями. А їх довідникові теплофізичні параметри [8–9] використовуються для перевірки надійності запропонованого нами методу.

Розрахункові $\alpha_{розр}^p$ і коефіцієнти k визначались для наступних натурних умов теплообміну (рис. 2): вільна конвекція у великому об'ємі, ламінарний рух біля вертикальної стінки, турбулентний рух біля вертикальної стінки, вільна конвекція біля горизонтальної труби, при цьому $\bar{\Delta t}$ прийнято 5, 10, 15°C. Визначальні температури змінювалися в межах $t_p = 35 \dots 80^\circ\text{C}$. Визначальні геометричні параметри: висота вертикальної стінки – $H = 0,1 \dots 2,5$ м, зовнішній діаметр горизонтальної труби $d_z = 0,05 \dots 0,1$ м.



а) коефіцієнти тепловіддачі для натурних умов теплообміну, розраховані за критеріальними рівняннями із застосування довідникових ТФВ; $\bar{\Delta t} = 10^\circ\text{C}$;

умови теплообміну: 1–4 вільна конвекція біля вертикальної стінки, турбулентний рух, $H = 0,5 \dots 2,5$ м; 5–8 вільна конвекція біля горизонтальної труби, $d_z = 0,05$; 1, 5 – вода; 2, 6 – гліцерин;

3, 7 – цукровий розчин, масова концентрація 40%; 4, 8 – соняшникова олія; б) співвідношення розрахункових коефіцієнтів тепловіддачі, $\bar{\Delta t} = 5, 10, 15^\circ\text{C}$;

1, 3, 5 – вільна конвекція біля вертикальної стінки, турбулентний рух;

2, 6 – вільна конвекція біля горизонтальної труби;

4 – вільна конвекція біля вертикальної стінки, ламінарний рух;

1, 2 – цукровий розчин, масова концентрація 40%;

3, 4 – гліцерин; 5, 6 – соняшникова олія

Рис. 2 – Результати числового експерименту

Базовий експеримент проводився на установці рис. 1 із вибраними натурними рідинами і гліцерин-ом-сирцем. Гліцерин-сирець це складна гетерогенна система, до складу якої входять домішки різного походження, які знаходяться в розчинному та колоїдно-розчинному стані, а також у вигляді емульсій [8–10]. ТФВ гліцерина-сирця в такому складі не досліджені. Умови теплообміну: діапазон зміни температурних напорів між стінкою і натурною рідиною $\bar{\Delta t} = 8 \dots 20^\circ\text{C}$; визначальні осереднені температури натурних рідин змінювались в межах $t_p = 30 \dots 65^\circ\text{C}$ (рис. 3). Коефіцієнти переходу k і n (рис. 4) порівнювались за сталих умов – характерні температури і температурні напори однакові, геометричні параметри теплообмінної поверхні однакові.

Результати числового експерименту показали, що зі зміною геометричних параметрів системи для прийнятих натурних умов теплообміну $\alpha_{розр}^p$ змінюється від 7...28,5%, вплив $\bar{\Delta t}$ на величину k незначний – 4...7% (рис. 2). Також визначено вплив зміни геометричних параметрів на співвідношення рівнів інтенсивності теплообміну, k змінюється в межах 5%...15% (рис. 2). Із числових досліджень (рис. 2) можна зробити висновок, що при різних геометричних факторах і величинах температурного напору співвідношення між рівнем інтенсивності теплообміну у воді і досліджуваних рідинах залишається приблизно однаковим. Отже, оціночний спосіб визначення $\alpha_{НТО}^p$ (2) підтверджується.

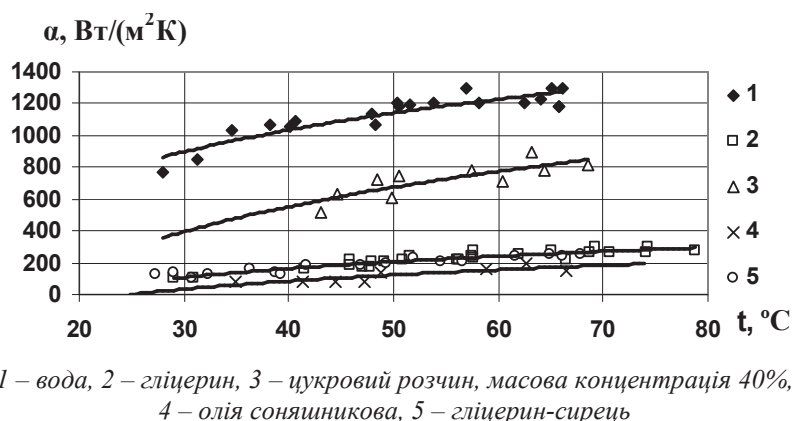
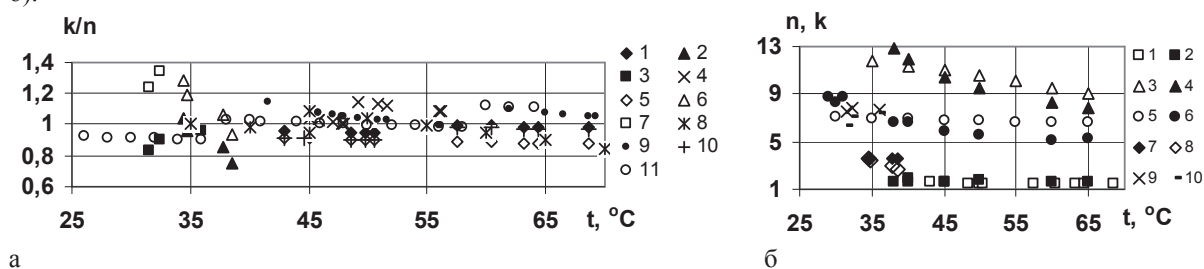


Рис. 3 – Експериментальні коефіцієнти тепловіддачі (приведені до $\bar{\Delta t}=10^\circ\text{C}$):

Застосування запропонованого методу покажемо на прикладі для $\bar{\Delta t}=10^\circ\text{C}$. За результатами базового експерименту визначено діапазон зміни n для $t_p=30\dots65^\circ\text{C}$ (рис. 3): гліцерин $n=7,8\dots5,9$; соняшникова олія $n=11,6\dots10,1$; цукровий розчин концентрація 40% $n=1,6\dots1,45$; концентрація 60% $n=3,2\dots3,0$; концентрація 70% $n=6,9\dots6,7$.

Виконано порівняння отриманих експериментально коефіцієнтів n з розрахунковими k (рис. 4, а), яке показало, що розбіжність між ними до $\pm 15\%$. Встановлено залежність зміни n і k від температури (рис. 4, б).



а) 1–4 – k розраховано за умов вільної конвекції біля вертикальної стінки $H=0,5\dots2,5$ м, турбулентний рух; 5–9 – k розраховано за умов вільної конвекції біля горизонтальної труби $d_z = 0,05\dots0,1$ м; 10, 11 – k розраховано за умов вільної конвекції біля вертикальної стінки $H=0,1\dots0,5$ м, ламінарний рух; для цукрового розчину з масовою концентрацією 1, 5, 10 – 40%, 2, 6 – 60%, 3, 7 – 70%, 4, 8 – олії соняшникової, 9, 11 – гліцерин;
б) закономірність зміни n і k зі зміною температури: 1, 3, 5, 7, 9 – розрахункові k ; 2, 4, 6, 8, 10 – експериментальні n ; 1, 2 – цукровий розчин концентрація 40%; 3, 4 – олія соняшникова; 5, 6 – гліцерин; 7, 8 і 9, 10 – цукровий розчин, концентрація 60% і 70%, відповідно.

Рис. 4 – Зіставлення експериментальних n і розрахункових k співвідношень (1)

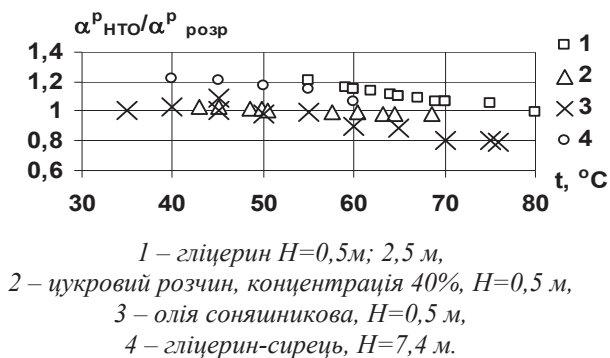


Рис. 5 – Перевірка запропонованого методу, вільна конвекція біля вертикальної стінки, $\bar{\Delta t}=10^\circ\text{C}$

Коефіцієнти тепловіддачі в НТО $\alpha_{НТО}^p$ оцінюємо за (2), знаючи розрахункові значення коефіцієнтів тепловіддачі для води за натурних умов теплообміну $\alpha_{розр.НТО}^{води}$. Дослідження (рис. 2 – 4) показали, що експериментальні і розрахункові співвідношення $n \approx k$, а отже, для оцінки $\alpha_{НТО}^p$ приймаємо в (2), що $m = k$. Зіставлення коефіцієнтів тепловіддачі, оцінених за запропонованим методом (рис. 5) із розрахунковими показало, що очікуваний діапазон коливання оцінених $\alpha_{НТО}^p$ не перевищує $\pm 10\dots15\%$. За-

пропонований метод використано для оцінок можливих коефіцієнтів тепловіддачі для гліцерину-сирця, натурні умови теплообміну – вільна конвекція біля вертикальної стінки висотою $H=7,4$ м, турбулентний рух. Теплофізичні властивості гліцерину-сирця не досліджені, порівняння оцінених $\alpha_{НТО}^p$ (рис. 5) проводилось із коефіцієнтами тепловіддачі, визначеними за ЕРМ [6], розбіжність не перевищує 20%.

Натурні умови теплообміну були вибрані згідно реального обладнання, що використовується у технологічному процесі виробництва гліцерину-дистиляту: резервуарів для нагріву, термостабілізації і зберігання гліцерину-сирця і гліцерину-дистиляту.

Незважаючи на те, що в базовій експериментальній установці реалізується теплообмін за умов ламінарного руху вздовж вертикальної стінки граничного шару, а у НТО – вільна конвекція, турбулентний рух вздовж вертикальної стінки та біля горизонтальної труби, виявилось можливим оцінити коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_{НТО}^p$ використовуючи запропонований спосіб.

Висновки

Дослідження теплообміну в рідинах, теплофізичні властивості яких прийнято умовно невідомими для демонстрації оціночного метода і відомими на етапі підтвердження достовірності метода, показали, що розбіжність результатів по коефіцієнтах тепловіддачі, одержаних запропонованим методом і традиційним, не перевищує 10 – 15%.

Розбіжність значень коефіцієнтів тепловіддачі, визначених експрес-аналізом і експериментально-розрахунковим методом для гліцерину-сирця (теплофізичні властивості невідомі) знаходяться в межах 20%.

Отже, запропонований оціночний метод дозволить виконувати експрес-аналіз рівня інтенсивності теплообміну в рідких середовищах теплотехнологічної системи, визначати рівень тепловіддачі в обладнанні під час технологічного процесу, а також підсилити контроль достовірності розрахунків із застосуванням експериментально-розрахункового метода.

Література

1. Гухман А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена / А. А. Гухман Изд. 2-е переработ. и дополн. – М.: «Высшая школа», 1974. – 128 с.
2. Исаченко В. П. Теплопередача : учебн. для вузов / В. П. Исаченко [и др.]. – [3-е изд. доп.]. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
3. Плаксин Ю. М. Процессы и аппараты пищевых производств / Ю. М. Плаксин, Н. М. Малахов, В. А. Ларин. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: КолосС, 2007. – 760 с.
4. Чубик И. А. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов / И. А. Чубик, А. М. Маслов. – М.: Пищевая промышленность, 1970. – 184 с.
5. Пішеніна Н. В. Теплообмін в складних сумішах в умовах природної конвекції / Н. В. Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 2011. — № 2. — С. 124—131.
6. Ткаченко С. Й. Застосування поняття «модельна рідина» в експериментально-розрахунковому методі // С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 3. — С. 103—110. — ISSN 1997-9266.
7. Патент України на винахід № 97021, (51) МПК (2006.01) G01N 25/18. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші / Ткаченко С. Й., Пішеніна Н. В., Резидент Н. В; заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. — № а201005661; заявл. 11.05.2010; опубл. 26.05.2011, Бюл. № 2.
8. Товбин И. М. Технологическое проектирование жироперерабатывающих предприятий / И. М. Товбин, Е.Е. Файенберг – М.:Пищевая промышленность, 1965 г. – 515 с.
9. Арутюнан Н.С. Технология переработки жиров / Н.С. Арутюнан, Е. А. Аришева и др. – М.: Агропромиздат, 1985 г. – 367 с.
10. Рахманкулов Д. Л. Физические и химические свойства глицерина / Д. Л. Рахманкулов, Б. Х. Кисманов, Р. Р. Чанышев. – М.: Химия, 2003 – 199 с.