

УДК 536.24:620.92

С. Й. ТКАЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; проф. ВНТУ, Вінниця;
Н. В. ПІШЕНІНА, канд. техн. наук; ст. викладач ВНТУ, Вінниця;
Т. Ю. РУМЯНЦЕВА, аспірант ВНТУ, Вінниця

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗНИЖЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ В СКЛАДНИХ СУМІШАХ

З метою зниження невизначеностей оцінювання інтенсивності теплообміну в складних сумішах виконано дослідження експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) визначення інтенсивності теплообміну між металевою стінкою і складними сумішами, для яких інформація про теплофізичні властивості не відома. Удосконалено експериментальну і розрахункову частини ЕРМ. В експериментальному стенді ЕРМ добавлена установка для визначення інтенсивності за умов вимушеного руху. Забезпечено експериментальне визначення розподілу температур по висоті грійного і нагріваного теплоносія. З метою автоматизації збору та обробки експериментальна інформація виводилась на комп'ютер. Удосконалено метод обробки експериментів шляхом уточнення діапазону параметрів проведення досліджень. Запропоновано і введено в систему ЕРМ метод визначення належності натурної суміші (розчину) до ньютонівських або неньютонівських рідин. Вперше запропоновано і науково обґрунтовано методи вибору «модельної» та «частково-модельної рідини» у конкретних теплогідродинамічних умовах та застосування їх теплофізичних властивостей для оцінювання інтенсивності теплообміну в складних сумішах в елементах натурального обладнання.

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

Вступ

У технологічних процесах різних галузей виробничої сфери, що пов'язані з харчовою, спиртовою, переробною промисловістю, сільським господарством, потрібно нагрівати, охолоджувати, термостабілізувати складні суміші, розчини органічного походження, біотехнологічні (мікробіологічні) середовища.

Під складною (натурною) сумішшю розуміється полікомпонентні, багатофазні колоїдно-дисперсні, структурно-в'язкі середовища, фізичні властивості яких невизначені та змінюються протягом технологічного процесу. Здебільшого натурні суміші можна віднести до неньютонівських реостабільних та реонестабільних рідин з псевдопластичною текучістю. Ідентифікація властивостей та стану реальних сумішей у технологічному процесі складна. За допомогою існуючих приладів, відомими методами це визначити проблемно.

Дотримання вимог технології стосовно інтенсивності теплообмінних процесів (температурних обмежень) в натурних сумішах за умов невизначеності їх фізичних властивостей є невирішеною задачею.

В [1–3] запропоновано нетрадиційний підхід та доступна експериментально-розрахункова методика визначення коефіцієнтів тепловіддачі від стінки до органічних сумішей з обмеженою інформацією про теплофізичні властивості (ТФВ) за умов вільної і вимушеної конвекції для різного геометричного виконання поверхні теплообміну. Обґрунтовано застосування експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) в конструктивному розрахунку і числовому експерименті утилізатора теплоти відпрацьованої суміші в системі біоконверсії.

Аналіз ЕРМ показав, що існують можливості зменшення невизначеності оцінювання інтенсивності теплообміну в складних сумішах, теплофізичні властивості яких не досліджені.

© С.Й. Ткаченко, Н.В. Пішеніна, Т.Ю. Румянцева, 2014

Постановка задачі

Інтенсивність тепловіддачі за умов природної і вимушеної конвекції описується рівнянням в безрозмірному вигляді [4]

$$Nu = f_1(Pr, Re, Gr), \quad (1)$$

де Nu – залежна змінна; Pr , Re , Gr – критерії Пекле, Рейнольдса, Грасгофа, що задаються умовами однозначності, не являються функцією незалежних змінних і для конкретної задачі є сталими величинами. Процес тепловіддачі відбувається на границі твердої стінки та рідини і коефіцієнт тепловіддачі осереднений по довжині поверхні теплообміну [4].

Після структуризації (1), прийнявши до уваги конкретні критеріальні рівняння [3, 4], які описують різні режими теплообміну за умов природної та вимушеної конвекції в елементах лабораторного обладнання і натурних теплообмінних установках (НТОУ), коефіцієнт тепловіддачі в елементах натурального об'єкта $\alpha_{НТОУ}$ можна представити у вигляді

$$\alpha_{НТОУ} = C \underbrace{\left[\underbrace{P_{б-н} \frac{\alpha_{б}^{експ}}{C_{б} P_{б} (Pr_p / Pr_c)_{б}^{0,25}}}_{\substack{\Pi_{нт,б} \\ ЕКФВ_{б}^{експ}}} \right]}_{ЕКФВ_{ЕРМн}} g^{n_1} w^{n_2} l^{n_3} \Delta t^{n_4} \Pi_{нт,н}, \quad (2)$$

де $\Pi_{нт,н} = (Pr_p / Pr_{ст})_н^m$ – поправка на напрям теплообміну, $n_1 \dots n_4$, m – показники степеня в залежності від режиму течії в теплопередавальному елементі; C – константа критеріального рівняння;

$ЕКФВ_{ЕРМн} = ЕКФВ_{б}^{експ} \Pi_{б-н} = f(\bar{t})$ – еквівалент комплексу фізичних властивостей в натурних умовах теплообміну;

$\alpha_{б}^{експ}$ – експериментальний коефіцієнт тепловіддачі в базових умовах теплообміну від твердої стінки до натурної суміші, яка нагрівається (охолоджується) в НТОУ. Базовими названі умови теплообміну в експериментальному стенді системи ЕРМ [5];

$ЕКФВ_{б}^{експ}$ – базовий еквівалент комплексу фізичних властивостей для реальної речовини (спеціалізований комплекс для конкретної натурної суміші), визначається за експериментальними значеннями $\alpha_{б}^{експ}$ ітераційним методом

$$ЕКФВ_{б}^{експ} = \frac{\alpha_{б}^{експ}}{C_{б} (Pr_p / Pr_{ст})_{б}^{0,25}}, \quad (3)$$

$\Pi_{б}$ – множник, який враховує визначальний геометричний параметр базової експериментальної установки та температурний напір за умов теплообміну в базовій експериментальній установці; $C_{б}$ – константа базового критеріального рівняння ($C = 0,0549$ для базового експерименту при вимушеній конвекції; $C = 1,3$ – при вільній конвекції, ламінарна течія рідини);

$\Pi_{\text{нт.б}}$ – поправка врахування впливу напряму теплообміну на базові коефіцієнти тепловіддачі, визначається методом послідовних наближень з введенням поняття «частково-модельної рідини» при отриманні характеристики $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}} = f(\bar{t})$ на етапі обробки базового експерименту;

$\Pi_{\text{б-н}}$ – поправка переходу із базових в натурні умови теплообміну $\Pi_{\text{б-н}} = \text{КФВ}_{\text{ЕРМн}} / \text{КФВ}_6$;

$$\text{КФВ}_6 = C_p^{k_1} \rho^{k_2} \beta^{k_3} \lambda^{k_4} \nu^{k_5} \quad (4)$$

виведено із структурованого критеріального рівняння для базових умов теплообміну в модельній рідині, $k_1 \dots k_5$ – показники степеня;

$$\text{КФВ}_{\text{ЕРМн}} = C_p^{a_1} \rho^{a_2} \beta^{a_3} \lambda^{a_4} \nu^{a_5} \quad (5)$$

виведено із структурованого критеріального рівняння для натурних умов теплообміну в модельній рідині, $a_1 \dots a_5$ – показники степеня; β – коефіцієнт температурного розширення; ν – кінематична в'язкість; ρ – густина; C_p – теплоємність; λ – теплопровідність рідини;

$\Pi_{\text{б-н}}$ та $\Pi_{\text{нт.н}}$ визначається із застосуванням ТФВ «модельної рідини»;

$\bar{\Delta t}$ – середній температурний напір між твердою стінкою і натурною сумішшю; l, w – характерні лінійний розмір та швидкість руху теплоносія, відповідно.

Отже, ЕРМ включає базовий експеримент з натурною сумішшю, для якої інформація по теплофізичним властивостям обмежена [1–3], і алгоритм розрахунку з використанням структуризованих критеріальних рівнянь. Структуризація критеріального рівняння у форматі ЕРМ (2) – це приведення його до розмірного вигляду і формування розмірного комплексу фізичних властивостей (КФВ), суцільно із набору теплофізичних властивостей (3), (5). При цьому, набір теплофізичних властивостей комплексу однозначно відповідає умовам теплообміну. Рідини і суміші, які використовуються в теплотехнологічних процесах, можуть бути ньютонівськими і неньютонівськими, залежно від умов [6]. Для характеристики рідкого гною тваринництва, авторами [7] запропоновано поняття еквівалентної рідини. В ЕРМ такі підходи до моделювання властивостей та стану суміші в технологічному процесі отримали подальший розвиток і введено поняття «модельних рідин» [1–3]. Достовірність результатів базового експерименту (3) визначає достовірність визначення $\alpha_{\text{нтоу}}$. Метод врахування поправок $\Pi_{\text{нт.б}}$, $\Pi_{\text{нт.н}}$ та $\Pi_{\text{б-н}}$ (2) є визначальним в плані надійності для $\alpha_{\text{нтоу}}$, отриманих за ЕРМ.

Проаналізувавши експериментальну і теоретичну частину ЕРМ [1–3] прийшли до висновку, що ЕРМ на сьогодні найбільш доцільний за умов визначення $\alpha_{\text{нтоу}}$ в складних сумішах, теплофізичні властивості яких невизначені. Але методи та засоби реалізації ЕРМ потрібно вдосконалювати, з наведених нижче причин.

Експериментальний стенд для проведення базового експерименту ЕРМ включав лише установку для дослідження природної конвекції, температура теплоносіїв замірялась тільки в одній точці. Накопичення експериментальних даних і їх обробка не автоматизовані в достатній мірі [1–3]. Обґрунтування умов теплообміну в базовому експериментальному стенді ЕРМ потребує детальних тарувальних досліджень з уточненням критеріальних рівнянь для визначення $\alpha_{\text{експ}}^{\text{б}}$ [1–3]. Передбачення в схемі

реалізації ЕРМ тарування базових установок є необхідним для отримання комплексної величини $\text{ЕКФВ}_{\bar{\theta}}^{\text{експ}}(\bar{t})$ із $\alpha_{\text{експ}}^{\bar{\theta}}$ (3) базового експерименту. В умовах невизначеності вхідної інформації про ТФВ натурної суміші, залежність $\text{ЕКФВ}_{\bar{\theta}}^{\text{експ}}(\bar{t})$ виступає в ролі початкових даних по властивостям речовини за певного режиму теплообміну в конкретній базовій експериментальній установці [8].

Запропонований в [1–3] метод визначення «модельної рідини» досліджений лише для вузького кола реальних рідин, недостатня обґрунтованість методу врахування поправки на напрям теплообміну. Всі суміші розглядаються як ньютонівські рідини [1–3], не передбачений коректний метод уточнення типу натурної рідини, суміші, розчину – ньютонівська чи неньютонівська, не розглядається врахування їх зміни реологічних особливостей у натурних умовах. Тому режими руху теплоносіїв, умови теплообміну в НТОУ і границі режимів приймалися гіпотетично. Для переходу в натурні умови теплообміну $\Pi_{\bar{\theta}-\text{н}}$ (2) потрібно спрогнозувати реологічну поведінку суміші в НТОУ.

У випадку, якщо невизначений тип рідини, не визначений режим руху теплоносія, границі режимів, тоді вибір критеріального рівняння для натурних умов теплообміну, за умов виходу із переліку досліджених складних сумішей, може мати високий ступінь невизначеності.

Отже, **метою роботи** є зниження невизначеності оцінювання інтенсивності теплообміну в складних сумішах, теплофізичні властивості яких невизначені, шляхом удосконалень методів та засобів реалізації експериментально-розрахункового методу.

Основні дослідження

Для досягнення поставленої мети розроблена схема досліджень щодо удосконалення ЕРМ (рис. 1) враховуючи попередні напрацювання [5, 8–11].

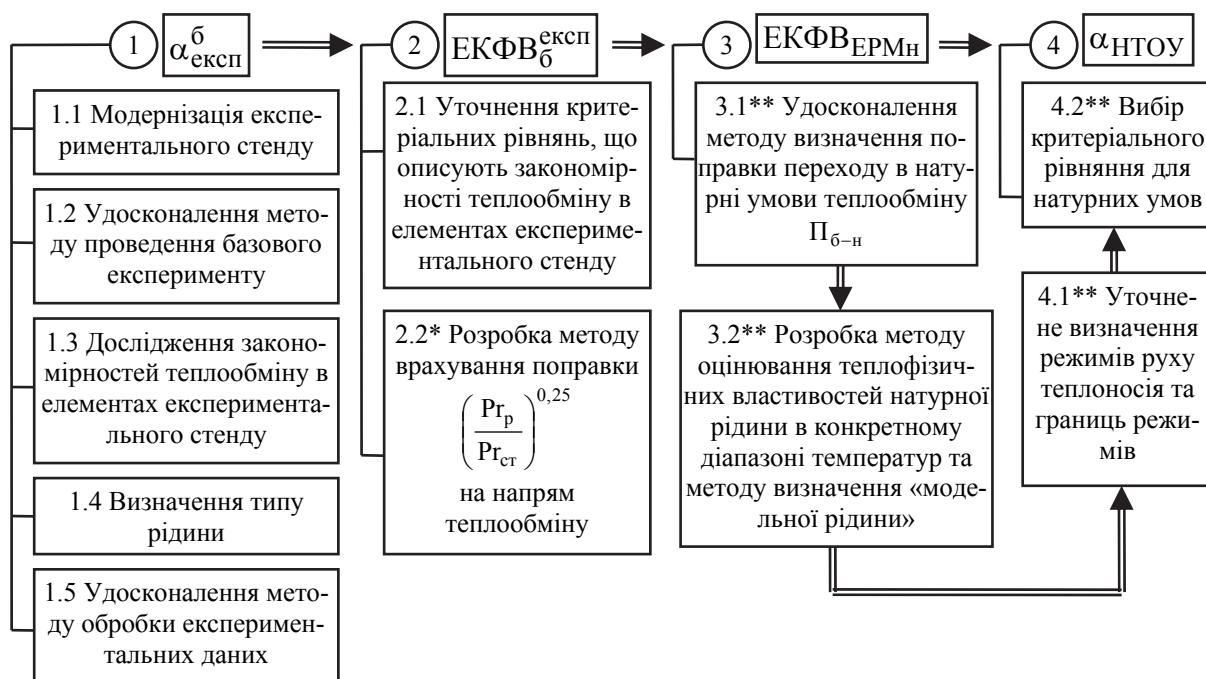


Рис. 1 – Схема досліджень щодо удосконалення ЕРМ. Позначення: * – використання «частково-модельної рідини»; ** – використання «модельної рідини» або оцінених теплофізичних властивостей натурної рідини в конкретному діапазоні температур; пункти, які реалізуються сумісно: 3.1, 3.2, 4.1, 4.2

Модернізація експериментального стенду (1.1, рис. 1) в наступному: в базовий експериментальний стенд добавлена друга установка для дослідження теплообміну за умов вимушеної конвекції (перемішування пропелерною мішалкою); реалізовано вимірювання температур теплоносіїв термометрами опору з аналогово-цифровими перетворювачами в п'яти точках у кожній із робочих порожнин установок, рівномірно розподілених в об'ємі вздовж теплообмінної поверхні. З метою автоматизації збору та обробки експериментальна інформація виводиться на комп'ютер [8, 9].

Для удосконалення методу проведення базового експерименту (1.2, рис. 1) запропоновано експеримент проводити з різною передісторією суміші: свіжа – в стані бродіння; без попереднього руйнування структури натурної суміші, після попереднього руйнування; однократне нагрівання, багатократне нагрівання і охолодження [10].

Дослідження закономірностей теплообміну в елементах експериментального стенду (1.3, рис. 1; рис. 2) реалізовано таруванням установок на рідини з визначеними ТФВ: вода, цукровий розчин 40 %, 50 %, гліцерин, соняшникова олія [8, 9].

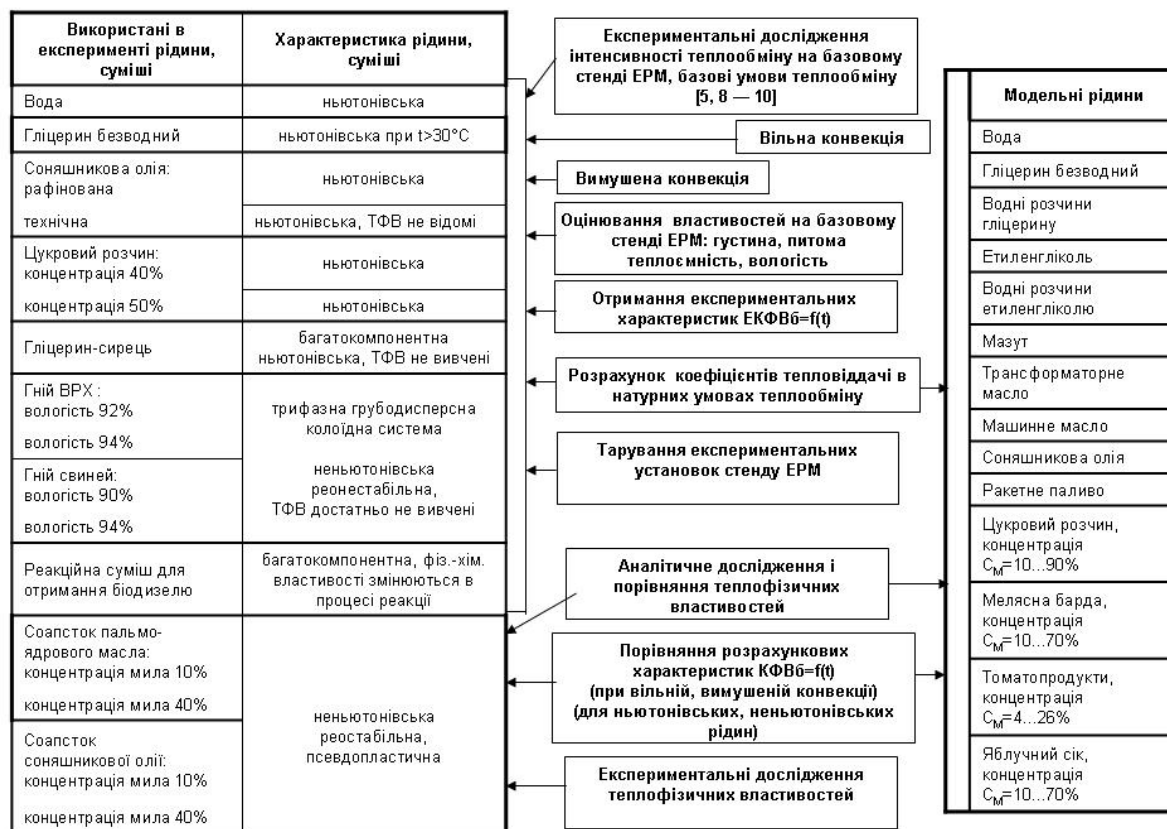


Рис. 2 – Рідини та суміші, використані в дослідженнях по удосконаленню ЕРМ

Для визначення типу рідини (1.4, рис. 1; рис. 2) запропоновано і доведено необхідність проведення багатоваріантного базового експерименту дослідження процесу теплообміну в сумішах, що дає можливість виявити реологічну поведінку натурної суміші, оцінити її реостабільність або реонестабільність, дослідити теплообмін в ній при різних гідродинамічних і теплових умовах [10]; запропоновано метод оцінювання належності суміші до ньютонівських чи неньютонівських рідин, в конкретних теплогідродинамічних умовах на основі аналізу експериментальних залежностей. Базовий експеримент проводиться за умов вимушеної конвекції, шляхом перемішування пропелерною мішалкою.

Визначення типу рідини виконується за допомогою характеристик $\alpha = f(w)$ та $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}} = f(w)$ за умов сталої температури суміші (рис. 3): коефіцієнт тепловіддачі пропорційний характерній швидкості руху суміші $\alpha \sim w^m$, $w = \pi n d_M$, де n – частота обертання мішалки, об/с. Експериментально встановлено на базовому стенді, що для ньютонівських рідин $|m| = 0,1 \dots 0,15$. Якщо $|m| > 0,15$ – присутні ознаки неньютонівської поведінки суміші. Зміна комплексу $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}}$ від w за сталої температури відбувається за рахунок зміни ефективної в'язкості суміші.

Отже якщо для ньютонівської рідини в'язкість залежить лише від температури, то $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}}$ не залежить від w . Чим значніший вплив w на величину $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}}$, тим більше проявляються неньютонівські властивості суміші (рис. 3).

Для удосконалення методу обробки експериментальних даних (1.5, рис. 1) досліджено і оцінено нерівномірності розподілу температур суміші (рідини) вздовж вертикальної теплообмінної поверхні; виконувалось осереднення температури по висоті (середньоарифметична) і в часі (середньоарифметична) в процесі обробки експериментів; запропонована окрема методика обробки експерименту для кожного типу рідини. Обробка експериментів проводилась по середньоарифметичній температурі.

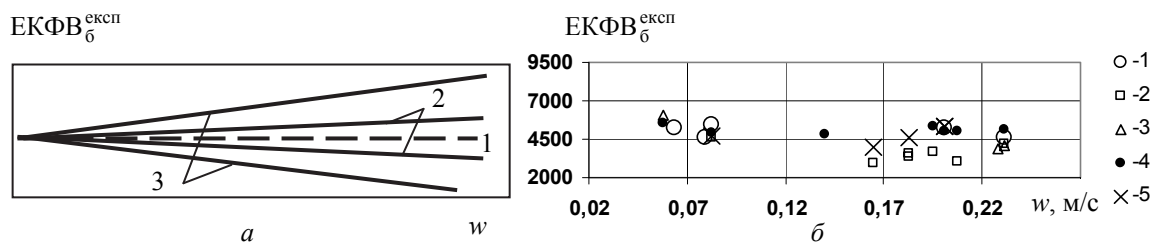


Рис. 3 – Залежності $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}} = f(w)$ для різного класу рідин та сумішей, які поведуть себе як ньютонівське та неньютонівське середовище: а – якісні характеристики для: 1 – ньютонівська суміш; 2 – неньютонівська, близька до ньютонівської; 3 – значно не ньютонівська; б – експериментальні точки, гліцерин дистиллят, 1 – середня температура гліцерину 70...75 °С; 2 – 45...50 °С; 3 – 60...70 °С; 4 – 75...80 °С; 5 – 50...60 °С

Характеристика $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}}(\bar{t})$ (2, рис. 1) відбиває вплив не тільки окремих теплофізичних параметрів суміші в НТОУ, але і їх сукупності на інтенсивність теплообміну. Для уточнення критеріальних рівнянь, що описують закономірності теплообміну в елементах базового експериментального стенду (2.1, рис. 1): розглянуто варіанти вибору визначальних температур та температурних напорів, в процесі обробки експериментальних даних; варіанти умов теплообміну в базовій експериментальній установці [8, 9]; виконано порівняння методик обробки експериментальних даних відповідно до варіантів умов теплообміну [8]; уточнено критеріальні рівняння, якими можна описати теплообмін у посудині з розмірами (згідно існуючих уявлень по теплообміну) на межі «великий об'єм» – «обмежений об'єм» в нестационарних умовах для вільної та вимушеної конвекції [8]. Уточнення критеріальних рівнянь проведено з врахуванням тарування базового експериментального стенду (рис. 2).

Для розробки методу врахування поправки на напрям теплообміну (2.2, рис. 1) виконано наступне [5, 8–10]: розширено перелік потенціальних «модельних рідин» та

базу даних по їх теплофізичним властивостям (рис. 2); виконано аналіз теплофізичних властивостей потенціальних «модельних рідин»; проведено порівняння залежностей розрахункових комплексів фізичних властивостей «модельних рідин» від температур $\left[\text{КФВ}_6^{\text{розн}} \right]_M = f(t)$, за якими розділено «модельні рідин» на групи по теплопровідності;

досліджено залежності $\left[\text{КФВ}_6^{\text{розн}} \right]_M = f(t)$, які відображають зміну теплофізичних властивостей в комплексі від температури, і встановлено що на характер зміни комплексу найбільший вплив має в'язкість і теплопровідність рідини (суміші); введено поняття «частково-модельна рідина», розроблено методи вибору «частково-модельної рідини».

Прогнозування $\alpha_{\text{НТОУ}}$ потребує удосконалення методу визначення поправки переходу із базового в натурні умови теплообміну Π_{6-n} (3.1, 3.2, рис. 1), в межах цього питання розроблено методи вибору «модельної рідини», за допомогою якої можна описати натурну суміш в конкретних теплогідродинамічних умовах [5, 8, 9]; запропоновано метод оцінювання теплофізичних властивостей натурної рідини в конкретному діапазоні температур для однофазних багатокомпонентних рідин та сумішей [8].

Для вибору критеріального рівняння для конкретних натурних умов (4.1, 4.2, рис. 1) встановлено необхідність, враховуючи тип суміші, виконання перевірки умов теплообміну і визначення режимів руху теплоносія та границь режимів з використанням теплофізичних властивостей «модельних рідин» або оцінених теплофізичних властивостей натурної рідини (п. 3.1, рис. 1); виконано структурування критеріальних залежностей і отримано рівняння для визначення поправки переходу Π_{6-n} [8–10].

Таким чином, в алгоритмі переходу від $\alpha_{\text{експ}}^6$ до $\alpha_{\text{НТОУ}}$ (2) основним для зниження невизначеностей оцінених $\alpha_{\text{НТОУ}}$, є визначення типу рідини, достовірність прогнозування реологічного стану суміші в натурних умовах, режимів руху та умов теплообміну в НТОУ. Крім того, точність тарування експериментальних установок (або визначення базових умов теплообміну) в системі ЕРМ, точність результатів базового експерименту та методів його обробки – це є фундаментом, невід'ємною складовою надійності ЕРМ. У цьому просліджується зворотний взаємозв'язок (взаємовплив) надійності результатів експериментальної частини та надійності розрахункових алгоритмів ЕРМ.

Досліджено і обґрунтовано принципи вибору «модельних рідин». Крім «модельної рідини» введено поняття «частково-модельної рідини», що дозволило суттєво підвищити надійність переходу із базового в натурні умови і визначити інтенсивність теплообміну в натурних рідинах (табл.). У результаті нами сформовано вимоги до вибору «модельної рідини» і методи застосування її ТФВ в ЕРМ для ньютонівських рідин та близьких до ньютонівських, неньютонівських реостабільних сумішей (табл.). Метод вибору частково-модельної рідини $\text{МВ}_{\text{чмр}2}$ містить елементи методу $\text{МВ}_{\text{мр}2}$, а $\text{МВ}_{\text{чмр}1}$ – окремо розроблений метод (табл.). Розроблені в рамках ЕРМ методи (табл.) справедливі для визначення інтенсивності теплообміну у ньютонівських багатокомпонентних, близьких до ньютонівських (індекс текучості $n \approx 1$), сумішах, рідинах, розчинах.

Таблиця

Варіанти реалізації експериментально-розрахункового методу

Варіанти	Для визначення $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}}$	Для розрахунку $\alpha_{\text{нтоу}}$	Застосовуються для рідин і сумішей
	Метод врахування поправки на напрям теплообміну	Метод переходу із базового в натурні умови теплообміну	
I реалізація	$(Pr_p/Pr_c)_{\text{I}}^{0,25} = f(\overline{\Delta t})$	$\Pi_{\text{ш(б)}} = f[(\text{КФВ})_6]$, $(Pr_p/Pr_{\text{ст}})^{0,25} = f(\overline{\Delta t})$	Ньютонівські та близькі до ньютонівських
IIa	$(Pr_p/Pr_c)_{\text{I}}^{0,25} \{ \text{ТФВ МР} \}$ МВ _{мр} 1	$\Pi_{\text{б-н}} [\text{ТФВ МР}]$ $(Pr_p/Pr_{\text{ст}})^{0,25} [\text{ТФВ МР}]$ МВ _{мр} 1	— // —
IIб	$(Pr_p/Pr_c)_{\text{II}}^{0,25} \{ \text{ТФВ ЧМР} \};$ МВ _{чмр} 1	$\Pi_{\text{б-н}} [\text{ОцТФВ, ТФВ МР}]$ $(Pr_p/Pr_{\text{ст}})^{0,25} [\text{ОцТФВ, ТФВ МР}]$ МВ _{мр} 2	— // —

Позначення в таблиці: ТФВ МР – теплофізичні властивості «модельної рідини»; ОцТФВ – оцінені реальні теплофізичні властивості натурної рідини; ТФВ ЧМР – теплофізичні властивості «частково-модельної рідини»; МВ_{мр}1, 2 – методи вибору «модельної рідини»; МВ_{чмр}1 – методи вибору «частково-модельної рідини».

В результаті сумісного аналізу методів визначення поправок на напрям теплообміну і переходу з базового в натурні умови теплообміну для ньютонівських і неньютонівських рідин, в ЕРМ прийнято наступне.

Зміну ТФВ досліджуваної натурної суміші в динаміці зміни температур у теплообмінному процесі характеризує «частково-модельна рідина» (ЧМР), яка підбирається відповідно до умов:

$$\sup \text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}} \in \sup [\text{КФВ}_6^{\text{розр}}]_{\text{М}} \text{ в діапазоні температур } \overline{t_c} \dots t_{\text{ст}}, \quad (5)$$

за наявності розрахункової залежності $Pr_{\text{чмр}} = f(\{ \text{КФВ}_6^{\text{розр}} \}_{\text{чмр}})$,

де $\overline{t_c}$ і $t_{\text{ст}}$ – характерна температура натурної суміші і твердої стінки.

Фізичні властивості «модельної рідини» (МР) для ньютонівських багатокомпонентних, близьких до ньютонівських рідин у повній мірі еквівалентні натурній рідині в конкретних умовах. «Модельна рідина» характеризує зміну ТФВ досліджуваної суміші як в динаміці зміни температур, так і при сталій температурі. Використовується для визначення поправок на напрям теплообміну і поправки переходу із базового в натурні умови, уточнення режимів руху та умов теплообміну в натурних установках. Підбирається за умовами (МВ_{мр}2)

$$\Phi_{\text{М}} \rightarrow \min; \quad \Phi_{\text{с}} \rightarrow \min; \quad \overline{t_c} = t_{\text{М}}, \quad (6)$$

$$\text{де } \Phi_{\text{М}} = \frac{\partial [\text{КФВ}_6^{\text{розр}}]_{\text{М}}}{\partial t} - \frac{\partial [\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}}]_{\text{с}}}{\partial \overline{t}}; \quad \Phi_{\text{с}} = [\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}}]_{\text{с}} - [\text{КФВ}_6^{\text{розр}}]_{\text{М}}.$$

Варіанти вибору і застосування ЧМР (5) і МР (6) зумовлені обмеженою кількістю рідин та розчинів з дослідженими ТФВ. Якщо до натурної суміші, яка відноситься до ньютонівських багатокомпонентних, або близьких до ньютонівських неможливо підібрати «модельну рідину» за умовами (5), тоді вибирається «частково-

модельна рідина» за (6) для отримання базових характеристик $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}} = f(\bar{t})$. Далі проводиться оцінювання реальних ТФВ характеристик натурної суміші, за якими розраховується поправка переходу з базового в натурні умови. Умови (5), (6) справедливі у випадку проведення базового експерименту в системі ЕРМ у випадку природної і вимушеної конвекції.

З метою перевірки ефективності запропонованих методів і засобів в конкретному прикладі (рис. 4) за натурну рідину з «невідомими теплофізичними властивостями» прийнято гліцерин-дистилат, теплофізичні властивості якого відомі. Відповідно до ЕРМ виконано базовий експеримент, отримано залежність $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}} = f(\bar{t})$. З використанням цієї залежності визначено коефіцієнти тепловіддачі в натурних умовах теплообміну $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ (рис. 4) за методами ЕРМ першої реалізації (точки 1, рис. 4) та удосконаленим ЕРМ (точки 2, рис. 4). Середні значення температурних напорів знаходились у межах 8...23 °С. Розрахункові коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_{\text{розн}}$ (рис. 4) визначені за тих же умов із застосуванням критеріальних рівнянь та теплофізичних властивостей гліцерину-дистилату. Для $\alpha_{\text{ЕРМ}}$, визначених за ЕРМ першої реалізації, середньоквадратичне відхилення значень $\alpha_{\text{ЕРМ}}/\alpha_{\text{розн}}$ від одиниці дорівнює $\sigma^+ = 0,21$ (рис. 4). Для $\alpha_{\text{ЕРМ}}$, визначених за удосконаленим ЕРМ, $\sigma^+ = 0,096$ (рис. 4). Слід відмітити – вдосконалений ЕРМ дозволив надійно встановити, що в НТОУ відбувається тепловіддача за умов вільного турбулентного руху вздовж вертикальної плоскої стінки.

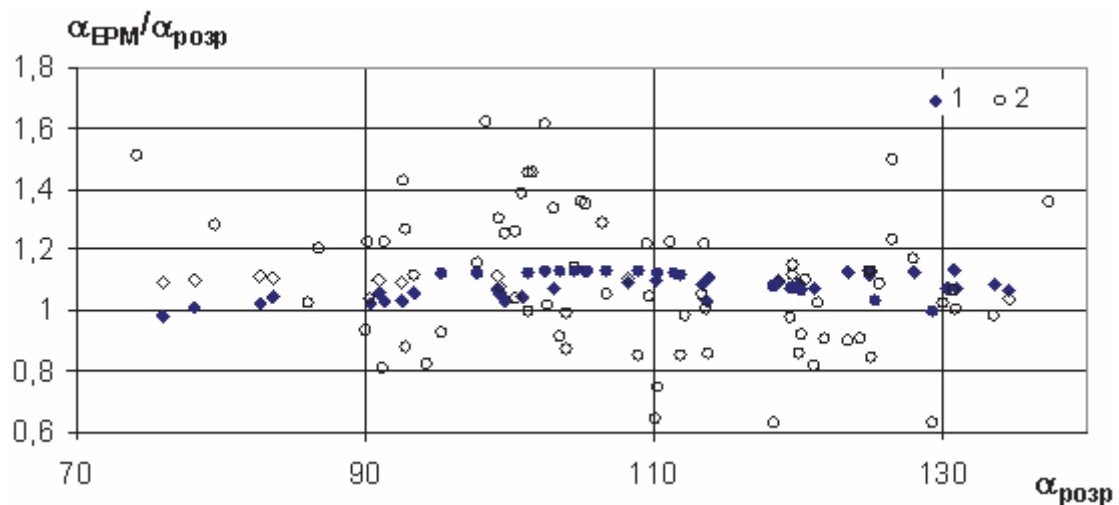


Рис. 4 – Зіставлення коефіцієнтів тепловіддачі, визначених за ЕРМ із розрахунковими: робоче середовище гліцерин-дистилат; тепловіддача за умов вільного турбулентного руху вздовж вертикальної стінки: 1 – $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ визначено за ЕРМ першої реалізації; 2 – за удосконаленим ЕРМ

Отже, система ЕРМ дозволяє за експериментальними результатами інтенсивності теплообміну в суміші, одержаними на портативному експериментальному стенді, використовуючи в нетрадиційному аспекті теорію подібності, визначати інтенсивність теплообміну в натурних теплообмінних установках. Тоді, як традиційний метод визначення коефіцієнтів тепловіддачі призводить до необхідності спорудження громіздких, енергоємних установок [6, 7, 12].

Висновки

З метою зниження невизначеностей оцінювання інтенсивності теплообміну в складних сумішах:

1) Запропоновано метод встановлення типу натурних рідин, сумішей, розчинів шляхом багатоваріантного дослідження інтенсивності теплообміну в них, що дозволило кардинально знизити невизначеності оцінювання інтенсивності теплообміну в складних сумішах, теплофізичні властивості яких недосліджені.

2) Розроблено метод врахування поправки впливу напряму передачі теплоти на інтенсивність теплообміну для випадку, коли недосліджені теплофізичні властивості речовини та удосконалено метод трансформування коефіцієнтів теплообміну, визначених в базовому експерименті, в коефіцієнти для натурних об'єктів, за рахунок введення понять «частково-модельної рідини», «модельної рідини».

3) Вперше запропоновано і науково обґрунтовано методи вибору «модельної» та «частково-модельної рідини» у конкретних теплогідродинамічних умовах та застосування їх теплофізичних властивостей для визначення інтенсивності теплообміну в складних сумішах.

4) Розроблено метод оцінювання теплофізичних властивостей натурної рідини в конкретному діапазоні температур, що дало можливість оцінювання режиму руху теплоносіїв, прогнозування умов теплообміну в натурній теплообмінній установці, вибору для натурних умов критеріального рівняння.

5) Модернізовано експериментальний стенд за рахунок додаткового введення установки дослідження інтенсивності теплообміну при перемішуванні.

6) Досліджено умови теплообміну в стенді, шляхом тарування з використанням рідин, теплофізичні властивості яких відомі.

7) Удосконалено методи проведення базового експерименту і обробки експериментальних даних, за рахунок організації вимірювання розподілу температур та автоматизації збору інформації.

На конкретному прикладі показано, що перераховані заходи призвели до зменшення середньоквадратичного відхилення значень $\alpha_{ЕРМ}/\alpha_{розр}$ від одиниці з $\sigma^+ = 0,21$ (до реалізації методів та засобів зниження невизначеностей) до $\sigma^+ = 0,096$ (після реалізації).

Список літератури: 1. *Ткаченко, С. Й.* Нові аспекти застосування теорії подібності в теплотехнічних розрахунках систем біоконверсії [Електронний ресурс] / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // Електронний журнал Наукові праці ВНТУ. Енергетика та електротехніка. – 2009. – № 2. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1094/236> – 17.01.2014. 2. *Ткаченко, С. Й.* Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії [Текст]: моногр. / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2011. – 132 с. – ISBN 978-966-641-396-6. 3. Пат. 24616 України на корисну модель, (51) МПК (2006.01) G01N25/18. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші / Ткаченко С. Й., Резидент Н. В.; Заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № 200701190; заявл. 05.02.07; опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10. 4. *Исаченко, В. П.* Теплопередача [Текст]: учеб. для вузов / В. П. Исаченко [и др.]. – [3-е изд. доп.]. – М.: Энергия, 1975. – 488 с. 5. *Ткаченко, С. Й.* Удосконалення експериментально-розрахункового методу [Текст] / С.Й. Ткаченко, Н.В. Пішеніна, Н.В. Резидент // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика : наук. зб. – 2010. – № 2. – С. 171–183. – ISSN 2077-1134. 6. *Богданов, П. В.* Система подогрева жидкого свиного навоза в технологиях анаэробного сбраживания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 «механизация сельскохозяйственного производства» / Богданов Павел Викторович; Всесоюзный научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. – М.: ВИЭСХ, 1990. – 18 с. 7. *Бердыев, О.* Экспериментальное исследование теплообмена в установках по выработке биогаза: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 «промышленная теплоэнергетика»; Научно-производственное объединение «Солнце» / Бердыев Овезмурад. – Ашхабад, 1989. – 24 с.

8. 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. 9. 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. 10. 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. 11. Морमितко, В. Г. Изменение реологических свойств соапстоков в зависимости от перерабатываемого сырья / В. Г. Морमितко, В. З. Глоба, Б. А. Дехтерман, В. С. Косачев, П. Г. Глоба, С. И. Ткаченко // Известия вузов, Пищевая технология. – 1983. – № 4. – С. 85–88. – ISSN 0579-3009. 12. Chen, Y. R. Heat Transfer in Laminar Tube Flow of Beef Cattle Manure Slurries / Y. R. Chen // Transactions of the ASAE. – May/June 1988. – V. 31 (3). – P. 892–897.

Bibliography (transliterated): 1. Tkachenko, S. J., and N. V. Rezydent. "Novi aspekty zastosuvannja teorii' podobnosti v teplotehnichnyh rozrahunkah system biokonversii." *Elektronnyj zhurnal Naukovi praci VNTU. Energetyka ta elektrotehnika* 2 (2009). KIBIC BHTU, 2006. – Web. 17 January 2014. <<http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1094/236>>. 2. Tkachenko, S. J., and N. V. Rezydent. *Teplomasoobminni ta gidrodinamichni procesy v elementah system biokonversii*. Vinnytsja: Universum–Vinnytsja, 2011. ISBN 978-966-641-396-6. Print. 3. Tkachenko S. J., and Rezydent N. V. "Sposib vyznachennja koeficienta teploviddachi za umov konvektyvnoho teploobminu organichnoi' sumishi." U Patent 24616 (51) (MPK (2006.01) G01N25/18) 10 July 2007. 4. Isachenko, V. P., et al. *Teploperedacha*. Moscow: Jenergiya, 1975. Print. 5. Tkachenko, S. J., N. V. Pishenina and N. V. Rezydent. "Udoskonalennja eksperymental'no-rozrahunkovogo metodu." *Tekhnichna teplofizyka ta promyslova teploenergetyka*. No. 2. 2010. 171–183. ISSN 2077-1134. Print. 6. Bogdanov, P. V. *Sistema podogreva zhidkogo svinogo navoza v tehnologijah anaerobnogo sbrazhivanja: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk*. Moscow: VIJeSH, 1990. Print. 7. Berdyev, O. *Jeksperimental'noe issledovanie teploobmena v ustanovkah po vyrabotke biogaza: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk*. Ashhabad, 1989. Print. 8. Tkachenko, S. J., and N. V. Pishenina. "Zastosuvannja ponjattja «model'na ridyna» v eksperymental'no-rozrahunkovomu metodi." *Visnyk Vinnyc'kogo politechnichnogo instytutu*. No. 3. 2012. 103–110. ISSN 1997-9266. Print. 9. Pishenina, N. V. "Teploobmin v skladnyh sumishah v umovah pryrodnoi' konvekicii." *Suchasni tehnologii', materialy i konstrukcii' v budivnyctvi*. No. 2. Vinnytsja: Universum–Vinnytsja, 2011. 124–131. Print. 10. Tkachenko, S. J., N. V. Pishenina. "Metod vyznachennja intensyvnosti teploobminu v reonestabil'nyh sumishah." *Suchasni tehnologii', materialy i konstrukcii' v budivnyctvi*. No. 2. Vinnytsja: Universum–Vinnytsja, 2012. 78–87. Print. 11. Morमितко, V. G., et al. "Изменение реологических свойств соапстоков в зависимости от перерабатываемого сыр'я." *Izvestija vuzov, Pishhevaja tehnologija* 4 (1983) 85–88. ISSN 0579-3009. Print. 12. Chen, Y. R. "Heat Transfer in Laminar Tube Flow of Beef Cattle Manure Slurries." *Transactions of the ASAE*. Vol. 31 (3). May/June 1988. 892–897. Print.

Поступила (received) 06.02.2014