

С. Й. Ткаченко, д-р. техн. наук, проф.; Н. В. Пішеніна, асп.

ЗАСТОСУВАННЯ ПОНЯТТЯ «МОДЕЛЬНА РІДИНА» В ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВОМУ МЕТОДІ

Удосконалено спосіб визначення інтенсивності теплообміну в складних рідинах та сумішах органічного походження з обмеженою інформацією по теплофізичним властивостям за рахунок уточнення меж застосування «модельної рідини» та переходу від поняття «модельна рідина» до «частково-модельна рідина».

Вступ та постановка задачі

Експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) [1] дозволяє виконувати розрахунок інтенсивності теплообміну до складних рідин та сумішей, інформація по теплофізичним властивостям (ТФВ) яких обмежена (в подальшому – натурна суміш). ЕРМ відноситься до непрямих методів визначення (оцінювання) ТФВ речовини [2].

В результаті виконання експериментальної частини ЕРМ визначаємо експериментальний коефіцієнт тепловіддачі в базовому режимі $\alpha_{\text{експ}}^{\text{б}}$ та комплекс фізичних властивостей в базовому режимі теплообміну $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$ через $\alpha_{\text{експ}}^{\text{б}}$ для зразка натурної суміші або рідини. «Базовим» називається режим теплообміну, який здійснюється на базовій експериментальній установці – вільна конвекція у «великому» об'ємі, ламінарна течія [1, 2]. Визначаючи $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$, враховується поправка на напрям теплообміну $(\text{Pr}_p/\text{Pr}_{\text{ст}})^{0,25}$ [1].

З використанням отриманого $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$ здійснюється розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі для інших, «шуканих», режимів та умов $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$ – вимушений рух в круглих трубах та кільцевих каналах; вільна конвекція біля вертикальної стінки, турбулентний рух тощо. Для цього враховується поправка переходу із «базового» режиму в «шуканий» $\text{П}_{\text{б-ш}}$ з визначенням $\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}$ [1].

Поправки на напрям теплообміну $(\text{Pr}_p/\text{Pr}_{\text{ст}})^{0,25} = f(\overline{\Delta t})$ та переходу в «шуканий» режим $\text{П}_{\text{б-ш}}$ авторами рекомендується визначати за емпіричними залежностями, які отримані на основі відомих теплофізичних властивостей та розрахункових комплексів $[\text{КФВ}_6^{\text{розр}}]_{\text{м}}$ таких рідин, для яких ТФВ достатньо досліджені: цукровий розчин, мелясна барда, соапсток, послід курей, субстрат великої рогатої худоби (ВРХ) [1]. Ці рідини отримали назву «модельні рідини».

Таким чином, базовий експеримент проведено і отримано $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$ для таких натурних сумішей: субстрати ВРХ, свиней, курей, вологістю 90...94 %. Похибка між визначеними експериментально $\alpha_{\text{експ}}$ коефіцієнтами тепловіддачі і за допомогою ЕРМ $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ становить $\pm 35\%$, а в окремих випадках у детальніших дослідженнях теплообміну дорівнює $\pm 50...60\%$ [1]. При цьому, густина ρ натурної суміші, теплоємність C_p , коефіцієнт температурного розширення β , $\alpha_{\text{експ}}^{\text{б}}$ та $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$ – визначались експериментально на базовому експериментальному стенді, виконувалась наближена оцінка значень поправок $(\text{Pr}_p/\text{Pr}_{\text{ст}})^{0,25}$ за допомогою ТФВ «модельних рідин», границі режимів теплообміну визначались гіпотетично.

Точність, надійність метода можна підвищити розширенням області досліджень, удосконаленням методів дослідження та базового експерименту, врахування різних факторів, що дозволить зменшити обмеження застосування цього методу.

Подальше дослідження ЕРМ [3, 4] дало змогу коректнішого вибору модельної рідини і визначення її параметрів. Суть удосконалення в тому, що для вибору модельної рідини обов'язковим є виконання двох умов: умова рівності експериментального комплексу фізичних властивостей натурної суміші і розрахункового комплексу «модельної рідини» $KФВ_6^{експ} \cong [KФВ_6^{розра}]_M$; умова рівності температури «модельної рідини» і температури шуканого режиму $t_M \approx t_{шук}$.

За дотриманням цих умов визначається «модельна рідина», її концентрація c_M , %, за якої вважається, що теплофізичні властивості «модельної рідини» ідентичні теплофізичним властивостям натурної суміші. Розрахунок поправок $П_{б-ш}$, $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$ та визначення границь режимів теплообміну здійснювався за допомогою ТФВ конкретної вибраної «модельної рідини». Розбіжність між $\alpha_{експ}$ і $\alpha_{ЕРМ}$ становить $\pm 10\%$ [3, 4]. При цьому густина ρ , теплоємність C_p , $\alpha_{експ}^6$ та $KФВ_6^{експ}$ натурної суміші – визначались експериментально на базовому експериментальному стенді. Перелік використаних потенційних «модельних рідин»: вода; цукровий розчин, $c_M = 10...70\%$; мелясна барда, $c_M = 10; 30,6; 49,1\%$; гліцерин; водний розчин гліцерину, $c_M = 50\%$; етиленгліколь; трансформаторне масло; мазут Ф12; машинне масло; ракетне паливо; томатний сік $c_M = 4...10\%$; яблучний сік, $c_M = 10...70\%$.

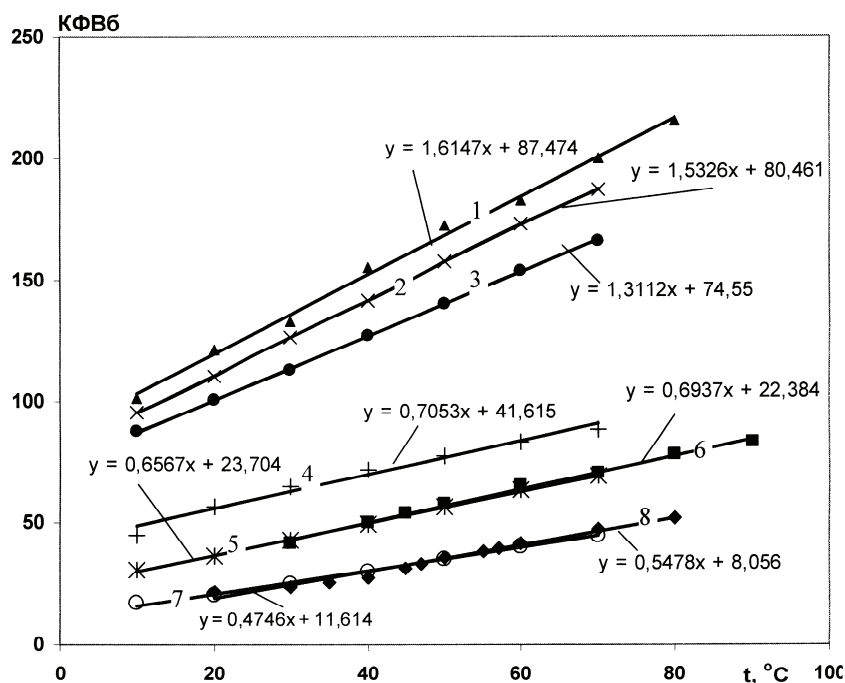


Рис. 1. Апроксимація залежностей $[KФВ_6^{розра}]_M = b_M \cdot t + a$ для деяких потенційних «модельних рідин»:

1, 6, 8 – цукровий розчин, $c = 10, 60, 70\%$, відповідно; 2, 3, 5, 7 – яблучний сік, $c = 10, 20, 60, 70\%$, відповідно; 4 – томатний сік, $c = 4\%$

В результаті апроксимування теоретичних залежностей лінійного виду $[KФВ_6^{розра}]_M = f(t)$ рівнянням типу $[KФВ_6^{розра}]_M = b_M \cdot t + a$ для кожної потенційної «модельної рідини» в діапазоні температур $10...70\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1), виділено коефіцієнт b_M , який характеризує закономірність зміни $[KФВ_6^{розра}]_M$ від температури. Коефіцієнти b_M змінюються в діапазоні $0,1...1,5$. За визначеними b_M розподілено двадцять шість потенційних «модельних рідин» на шість класів (груп) за принципом $b_{M1} \approx b_{M2} \approx \dots \approx b_{Mn}$.

З розширенням області досліджень, переліку натурних рідин та сумішей, виявлено, що проведене удосконалення не завжди забезпечує розбіжність між $\alpha_{експ}$ і $\alpha_{ЕРМ}$ в межах $\pm 10\%$. Ця розбіжність в окремих випадках досягає $\pm 25...45\%$. Подальші дослідження умов рівності

$\text{КФВ}_6^{\text{експ}} \cong \left[\text{КФВ}_6^{\text{розр}} \right]_{\text{М}}$ та $t_{\text{М}} \approx t_{\text{шук}}$ показали, що при виборі «модельних рідин» забезпечується розбіжність між $\alpha_{\text{експ}}$ і $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ вказаних межах в тому випадку, коли натурна суміш і «модельна рідина» відносяться до одного класу рідин [5].

Тобто, для вибору «модельної рідини» крім цих двох умов, необхідно виконання третьої умови рівності коефіцієнтів $b_{\text{сум}}$ натурної суміші та модельної рідини $b_{\text{М}}$, $b_{\text{сум}} \approx b_{\text{М}}$, в рівняннях $\text{КФВ}_6^{\text{експ}} = b_{\text{сум}} \cdot t + a$, $\left[\text{КФВ}_6^{\text{розр}} \right]_{\text{М}} = b_{\text{М}} \cdot t + a$.

Отже, застосування «модельних рідин» в ЕРМ для прогнозування всіх теплофізичних властивостей натурної суміші має суттєве обмеження, тому що кількість рідин, які можуть виступати в ролі «модельних», обмежена і не завжди з достатньою точністю можна підібрати «модельну рідину» однакового класу з досліджуваною натурною рідиною.

Таким чином, подальшим напрямом розвитку ЕРМ є уточнення методу врахування поправки $\left(\text{Pr}_p / \text{Pr}_{\text{ст}} \right)^{0,25}$ на початковому етапі ЕРМ для визначення залежності $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}(t)$. При цьому, необхідно формувати такі вимоги до «модельної рідини», щоб не виникало обмежень при застосуванні її ТФВ для ЕРМ в реальних умовах.

Мета роботи – підвищення точності і надійності ЕРМ за рахунок коректнішого визначення $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$ рідини з обмеженою інформацією по теплофізичним властивостям, границь режимів теплообміну в базовому експерименті і в натурних умовах, поправки при переході від $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$ до $\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}$, шляхом уточнення меж застосування поняття «модельна рідина» з урахуванням обмеження кількості потенційних «модельних рідин».

Основні дослідження

Авторами висунуто гіпотезу: за допомогою ТФВ «модельної рідини» вирішувати не всі поставлені задачі (визначення поправок $\left(\text{Pr}_p / \text{Pr}_{\text{ст}} \right)^{0,25}$, $\Pi_{6\text{-ш}}$, режимів теплообміну в базовому експерименті і в натурних умовах), а обмежити використання «модельної рідини» лише визначенням поправок на напрям теплообміну $\left(\text{Pr}_p / \text{Pr}_{\text{ст}} \right)^{0,25}$ в базовому і шуканому режимах. При цьому до базового експерименту додати експеримент з визначення в'язкості натурної суміші $\nu_0(t_0)$ при температурі навколишнього середовища, і, використовуючи експериментальні значення $\alpha_{\text{експ}}^6$, ρ , C_p , $\nu_0(t_0)$, оцінити залежність $\nu(t)$, значення λ , коефіцієнта температурного розширення β натурної суміші, за якими здійснювати оцінювання режимів теплообміну та визначення поправки переходу $\Pi_{6\text{-ш}}$. А для визначення коефіцієнтів тепловіддачі в базовому $\alpha_{\text{експ}}^6$ і шуканому $\alpha_{\text{експ}}^{\text{ш}}_{\text{експ}}$ режимах застосовувати реструктуровані рівняння [3, 4]

$$\alpha_{\text{експ}}^6 = C \cdot \text{КФВ}_6^{\text{експ}} \underbrace{\left[g^{0,25} \bar{\Delta} t_6^{0,25} H_6^{-0,25} \right]}_{\Pi_6} \left(\frac{\text{Pr}_p}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)_6^{0,25}; \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{експ}}^{\text{ш}} = C \underbrace{\left(\Pi_{6\text{-ш}} \text{КФВ}_6^{\text{експ}} \right)}_{\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}} \underbrace{\left[g^{n_1} \omega^{n_2} \bar{\Delta} t^{n_3} \right]}_{\Pi_{\text{ш}}} \left(\frac{\text{Pr}_p}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)_{\text{ш}}^{0,25}, \quad (1a)$$

де C – константа критеріального рівняння, яке відповідає режиму теплообміну; $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$ – експериментальний комплекс фізичних властивостей базового режиму теплообміну для натурної рідини; Π_6 – множник, який враховує визначальний геометричний параметр базової експериментальної установки H_6 та температурний напір $\bar{\Delta} t_6 = \bar{t}_{\text{ст}} - \bar{t}_p$; g – прискорення вільного падіння, м/с²; $\left(\text{Pr}_p / \text{Pr}_{\text{ст}} \right)^{0,25}$ – поправка на напрям теплообміну; Pr_p – критерій

Прандтля для рідини за температурою рідини; $Pr_{ст}$ — критерій Прандтля за температурою стінки; $\Pi_{ш}$ — множник, який враховує визначальний геометричний параметр l , температурний напір $\bar{\Delta t}$ в натурних умовах (шуканому режимі); w — визначальна швидкість, м/с; $n_1...n_4$ — показники степеня.

Також вважаємо, що основою рівнянь (1), (1а) має бути $K\Phi B_6^{експ}$, тому що інтенсивність теплообмінних процесів надійніше визначати через спеціалізований комплекс $K\Phi B_6^{експ}$ для конкретної натурної суміші, структура якого отримана з відомих критеріальних рівнянь, і який відбиває вплив не тільки окремих теплофізичних параметрів, але їх сукупності, що дозволяє більш обґрунтовано визначати фізичні зв'язки в досліджуваному процесі [3, 4]

$$K\Phi B_6^{експ} = \frac{\alpha_6^{експ}}{СП \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)_6^{0,25}} \quad (2)$$

Для в'язких рідин $\left(Pr_p/Pr_{ст} \right)^{0,25}$ суттєво впливає на значення коефіцієнта тепловіддачі. Числові дослідження показали, що при $\bar{\Delta t} > 5...10$ °С врахування поправки $\left(Pr_p/Pr_{ст} \right)^{0,25}$, визначеної за теплофізичними властивостями води, призводить до похибки розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі α до гліцерину (20...30 %), порівняно з варіантом, коли, поправка $\left(Pr_p/Pr_{ст} \right)^{0,25}$ визначена за теплофізичними властивостями гліцерину, для тих же умов теплообміну.

Авторами запропоновано метод визначення $K\Phi B_6^{експ}$, який передбачає уточнення поправки на напрямок теплообміну $\left(Pr_p/Pr_{ст} \right)^{0,25}$ методом послідовних наближень з використанням ТФВ «частково-модельної» рідини, який полягає в такому. За допомогою експериментальної установки для дослідження тепловіддачі за умов вільної конвекції проводять n ($n_{\min} = 2$) серій дослідів базового експерименту по теплообміну в цій органічній суміші, інформація по теплофізичним властивостям якої обмежена, визначають $\alpha_{експ}$ для кожної серії дослідів. Розраховують n комплексів фізичних властивостей за рівнянням (2) в першому наближенні $\left[K\Phi B_6^{експ} \right]_1^I \dots \left[K\Phi B_6^{експ} \right]_n^I$ та отримують залежність $\left[K\Phi B_6^{експ} \right]^I = f(\bar{t})$. При цьому поправку $\left(Pr_p/Pr_{ст} \right)^{0,25}$ розраховують за температурами \bar{t}_c та \bar{t}_0 з використанням теплофізичних властивостей води. Із отриманої залежності для цієї органічної суміші $\left[K\Phi B_6^{експ} \right]^I = f(\bar{t})$ визначають комплекс фізичних властивостей для рідини за температурами стінки \bar{t}_c — $\left[K\Phi B_6^{експ} \right]_c^I$ та рідини \bar{t}_0 — $\left[K\Phi B_6^{експ} \right]_0^I$ для кожної групи дослідів.

Проводиться аналіз попередньо побудованих графічних залежностей критерію Прандтля від розрахункового комплексу фізичних властивостей $Pr_{ч-м} = f\left(\left\{ K\Phi B_6^{розр} \right\}_{ч-м} \right)$ для «частково-модельних рідин», теплофізичні властивості яких достатньо досліджені (рис. 2). Для цього діапазону $\left\{ \left[K\Phi B_6^{експ} \right]_p^I \dots \left[K\Phi B_6^{експ} \right]_{ст}^I \right\}$ вибираємо «частково-модельну рідину», за теплофізичними властивостями якої визначаємо поправку на напрямок теплообміну для подальшого наближення. Подальше уточнення $\left(Pr_p/Pr_{ст} \right)^{0,25}$ і розрахунок $K\Phi B_6^{експ}$ із $\alpha_{експ}$ виконують до поки розбіжність між значеннями $K\Phi B_6^{експ}$ попереднього і наступного наближення складатиме не більше ніж 3 %. Значення $K\Phi B_6^{експ}$ останнього наближення вважають достатніми.

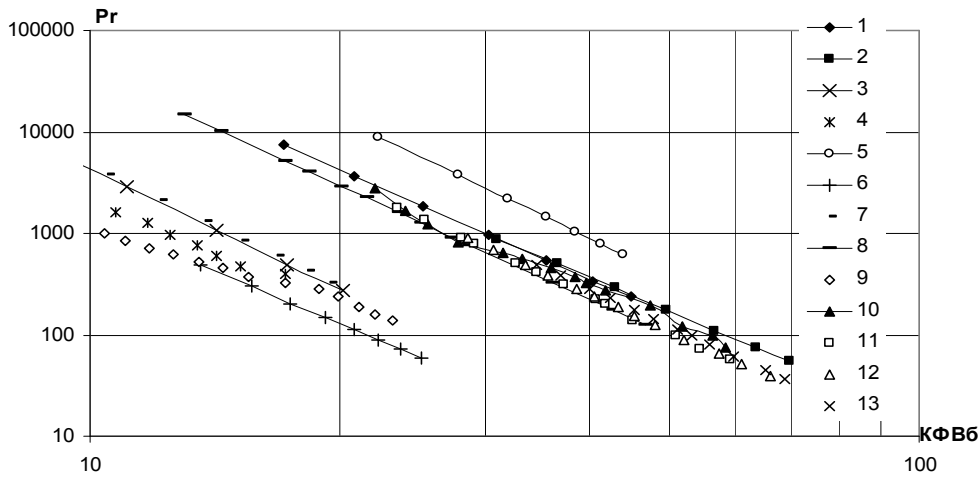


Рис. 2. Залежність критерію Прандтля від розрахункового комплексу фізичних властивостей $KФВ_6^{розр}$ для різних «частково-модельних» рідин: 1 – яблучний сік концентрації $c = 70\%$; 2 – яблучний сік, $c = 60\%$; 3 – машинне масло; 4 – мазут; 5 – томатний сік, $c = 10\%$; 6 – трансформаторне масло; 7 – масло МС-20; 8 – гліцерин, $c = 100\%$; 9 – соняшникова олія; 10 – цукровий розчин, $c = 70\%$; 11, 12, 13 – гліцеринова вода, $c = 90; 85; 80\%$

Перевірка цього способу врахування поправки $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$ показана на рис. 3. З рисунку випливає, що це припущення дає похибку $\pm 3...5\%$, що допустимо.

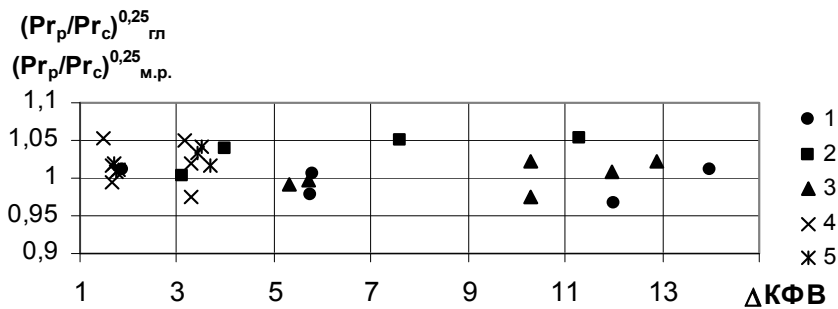


Рис. 3. Зіставлення значень поправки на напрям теплообміну розрахованої для гліцерину з поправками, розрахованими за однакових умов для «частково-модельних» рідин: 1 – цукровий розчин; 2 – томатний сік; 3 – яблучний сік; 4 – масло МС-20; 5 – мазут

Приклад застосування запропонованої методики та принцип визначення $KФВ_6^{експ}$ за температурами рідини та стінки, із використанням побудованої залежності, показано на рис. 4. За рідину з обмеженою інформацією по теплофізичним властивостям умовно приймаємо гліцерин, концентрація $c = 100\%$. Кількість груп дослідів базового експерименту дорівнює $n = 4$; середня визначальна температура досліджуваної рідини (гліцерину) для кожного досліду дорівнює $t_p = 25; 35; 55; 65\text{ }^\circ\text{C}$; середній температурний напір між стінкою і рідиною дорівнює $\Delta t = 25\text{ }^\circ\text{C}$.

Після проведення останнього наближення $KФВ_6^{експ}$, визначеного по ТФВ гліцерину в результаті числово-

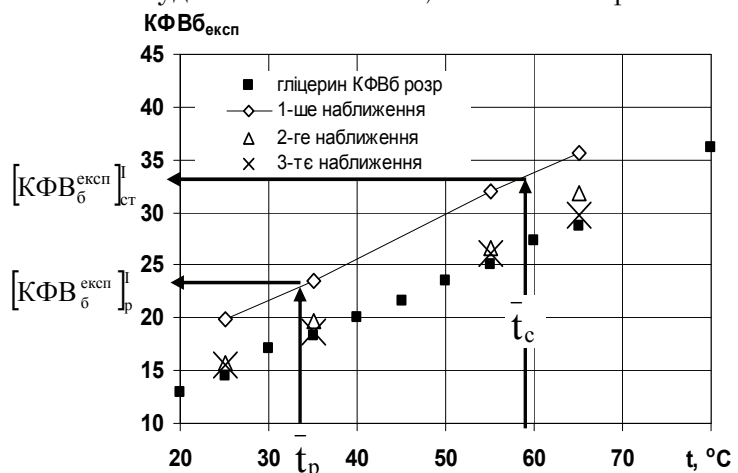


Рис. 4. Визначення $KФВ_6^{експ}$ методом послідовних наближень

го експерименту, і $\text{КФВ}_{\text{розр}}$ збігаються з точністю $\pm 3\%$ (рис. 4). При цьому «частково-модельними» рідинами вибрано яблучний сік $c = 70\%$, трансформаторне масло.

Визначена залежність комплексу $\text{КФВ}_6^{\text{експ}} = f(\bar{t})$, характеризує закон зміни ТФВ досліджуваної рідини від температури

$$\text{КФВ}_6^{\text{експ}} = \underbrace{C_p^{n1} \rho^{n2} \beta^{n3}}_A \underbrace{\lambda^{n4} \nu^{n5}}_B = f(\bar{t}), \quad (3)$$

де $n1...n4$ – показники степеня, що відповідають режиму теплообміну в базовій експериментальній установці.

За допомогою експериментального стенду в системі ЕРМ можна визначити залежність середньої теплоємності від температури $\bar{C}_p^{\text{експ}} = f(\bar{t})$ з точністю $\pm 1...3\%$ [6]. Визначення залежності густини від температури $\bar{\rho}^{\text{експ}} = f(\bar{t})$ та оцінювання коефіцієнта температурного розширення $\beta(\bar{t})$ в цьому проміжку температур здійснюється в звичайних лабораторних умовах методом зважування або за допомогою ареометра.

Визначення залежностей теплопровідності та коефіцієнта кінематичної в'язкості від температури рідин необхідно проводити на високоточних приладах з термостатуванням [5, 7]. Але конструкції таких приладів та принципи вимірювання не пристосовані для дослідження властивостей багатозфазних рідин та сумішей органічного походження зі складною структурою та реологією. Наприклад, для дослідження ν натурних речовин відомими методами основними складнощами є наявність твердих включень та колоїдних частин, які можуть осаджуватись або прилипати до виконавчих елементів приладів, що може спричинити виведення з ладу обладнання.

Таким чином, на основі зазначеного, в рівнянні (3) можна виділити комплекси А і В. Комплекс А містить ТФВ, які можна оцінити на базовій експериментальній установці, В – ТФВ, які потрібно визначати іншими методами. Для оцінювання границь режимів теплообміну при вільній та вимушеній конвекції необхідно визначити діапазон зміни ν досліджуваної рідини.

Авторами запропоновано удосконалення способу визначення інтенсивності теплообміну в складних рідинах і сумішах органічного походження, а також дослідження їх теплофізичних властивостей за допомогою ЕРМ. Цей спосіб дозволяє визначити (якісно оцінити) ТФВ досліджуваної натурної рідини в конкретному інтервалі температур на основі залежності $\text{КФВ}_6^{\text{експ}} = f(\bar{t})$, який полягає в такому.

1. Проводимо базовий експеримент з визначення комплексу фізичних властивостей в базовому режимі. В результаті базового експерименту визначаємо дві точки, отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} \text{КФВ}_{\sigma_1}^{\text{експ}} = f(\bar{t}_1) = \underbrace{C_{p1}^{n1} \rho_1^{n2} \beta_1^{n3}}_{A_1} \underbrace{\lambda_1^{n4} \nu_1^{n5}}_{B_1}; \\ \text{КФВ}_{\sigma_2}^{\text{експ}} = f(\bar{t}_2) = \underbrace{C_{p2}^{n1} \rho_2^{n2} \beta_2^{n3}}_{A_2} \underbrace{\lambda_2^{n4} \nu_2^{n5}}_{B_2}. \end{cases} \quad (4)$$

За умови, що значення комплексів A_1 та A_2 відомі, система рівнянь (4) перетворюється так:

$$\begin{cases} \lambda_1^{n4} \nu_1^{n5} = B_1; \\ \lambda_2^{n4} \nu_2^{n5} = B_2. \end{cases} \quad (5)$$

2. У зв'язку з тим, що теплопровідність рідин незначно змінюється зі зміною температури [5, 7], беремо, що $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \lambda_0$. В результаті перетворень із (5) отримуємо рівняння

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1/n5} \cong \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad (6)$$

де μ_1, μ_2 — динамічна в'язкість рідини при температурах t_1, t_2 , відповідно.

3. Використовуючи залежність $\mu_2 = \mu_1 \cdot e^{-\beta_0(t_2-t_1)}$, де β_0 — показник степеня [8], із рівняння (6) маємо:

$$\left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1/n_5} = e^{\beta_0 \cdot (t_2-t_1)}, \quad (7)$$

звідки знаходимо рівняння визначення показника степеня для конкретної досліджуваної рідини:

$$\beta_0 = \ln \left[\left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1/n_5} \right] \frac{1}{t_2-t_1}. \quad (8)$$

Таким чином, за допомогою залежності $\text{КФВ}_6^{\text{експ}} = f(\bar{t})$ можна оцінити закономірність зміни в'язкості досліджуваної рідини від температури.

4. Проводимо додатковий експеримент з визначення кінематичної в'язкості ν_0', ν_0'' при температурах t_0', t_0'' , відповідно.

5. За результатами базового експерименту — залежність $\text{КФВ}_6^{\text{експ}} = f(\bar{t})$, та результатами додаткового експерименту — залежність $\nu_0 = f(t_0)$, визначаємо із рівняння (3) середній коефіцієнт теплопровідності досліджуваної $\bar{\lambda}_0(t_0)$ в проміжку температур t_0', t_0'' .

6. Маючи значення $\nu_0; \bar{\lambda}_0$, закономірності зміни в'язкості, теплоємності, густини від температури, визначаємо ТФВ для досліджуваної рідини в цьому діапазоні температур.

7. Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в іншому (шуканому) режимі теплообміну $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$, відповідно до ЕРМ, визначаємо комплекс фізичних властивостей для шуканого режиму $\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}$. Для цього використовуємо поправку на теплофізичні властивості у разі переходу від базового режиму — до шуканого $\text{П}_{6-\text{ш}}$, яка відповідає критеріальному рівнянню для певного шуканого режиму (1а). $\text{П}_{6-\text{ш}}$ розраховуємо за реальними теплофізичними властивостями досліджуваної рідини, а $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$ отримуємо за допомогою базового експерименту [3].

Наприклад, для переходу із базового режиму до режиму теплообміну у разі вільної конвекції у «великому» об'ємі біля горизонтальної труби, турбулентний рух $\text{П}_{6-\text{ш}}$ визначається за формулою [3]

$$\text{П}_{6-\text{ш}} = \frac{(\beta_p C_p \rho_p)^{0,08}}{(\lambda_p \nu_p)^{0,08}}; \quad (9)$$

для переходу в режим теплообміну у разі вимушеної конвекції в трубах і кільцевих каналах, в'язкісно-гравітаційна течія [3]

$$\text{П}_{6-\text{ш}} = \frac{\nu_p^{0,15} \beta_p^{-0,15}}{\lambda_p^{0,18}} (C_p \cdot \rho_p)^{0,18}. \quad (10)$$

Із (1а, 9, 10) видно, що ν_p та λ_p , значення яких оцінено за допомогою ЕРМ незначно впливають на величину $\text{П}_{6-\text{ш}}$, а основною визначальною величиною у розрахунку $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$ є комплекс фізичних властивостей $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$, отриманий в результаті базового експерименту в системі ЕРМ.

Беремо гліцерин дистилат, ТФВ якого відомі, як рідину з обмеженою інформацією за ТФВ. Коефіцієнт тепловіддачі визначаємо двома методами: за наведеним вище способом з використанням ЕРМ — $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ та традиційним, із застосуванням критеріальних рівнянь, як для рідини з відомими ТФВ — $\alpha_{\text{розр}}$. Для визначення $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ $\nu_0(t_0)$ взято за таблицями ТФВ гліцерину [9]. Розбіжність результатів зіставлення коефіцієнтів $\alpha_{\text{розр}}$ і $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ (рис. 5) не перевищує $\pm 15\%$.

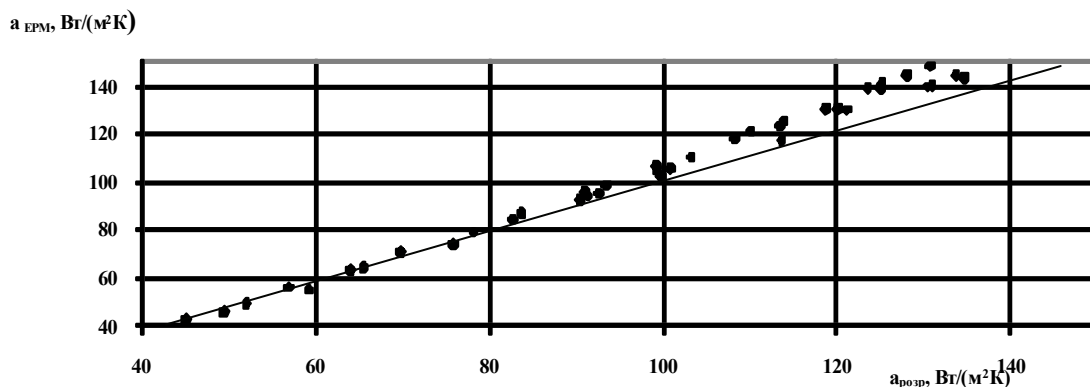


Рис. 5. Зіставлення розрахункових значень коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{\text{розр}}$, та отриманих за ЕРМ $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ у разі вільної конвекції у «великому» об'ємі біля горизонтальної труби $d = 50$ мм, турбулентний рух, гліцерину дистилату $c = 100\%$; $t = 20 \dots 80$ °С

Висновки

1. Отримав подальший розвиток спосіб визначення інтенсивності теплообміну в складних рідинах і сумішах органічного походження та дослідження в комплексі їх теплофізичних властивостей із застосуванням експериментально-розрахункового методу.

2. Введено поняття «частково-модельної» рідини з метою більш обґрунтованого визначення $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$ з використанням фізичних властивостей цієї рідини. При цьому точність поправки $(\text{Pr}_p/\text{Pr}_{\text{ст}})^{0,25}$ для визначення $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$ суттєво підвищується і знаходиться в межах $\pm(3 \dots 5)\%$.

3. Завдяки введенню в ЕРМ додаткового експерименту по визначенню залежності $v_0(t_0)$ і розробки спеціальних розрахункових алгоритмів, з'явилась можливість визначати границі режимів теплообміну і поправки на перехід від $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}$ до $\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}$ з використанням фізичних властивостей не «модельної рідини», а реальної суміші, яка на початку реалізації ЕРМ трактувалась, як суміш з обмеженою інформацією по фізичним властивостям.

4. Таким чином, ТФВ «модельної рідини» застосовуються в ЕРМ тільки для визначення поправки на напрям теплообміну $(\text{Pr}_p/\text{Pr}_{\text{ст}})^{0,25}$, а визначення границь режимів теплообміну та розрахунок поправок для переходу із базового режиму в шуканий здійснюється з використанням реальних теплофізичних властивостей досліджуваної складної рідини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С. Й. Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії : моног. / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 2011. — 132 с.
2. Викторов М. М. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты / М. М. Викторов — Л. : Химия, 1977. — 360 с.
3. Патент України 56758, МПК 7 G01N 25/18. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші / Ткаченко С. Й., Пішеніна Н. В., Резидент Н. В.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. — № 201008526; заявл. 08.07.2010; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2.
4. Ткаченко С. Й. Удосконалення експериментально-розрахункового методу / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, Н. В. Резидент // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. — 2010. — № 2. — С. 171—183.
5. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Иженерные методы расчета / С. Бретшнайдер ; под ред. П. Г. Романова. — Л. : Химия, 1966. — 536 с.
6. Пішеніна Н. В. Теплообмін в складних сумішах в умовах природної конвекції / Н. В. Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : наук.-техн. зб. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 2011. — № 2. — С. 140—148.
7. Филиппов Л. П. Исследование теплопроводности жидкостей / Л. П. Филиппов. — М. : изд-во МГУ, 1970. — 236 с.
8. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : учеб. / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов. — [2-е изд., перераб.] — М. : Машиностроение, 1982. — 423 с.
9. Рахманкулов Д. Л. Физические и химические свойства глицерина / Д. Л. Рахманкулов, Б. Х. Кисманов, Р. Р. Чанышев. — М. : Химия, 2003 — 199 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Стаття надійшла до редакції 24.01.12
Рекомендована до друку 17.02.12

Ткаченко Станіслав Йосипович — завідувач кафедри, **Пішеніна Надія Володимирівна** — аспірантка.
Кафедра теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця