

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

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ «ВІРТУАЛЬНОЇ МОДЕЛЬНОЇ РІДИНИ» ДЛЯ ОЦІНКИ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ

Запропоновано поняття «віртуальної модельної рідини», розроблено метод визначення її теплофізичних властивостей для застосування в експериментально-розрахунковому методі. Введено метод оцінювання реологічної поведінки натурної рідини, суміші, розчину, що дає можливість перевірки надійності застосування запропонованого підходу до визначення інтенсивності теплообміну в рідині в натурних умовах. Проаналізовані результати реалізації удосконаленого експериментально-розрахункового методу. Введення «віртуальної модельної рідини» дозволяє оцінювати теплофізичні властивості середовища та інтенсивність теплообміну в натурних умовах, а також визначати границі режимів руху суміші за умов теплообміну.

Ключові слова: теплообмін, експериментально-розрахунковий метод, складна суміш, неньютонівська рідина, теплофізичні властивості.

Вступ

Питання розвитку методів оцінювання інтенсивності процесів теплообміну в складних багатофазних, полікомпонентних сумішах, розчинах (у подальшому – натурна рідина, рідина), в умовах невизначеності вхідної інформації на сьогодні актуальне. Перелік натурних рідин, які можуть використовуватись в різних галузях виробництва, практично необмежений. Невизначеність вхідної інформації зумовлюється відсутністю достовірних експериментальних даних про теплофізичні та реологічні параметри натурних рідин, або непередбачуваною зміною вказаних параметрів зі зміною теплових і гідродинамічних умов. Відповідно, у проектуванні натурних теплообмінних установок (НТОУ) виникають невизначеності з оцінюванням режимів руху складних рідин, натурних умов теплообміну, коефіцієнтів тепловіддачі.

Нетрадиційні підходи використання теорії подібності, які застосовуються в експериментально-розрахунковому методі [1–3], дозволяють оцінювати інтенсивність теплообміну в складних сумішах у НТОУ. Проводяться дослідження натурної рідини на портативному експериментальному стенді (у подальшому – базовий стенд). Фізичний експеримент ЕРМ, який названо базовим, направлено на визначення інтенсивності теплообміну в натурних рідинах $\alpha_{\text{експ}}^{\bar{\delta}}$ та дослідження в комплексі їх теплофізичних властивостей за різних теплогідродинамічних умов [1–3]. Проведення експерименту ЕРМ можливе у виробничих умовах, на відміну від традиційних методів детального вивчення кожного із теплофізичних параметрів окремо, які потребують спеціалізованого обладнання.

Постановка задачі

Розрахункова частина ЕРМ містить бази даних структурованих критеріальних рівнянь, теплофізичних властивостей «модельних рідин», набір методів і алгоритмів обробки базового експерименту, врахування впливу напряму теплообміну на коефіцієнти тепловіддачі, оцінювання реальних теплофізичних властивостей натурної рідини, врахування переходу від базових до натурних умов теплообміну. Застосування вказаних методів та баз даних у комплексі демонструються з використанням залежності [2, 3]

$$\alpha_{\text{НТОУ}} = C \cdot \left[\frac{P_{\bar{\delta}-n}}{C_{\bar{\delta}} \cdot P_{\bar{\delta}} \cdot P_{\text{нт.}\bar{\delta}}} \cdot \frac{\alpha_{\text{експ}}^{\bar{\delta}}}{C_{\bar{\delta}} \cdot P_{\bar{\delta}} \cdot P_{\text{нт.}\bar{\delta}}} \right] \cdot g^{n_1} \cdot w^{n_2} \cdot \ell^{n_3} \cdot \bar{\Delta t}^{n_4} \cdot (P_{\text{нт.н}})^m, \quad (1)$$

де $\alpha_{\text{НТОУ}}$ – коефіцієнт тепловіддачі в НТОУ; $\alpha_{\text{експ}}^{\bar{\delta}}$ – експериментальний коефіцієнт тепловіддачі в базових умовах теплообміну від твердої стінки до натурної рідини, яка нагрівається (охолоджується); C – константа критеріального рівняння; $\bar{\Delta t}$ – середній температурний напір між поверхнею теплообміну та рідиною; g – прискорення вільного падіння; w та ℓ – характерна швидкість руху рідини та визначальний геометричний розмір; $(P_{\text{нт.н}})^m = \left(\text{Pr}_p / \text{Pr}_{\text{cm}} \right)_n^{0.25}$ – поправка на напрям теплообміну в

натурних умовах; $n_1 \dots n_4$, m – показники степеня в залежності для визначення інтенсивності тепловіддачі від режиму течії в теплопередавальному елементі; Π_6 – множник, який враховує визначальні та характерні параметри базової експериментальної установки та температурний напір; C_6 – константа критеріального рівняння для базових умов теплообміну (для умов вимушеної конвекції в нашому експериментальному стенді після проведення тарувальних експериментів $C_6 = 0,0549$; для умов вільної конвекції – $C_6 = 1,3$); $\Pi_{6-н}$ – поправка переходу із базових в натурні умови теплообміну; $\Pi_{нт.6} = (Pr_p / Pr_{cm})_6^{0,25}$ – поправка врахування впливу напряму теплообміну на базові коефіцієнти тепловіддачі, визначається методом послідовних наближень на етапі обробки базового експерименту.

Властивості натурної рідини характеризуються експериментальною залежністю базового еквівалента комплексу фізичних властивостей натурної рідини $EKF\bar{B}_6^{експ.}(\bar{t})$ від температури [2]

$$EKF\bar{B}_6^{експ.} = \frac{\alpha_{експ.}^6}{C_6 \cdot \Pi_6 \cdot \Pi_{нт.6}}, \quad (2)$$

який визначається методом ітерацій з введенням поняття «частково-модельної рідини» [2].

Поправка $\Pi_{6-н}$ розраховується з використанням теплофізичних властивостей «модельної рідини» [3, 5] або оцінених реальних теплофізичних властивостей натурної рідини [2], і баз даних структурованих критеріальних рівнянь [3]

$$\Pi_{6-н} = KFB_{ЕРМн} / KFB_6, \quad (3)$$

де $KFB_6 = C_p^{k_1} \cdot \rho^{k_2} \cdot \beta^{k_3} \cdot \lambda^{k_4} \cdot \nu^{k_5}$ – базовий комплекс фізичних властивостей, який виведено із структурованого критеріального рівняння базових умов теплообміну, $k_1 \dots k_5$ — показники степеня;

$KFB_{ЕРМн} = C_p^{a_1} \cdot \rho^{a_2} \cdot \beta^{a_3} \cdot \lambda^{a_4} \cdot \nu^{a_5}$ – натурний комплекс фізичних властивостей виведено із структурованого критеріального рівняння натурних умов теплообміну, $a_1 \dots a_5$ — показники степеня; β — коефіцієнт температурного розширення, ν — кінематична в'язкість, ρ — густина, C_p — теплоємність, λ — теплопровідність рідини.

В ЕРМ «частково-модельні» та «модельні рідини», це ньютонівські рідини, виступають в ролі допоміжних. Їх теплофізичні властивості досліджені і наведені в довідниковій літературі, використовуються для розрахунку поправок $\Pi_{нт.6}$, $\Pi_{6-н}$, $\Pi_{нт.н}$. Розроблено методи вибору допоміжних рідин, при цьому формальними ознаками їх вибору є експериментальний базовий комплекс натурної рідини $EKF\bar{B}_6^{експ.}(\bar{t})$ і середня температура суміші \bar{t} в базових та натурних умовах [3–5].

Практичне застосування ЕРМ показало, що не до кожної натурної рідини можна підібрати із бази даних «модельну рідину» з достатньою для розрахунків точністю, перелік їх обмежений [2]. У межах ЕРМ запропоновано метод оцінювання реальних теплофізичних властивостей (ТФВ) натурних рідин за експериментальною характеристикою $EKF\bar{B}_6^{експ.}(\bar{t})$ і застосування їх для розрахунку поправок $\Pi_{нт.6}$, $\Pi_{6-н}$, $\Pi_{нт.н}$ [3–5]. Проводячи додатковий експеримент по визначенню кінематичної в'язкості суміші ν_0 за температур навколишнього середовища \bar{t}_0 , із $EKF\bar{B}_6^{експ.}(\bar{t}_0)$ визначається теплопровідність натурної рідини λ_0 , яка приймається сталою в обмеженому діапазоні температур $\lambda_0 \approx \bar{\lambda}$. Приймавши $\lambda_0 \approx \bar{\lambda}$, із використанням характеристики $EKF\bar{B}_6^{експ.}(\bar{t})$ знаходять залежність $\nu(\bar{t})$. При цьому, залежності $\rho(\bar{t})$, $\beta(\bar{t})$, $C_p(\bar{t})$ натурної рідини оцінюють експериментально засобами ЕРМ та на додатковому обладнанні (ваги, мірні стакани тощо), а базовий експеримент проводять лише за умов вільної конвекції у «великому» об'ємі, ламінарний рух суміші [2, 3, 5].

На наш погляд, оцінювати реальні ТФВ у такий спосіб можна лише для ньютонівських натурних рідин у вузькому діапазоні температур, або таких, що перебувають в стані ньютонівських. Якщо натурна рідина виявляє ознаки неньютонівських рідин, надійність результатів знижується.

Натурні рідини у технологічному процесі перебувають у різних теплових і гідродинамічних умовах, в них можуть відбуватися хімічні реакції, процеси седиментації, насичення газами. Динамічність зміни стану натурних рідин в реальних умовах теплотехнології ускладнює ідентифікацію сумішей як ньютонівської або неньютонівської рідини [4], а також унеможливає визначення дійсних $\nu(\bar{t})$ та $\lambda(\bar{t})$ загальноприйнятими методами.

Очевидно, що зазначені перетворення в рідинах впливають на інтенсивність теплообміну. Тобто, експериментально визначені коефіцієнти тепловіддачі від твердої стінки до натурної рідини за

конкретних теплогідродинамічних умов, будуть відображати її реологічні особливості та теплопровідність.

Із вищевикладеного можна зробити висновок, що вся проблема розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі від твердої стінки до складних сумішей зосереджена у визначенні теплопровідності і в'язкості суміші від температури, та прогнозуванні її реологічної поведінки. Припущення, що теплопровідність стала, можливо приймати тільки для вузьких діапазонів температур, особливо для водних розчинів і сумішей. Отримані залежності ТФВ від \bar{t} за методом [2] не можна екстраполювати на інші температури. Значення оцінених реальних ТФВ натурної рідини можуть відрізнятись, якщо взяти різні діапазони температур однієї залежності $EKF\bar{B}_6^{експ.}(\bar{t})$. Відповідно до цього, запропоновано ввести в ЕРМ поняття «віртуальної модельної рідини» і з використанням її ТФВ розраховувати поправки $\Pi_{нт.б.}$, $\Pi_{б.н.}$, $\Pi_{нт.н}$ (1), (2). А також, запропоновано в експериментальній частині ЕРМ проводити тестування натурної рідини, направлене на оцінювання впливу спеціалізованого комплексу теплофізичних параметрів рідини, прив'язаних до певних умов, на інтенсивність теплообміну і виявлення її реологічного стану.

Очікувані результати (переваги) запропонованого підходу: зникає необхідність підбирати «модельну рідину» із обмеженого переліку (зводиться до мінімуму похибка, пов'язана із неточністю її вибору) і, відповідно, підвищується надійність оцінки $\alpha_{НТОУ}$ (1); з'являється можливість ідентифікувати натурну рідину, прослідкувати зміну її реологічного стану зі зміною теплогідродинамічних умов, і оцінити як це відбивається на інтенсивності тепловіддачі; дозволить наблизитись до реальності в оцінюванні умов теплообміну в НТОУ і режимів руху натурної рідини за ТФВ «віртуальної модельної рідини».

Метою роботи є підвищення надійності розрахунків теплообмінного обладнання шляхом визначення параметрів «віртуальної модельної рідини» для оцінки інтенсивності теплообміну в натурній рідині за умов невизначених її теплофізичних властивостей в реальних умовах теплотехнології.

Матеріали і результати досліджень. Запропоновано гіпотезу, що реологічну поведінку складної суміші у натурних умовах та зміну її теплофізичних властивостей, зокрема $\nu(\bar{t})$ та $\lambda(\bar{t})$, можна імітувати за допомогою «віртуальної модельної рідини». Теплофізичні параметри останньої формуються на основі результатів багатоваріантних досліджень інтенсивності теплообміну в натурній рідині за ЕРМ, при цьому залежності $\rho(\bar{t})$, $\beta(\bar{t})$, $C_p(\bar{t})$ визначають із додаткових експериментів доступними методами. Одна і та ж складна суміш у різних теплогідродинамічних станах може ідентифікуватись по-різному. Вважаємо, що ТФВ «віртуальної модельної рідини» відповідають ТФВ натурної рідини в конкретних теплогідродинамічних умовах.

Суть способу визначення інтенсивності теплообміну в натурних рідинах у НТОУ з визначенням ТФВ «віртуальної модельної рідини», виявленням її реологічних особливостей і застосування ЕРМ викладено нижче.

Експериментальне тестування натурної суміші. Проводиться базовий експеримент по визначенню $\alpha_6^{експ.}(\bar{t})$ за умов вимушеної і вільної конвекції [4]. Тестування передбачає багатоваріантність досліджень, що забезпечується зміною умов руху суміші (вільний, вимушений перемішуванням пропелерною мішалкою) та варіюванням частоти обертання мішалки $n = 10 \dots 180$ об/хв у температурному діапазоні \bar{t} , в якому працюватиме НТОУ $t_{нтоу}$.

Досліджуючи на базовому експериментальному стенді залежності $\alpha_6^{експ.} = f(\bar{t}, \Delta\bar{t}, n)$ можна якісно оцінити здатність речовини до конвективного теплообміну, орієнтовно оцінити рівень значень коефіцієнтів тепловіддачі, які ми можемо отримати за умов вільної та вимушеної конвекції.

Ідентифікація реологічної поведінки натурної суміші. Шляхом послідовних наближень врахування поправки на напрям теплообміну $\Pi_{нт.б.} = \left(Pr_p / Pr_{ст} \right)^{0,25}$ за ТФВ «частково-модельних рідин» [2] та критеріальними рівняннями, які описують умови теплообміну в експериментальній установці, визначається залежність $EKF\bar{B}_6^{експ.}(\bar{t}, w)$ (2) від характерної швидкості руху рідини w та температури \bar{t} . Методика наведена у [4]

Комплекс $EKF\bar{B}_6^{експ.}(\bar{t}, w)$ можна розділити на дві частини

$$\text{ЕКФВ}_{\bar{6}}^{\text{експ}}(\bar{t}, w) = \text{ЕКФВ}_{\bar{6}}^* \cdot \text{ЕКФВ}_{\bar{6}}^{**} \quad (4)$$

де

$$\text{ЕКФВ}_{\bar{6}}^*(\bar{t}) = C\rho^{n1} \cdot \rho^{n2} \cdot \beta^{n3} \quad (5)$$

комплекс визначених теплофізичних величин, які можна експериментально визначити [2] і які не залежать від зміни характерної швидкості руху натурної суміші w ;

$$\text{ЕКФВ}_{\bar{6}}^{**}(\bar{t}, w) = \lambda^{m1} \cdot \nu^{m2} \quad (6)$$

комплекс невизначених теплофізичних величин, який залежить від наявності і стану структури натурної рідини і від зміни w , а, отже, буде характеризувати реологічну поведінку натурної рідини. За характером залежності $\text{ЕКФВ}_{\bar{6}}^{**}(\bar{t}, w)$ визначаємо чи належить суміш до ньютонівських рідин або близьких до ньютонівських (рис. 1, а). У випадку, коли натурна рідина виявляє значно неньютонівські властивості (рис. 1, а, криві 3), за $\text{ЕКФВ}_{\bar{6}}^{**}(\bar{t}, w)$ знаходимо температурні та кінематичні умови, за яких вона набуває ньютонівських властивостей.

За визначенням, в'язкість ньютонівської рідини не залежить від швидкості і напруження зсуву, реологічні характеристики її стабільні в часі. При перемішуванні пропелерною мішалкою натурної рідини на стенді ЕРМ, виникає вимушений рух, який можна охарактеризувати умовним напруженням зсуву τ^* , в загальному випадку залежним від характерної швидкості руху суміші $w = \pi \cdot n \cdot d_m$, де n — частота обертання мішалки, тобто $\tau^* \sim w$. Відповідно до цього, міра відхилення характеристики $\text{ЕКФВ}_{\bar{6}}^{**}(w)$ від горизонталі, при $\bar{t} = \text{const}$, буде визначати характер реологічної поведінки натурної рідини і ступінь відхилення її від ньютонівської.

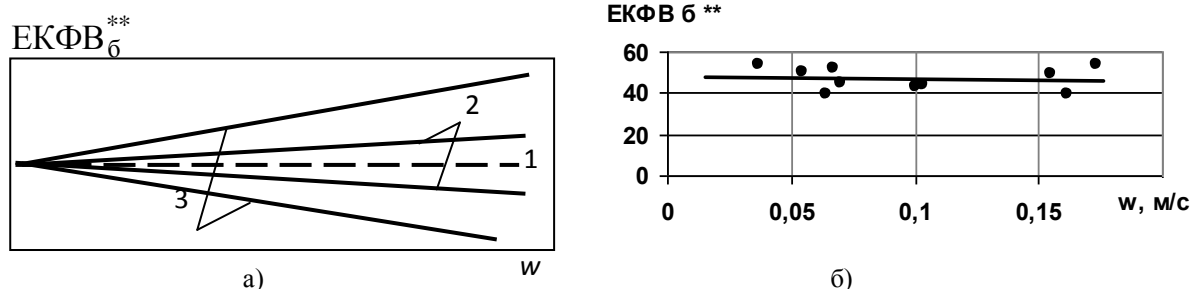


Рис. 1 Залежності $\text{ЕКФВ}_{\bar{6}}^{**}(w)$ для різного класу рідин, які поводять себе як ньютонівське та неньютонівське середовище: а) якісні характеристики для: 1 – ньютонівська суміш; 2 – неньютонівська, близька до ньютонівської; 3 – неньютонівська; б) експериментальні точки, цукровий розчин концентрація 50%, $\bar{t} = 40 \dots 45^\circ \text{C}$ (рідина з умовно невизначеними теплофізичними властивостями)

Оцінювання теплофізичних властивостей «віртуальної модельної рідини». Пропонується два варіанти. Перший варіант. З використанням термостатованого віскозиметра експериментально визначається в'язкість натурної рідини $\nu(\bar{t})$ в обмеженому діапазоні температур. Використовуючи залежності $\nu(\bar{t})$ і $\text{ЕКФВ}_{\bar{6}}^{**}(\bar{t}, w)$ (6), отримується експериментальна залежність теплопровідності $\lambda(\bar{t})$ від температури.

Другий варіант. Оцінюється в'язкість натурної рідини за температури навколишнього середовища $\nu_0(t_0)$ доступними методами (наприклад, на віскозиметрі Енглера). На експериментальній залежності вибирається на прямій дві точки при t_0 та при $t_{\text{нтоу}}$ (7).

Маючи систему рівнянь

$$\begin{cases} \text{ЕКФВ}_{\bar{6}1}^{**}(t_0) = \lambda_0^{m1} \cdot \nu_0^{m2} \\ \text{ЕКФВ}_{\bar{6}2}^{**}(t_{\text{нтоу}}) = \lambda_2^{m1} \cdot \nu_2^{m2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{звідки} \quad \lambda_0 = \left(\frac{\text{ЕКФВ}_{61}^{**}}{v_0^{m2}} \right)^{1/m2}. \quad (8)$$

Приймається, що в діапазоні температур $t_0 \dots t_{\text{НТОУ}}$ коефіцієнт теплопровідності $\lambda_0 = \lambda_2 = \text{const}$.

Залежність в'язкості «віртуальної модельної рідини» $v(\bar{t})$ розраховується із (6).

Оцінювання $\alpha_{\text{НТОУ}}$ проводять за ЕРМ [2–5], при цьому додатково уточнюють залежність $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ.}}(\bar{t}, w)$ (2) методом ітерацій, а визначені ТФВ «віртуальної модельної рідини» застосовують для:

- розрахунку критеріїв Прандтля натурної рідини $\text{Pr} = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$ і поправки

$$\Pi_{\text{ит.б}} = \left(\text{Pr}_p / \text{Pr}_{\text{cm}} \right)_6^{0,25} \text{ уточнюючи залежність } \text{ЕКФВ}_6^{\text{експ.}}(\bar{t}, w);$$

- перевірки умов теплообміну і режимів руху натурної рідини в НТОУ, розраховуючи критерії

$$\text{Рейнольдса } \text{Re} = \frac{w \cdot \ell}{v}, \text{ Грасгофа } \text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot \ell^3 \cdot \rho^2}{\mu^2};$$

- визначення поправки $\Pi_{\text{б-н}}$ (3) та $\Pi_{\text{ит.н}}$ (1), оцінюючи можливий діапазон $\alpha_{\text{НТОУ}}$.

Метод, що пропонується, застосовується тільки для рідин ньютонівського типу, близьких до ньютонівських, або які знаходяться у стані ньютонівських і мають поведінку ньютонівських в заданому діапазоні параметрів.

Якщо комплекс $\text{ЕКФВ}_6^{**}(\bar{t})$ (6) більш конкретно характеризує рідину в динаміці зміни температур та швидкостей, тоді його можна використати для вибору моделюючої складну суміш рідини із переліку «модельних рідин». Для порівняння наведемо варіант оцінки $\alpha_{\text{НТОУ}}$ за ТФВ «модельної рідини». Але, на відміну від [2–5], пропонуємо ТФВ «модельної рідини» вибирати за іншими формальними ознаками: за визначальний комплекс приймаємо характеристику $\text{ЕКФВ}_6^{**} = f(\bar{t})$ і температуру рідини \bar{t} .

Для цього створено базу даних розрахункових залежностей «модельних рідин» $\left[\text{ЕКФВ}_6^{**\text{розр}} \right]_M = f(\bar{t})$ в діапазоні температур $t_M = 20 \dots 80^\circ\text{C}$ і пропонуються нові умови вибору «модельної рідини»

$$\frac{\partial \left[\text{ЕКФВ}_6^{**\text{розр}} \right]_M}{\partial \bar{t}} - \frac{\partial \text{ЕКФВ}_6^{**}}{\partial \bar{t}} \rightarrow \min, \text{ якщо } \bar{t} = t_M \text{ та } \left[\frac{\partial \text{ЕКФВ}_6^{**}}{\partial w} \right]_{\bar{t}=\text{const}} = 0. \quad (9)$$

Структуризація (6) зумовлена тим, що розрахункові комплекси «модельних рідин» $\text{КФВ}_6(t)$ можуть мати однакові значення при рівних температурах, але якщо порівняти нарізно, кожний із ТФВ для «модельних рідин» між собою не будуть рівні. Аналогічний висновок можна передбачити і для порівняння $\text{ЕКФВ}_6(\bar{t})$ натурної рідини з $\text{КФВ}_6(t)$ «модельних рідин».

Відокремлення параметрів $v(\bar{t})$ і $\lambda(\bar{t})$, які можуть залежати від швидкості зсуву і характеризують реологічний стан рідини, в окремий комплекс, дозволяє більш конкретно підібрати «модельну рідину» і визначити її функцію, як рідини, моделюючої $v(\bar{t})$ і $\lambda(\bar{t})$.

Нижче наводимо конкретний приклад застосування запропонованого методу. Дослідження проводились з використанням рідин з умовно невизначеними теплофізичними властивостями: цукрових розчинів, гліцерину безводного, соняшникової олії, а детально висвітлено найбільш характерні результати на прикладі цукрового розчину з концентрацією 50%, який прийнято за рідину з обмеженою інформацією по ТФВ. Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{\text{НТОУ}}$ визначався трьома методами: 1) за методом вибору «модельної рідини» (9); 2) за наведеним вище способом (4) – (8) із застосуванням ЕРМ та ТФВ

«віртуальної модельної рідини» за умови, що експериментально отримали тільки одне значення $v_0(t_0)$;

3) якщо відома експериментальна залежність $v(\bar{t})$. А також α_{HTOY} розраховано за критеріальними рівняннями, як для рідин з відомими ТФВ.

За натурні умови теплообміну прийнято: теплообмін за умов вимушеного руху суміші в трубі, турбулентний рух, внутрішній діаметр труби рівний 50 мм; поперечне обтікання горизонтальної труби, вимушений рух, зовнішній діаметр труби рівний 50 мм. Характерна швидкість руху суміші в натурних умовах прийнято рівною 1,5 м/с, діапазон температур суміші – $\bar{t} = 20...40^\circ\text{C}$, середній температурний напір між грійною стінкою і натурною сумішшю – $\Delta\bar{t} = 10^\circ\text{C}$.

Дослідження теплообміну зі зразком натурної суміші (базовий експеримент) проводились за умов вимушеної конвекції (перемішування пропелерною мішалкою) [4]. Характерні швидкості руху рідини в базовому експерименті [4] змінювались у межах $w=0,01...1,5$ м/с. Рівняння, яке описує інтенсивність теплообміну для базових умов [4, 5]

для $20 < Re_{2\delta} < 3,7 \cdot 10^3$, $6 \cdot 10^6 < (Gr_H \cdot Pr_p) < 2 \cdot 10^8$, $3,2 < Pr_p < 1,7 \cdot 10^3$

$$Nu = 0,0549 \cdot Re_{2\delta}^{0,589} \cdot Pr_p^{0,33} \cdot (Gr_H \cdot Pr_p)^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}, \quad (10)$$

$$Nu = \frac{\alpha_{експ}^6 \cdot 2\delta}{\lambda}, \quad Re = \frac{w \cdot 2\delta}{\nu}, \quad Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta\bar{t} \cdot H^3 \cdot \rho^2}{\mu^2},$$

де визначальними прийнято два лінійних розміри: висота вертикальної теплообмінної поверхні H , та різниця діаметрів внутрішньої посудини базової установки D_B і мішалки d_M – $2\delta = D_B - d_M$.

Характер залежності $EKFV_{\bar{t}}^{**}(t, w)$ (рис. 2, б) свідчить про те, що натурна рідина є ньютонівською.

Для переходу з базових умов теплообміну до натурних (теплообмін за умов вимушеної конвекції в трубах і кільцевих каналах, турбулентний рух) $\Pi_{\bar{t}-H}$ визначається за формулою

$$\Pi_{\bar{t}-H} = v^{-0,011} \cdot \beta^{-0,1}, \quad (11)$$

для оцінювання α_{HTOY} за умов поперечного обтікання горизонтальної труби, вимушений рух, $\Pi_{\bar{t}-H}$ визначається за формулою

$$\Pi_{\bar{t}-H} = v^{0,139} \cdot (\rho \cdot C_p)^{-0,05} \cdot \lambda^{0,05} \cdot \beta^{-0,1}. \quad (12)$$

Результат оцінювання $\lambda(\bar{t})$ (рис. 2) відповідно до заданих варіантів показав, що приймаючи $\lambda_0 = \lambda_2 = \text{const}$ (8) розбіжність у визначенні, відносно дійсних довідникових даних становить до 12...20% в діапазоні температур $\bar{t} = 10...20^\circ\text{C}$ (рис. 2, крива 3). Якщо ж визначати $\lambda(\bar{t})$ за (6), маючи експериментальну залежність $v(\bar{t})$ (рис. 2, крива 1), похибка зменшується до 3...10% для того ж діапазону температур. Для отримання кривої 1 на рис. 2 були використані довідникові значення $v(\bar{t})$ із врахуванням можливої похибки вимірювання в'язкості $\pm 3...5\%$ [6, 7].

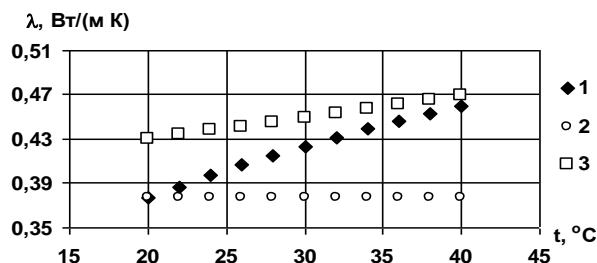


Рис. 2. Оцінювання теплопровідності: 1 – теплопровідність «віртуальної модельної рідини» визначена із (6), якщо відома експериментальна залежність $v(\bar{t})$; 2 – визначена із (8) за умови, що експериментально отримали тільки одне значення $v_0(t_0)$; 3 – довідникові значення теплопровідності для цукрового розчину, з концентрацією 50 %.

Розбіжність між довідниковими даними $\lambda(\bar{t})$ і оціненими $\lambda(\bar{t})$ «віртуальної модельної рідини» (рис. 2), пояснюється експериментальною похибкою отримання характеристики $EKFV_{\delta}^{**}(\bar{t})$.

Проаналізуємо дослідження, які представлені на рис 3.

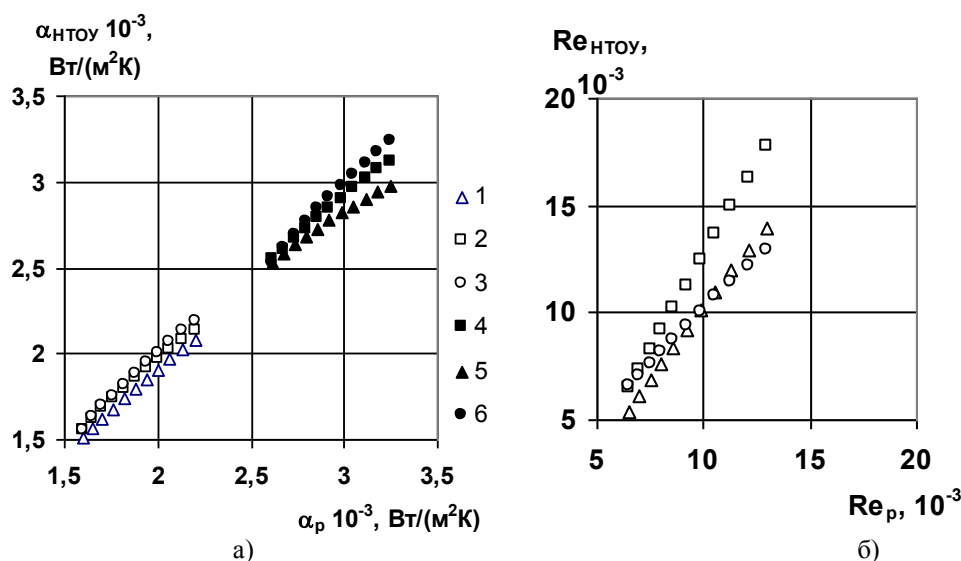


Рис. 3. Результати досліджень: а) зіставлення коефіцієнтів тепловіддачі; б) перевірка режимів руху суміші в натурних умовах; 1, 2, 3 – вимушений рух в трубі, 4, 5, 6 – поперечне обтікання горизонтальної труби.

На рис. 3: «натурна рідина з невизначеними ТФВ» – цукровий розчин, концентрація 50%; оцінювання $\alpha_{НТОУ}$ проводиться з використанням ТФВ:

- 1, 4 – «модельної рідини» (мелясна барда, концентрація 50%);
- 2, 5 – «віртуальної модельної рідини», визначених за умов $t = t_0$, тобто $v_0(t_0)$ та $\lambda_0 = \lambda_2 = \text{const}$;
- 3, 6 – «віртуальної модельної рідини», визначених за умов $\bar{t} = var$, тобто $v(\bar{t})$ та $\lambda(\bar{t})$;
- 1, 2, 3 – течія в круглій трубі з внутрішнім діаметром 50 мм;
- 4, 5, 6 – поперечне обтікання круглої труби із зовнішнім діаметром 50 мм.

Порівнюючи результати (рис. 3) видно, що для всіх методів оцінювання $\alpha_{НТОУ}$, відхилення його значень від розрахункових α_p до 8%. Перевірка режимів руху суміші в НТОУ за ТФВ «віртуальної модельної рідини», визначених, приймаючи $\lambda_0 = \lambda_2 = \text{const}$ (8) і якщо відома в'язкість натурної рідини тільки за температури навколишнього середовища $v_0(t_0)$, показала, що відхилення $Re_{НТОУ}$ від розрахункових Re_p може досягати 27 % (рис. 3 б, крива 2). А за умов експериментального визначення $v(\bar{t})$ відхилення $\alpha_{НТОУ}$ від α_p і $Re_{НТОУ}$ від Re_p не перевищує 5%.

Проблеми виникають при виборі «модельної рідини», оскільки база даних по «модельним рідинам» обмежена, порівняно з необмеженою кількістю складних рідин в тепло- і біотехнологічних процесах. Невелика кількість «модельних рідин» можуть відповідати коректним умовам її вибору для натурної рідини [4, 5]. Введення методу вибору «віртуальної модельної рідини» дозволяє усунути недоліки застосування «модельних рідин».

Створення «віртуальної модельної рідини» дає можливість розширити діапазон застосування ЕРМ.

Таким чином, перевірка методу показала, що імітація складної суміші «віртуальною модельною рідиною» дає можливість усунути проблему вибору «модельної рідини» в ЕРМ із обмеженого переліку та зменшити необхідність поновлення баз даних по ТФВ «модельних рідин». При цьому, точність і надійність оцінювання режимів руху натурної рідини та умов теплообміну у НТОУ не знижується, а у випадку неможливості вибору «модельної рідини», підвищується і дозволяє збільшити універсальність застосування ЕРМ для натурних рідин, що в певних теплогідродинамічних умовах виявляють властивості ньютонівської рідини.

Висновки. Поняття «модельна рідина» (еквівалентна рідина) застосовується в ЕРМ для визначення інтенсивності теплообміну за умов роботи теплообмінника, тобто в обмеженому інтервалі параметрів натурної рідини. Існує проблема, у зв'язку з тим, що кількість рідин, що можуть бути представлені як модельні, значно менша, ніж натурних сумішей, розчинів і рідин з невідомими теплофізичними властивостями в тепло- і біотехнологічних системах.

Введення поняття «віртуальної модельної рідини» і розробка методу формування її теплофізичних властивостей розширює діапазон застосування експериментально-розрахункового методу і дозволяє оцінювати коефіцієнти тепловіддачі в натурних умовах, а також границі режимів руху рідини за умов теплообміну з достовірністю одного порядку з існуючими традиційними методами розрахунку інтенсивності теплообміну, побудованими на базі критеріальних рівнянь.

Одержані результати можна застосувати в процесі розробки методу оцінки інтенсивності теплообміну в неньютонівських складних сумішах, розчинах і рідинах з невизначеною реологічною поведінкою.

Список літератури

1. Ткаченко С. Й. Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії : монографія / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент. – Вінниця: Універсум – Вінниця, 2011. – 132 с.
2. 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.
3. 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. — № a201005661; заявл. 11.05.2010; опубл. 26.05.2011, Бюл. № 2.
4. Ткаченко С. Й. Метод визначення інтенсивності теплообміну в реонестабільних сумішах / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. — Вінниця : Універсум–Вінниця, 2012. — № 2. — С. 78—87.
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. Исаченко В. П. Теплопередача : учебн. для вузов / В. П. Исаченко [и др.]. – [3-е изд. доп.]. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
7. Попов В. Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы / В. Д. Попов. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 320 с.
8. Демчук Г. С. Упарювання мелясної барди / Г. С. Демчук, С. М. Константінов. Київ: Техніка, 1966. — 108 с.

S.J. Tkachenko, T.Y. Rumiantseva, N.V. Pishenina
Vinnitsia National Technical University

DETERMINING THE PARAMETERS OF "VIRTUAL MODEL LIQUID" FOR THE EVALUATE THE INTENSITY OF HEAT EXCHANGE IN THE REAL CONDITIONS OF HEAT TECHNOLOGY

The notion of "virtual model liquid" has been proposed and the method of determining its thermophysical properties has been developed for application in experimental calculated method. Evaluation method of rheological behavior of model mixture or grout has been introduced which makes possible to verify the reliability the application of the proposed approach to determine the intensity of heat transfer in a mixture in the natural conditions. The results of the implementation of the improved experimental calculated method have been analyzed. The introduction of "virtual model liquid" allow evaluate the thermophysical properties of the medium and the intensity of heat transfer in natural conditions and to determine the boundary modes of movement of mixture in conditions of heat exchange.

Keywords: heat exchange, experimental calculated method, complex mixture, non-Newtonian liquid, thermophysical properties.

1. Tkachenko S. Y. Teplomasoobminni ta hidrodinamichni protsesy v elementakh system biokonversiyi : monohrafiya / S. Y. Tkachenko, N. V. Rezydent. – Vinnitsya: Universum – Vinnitsya, 2011. – 132 s.
2. Tkachenko S. Y. Zastosuvannya ponyattya «model'na ridyna» v eksperymental'no-rozrakhunkovomu metodi // S. Y. Tkachenko, N. V. Pishenina // Visnyk Vinnits'koho politekhnichnoho instytutu. — 2012. — № 3. — S. 103—110. — ISSN 1997-9266.
3. Patent Ukrayiny na vynakhid № 97021, (51) MPK (2006.01) G01N 25/18. Sposib vyznachennya

koefitsiyenta teploviddachi za umov konvektyvnoho teploobminu orhanichnoyi sumishi / Tkachenko S. Y., Pishenina N. V., Rezydent N. V.; zayavnyk i vlasnyk patentu Vinnyts'kyy natsional'nyy tekhnichnyy universytet. — № a201005661; zayavl. 11.05.2010; opubl. 26.05.2011, Byul. № 2.

4. Tkachenko S. Y. Metod vyznachennya intensyvnosti teploobminu v reonestabil'nykh sumishakh / S. Y. Tkachenko, N. V. Pishenina // Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. — Vinnytsya : Universum–Vinnytsya, 2012. — № 2. — S. 78–87.

5. Pishenina N. V. Teploobmin v skladnykh sumishakh v umovakh pryrodnoyi konvektsiyi / N. V. Pishenina // Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. — Vinnytsya : Universum–Vinnytsya, 2011. — № 2. — S. 124–131.

6. Ysachenko V. P. Teploperedacha : uchebn. dlya vuzov / V. P. Ysachenko [y dr.]. – [3-e yzd. dop.]. – M.: Enerhyua, 1975. – 488 s.

7. Popov V. D. Osnovy teoryy teplo- y massoobmena pry krystallyzatsyy sakharozy / V. D. Popov. — M.: Pyshchevaya promyshlennost', 1973. — 320 s.

8. Demchuk H. S. Uparyuvannya melyasnoyi bardy / H. S. Demchuk, S. M. Konstantinov. Kyiv: Tekhnika, 1966. — 108 s.

УДК 536.24:620.92

С. И. Ткаченко, д-р техн. наук, профессор; **Т. Ю. Румянцева**; **Н. В. Пишенина**, канд. техн. наук
Винницкий национальный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ «ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ» ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ

Предложено понятие «виртуальной модельной жидкости», разработан метод определения ее теплофизических свойств для применения в экспериментально-расчетном методе. Введен метод оценки реологического поведения натурной жидкости, смеси, раствора, что дает возможность проверки надежности применения предложенного подхода к определению интенсивности теплообмена в жидкости в натуральных условиях. Проанализированы результаты реализации усовершенствованного экспериментально-расчетного метода. Введение «виртуальной модельной жидкости» позволяет оценивать теплофизические свойства среды и интенсивность теплообмена в натуральных условиях, а также определять границы режимов движения смеси в условиях теплообмена.

Ключевые слова: теплообмен, экспериментально-расчетный метод, сложная смесь, неньютоновская жидкость, теплофизические свойства.

Надійшла 24.03.2014

Received 24.03.2014

УДК 620.9:658.26

О.В. Бориченко, канд. техн. наук, **А.Ю. Таран**
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ИНТЕГРОВАНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ – ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ У ВИРОБНИЧО-ГОСПОДАРСЬКІЙ СФЕРІ

У статті проаналізовані основні положення міжнародного стандарту ISO 50001:2011 «Системи енергетичного менеджменту – вимоги та керівництво щодо застосування». Система енергетичного менеджменту, яка розроблена і впроваджена відповідно до міжнародного стандарту, направлена на керування такою складовою процесу як підвищення рівня енергоефективності будь-якого типу організації. Обґрунтована необхідність інтегрування системи енергоменеджменту в існуючі системи менеджменту, коли одночасно можуть бути вирішені питання покращення якості, управління енергоефективністю, охорони навколишнього середовища та професійної безпеки.

Ключові слова: енергоефективність, інтегрована система енергоменеджменту, міжнародні стандарти.