

УДК 536.24:631.371

ТЕПЛОБМІН В СКЛАДНИХ СУМІШАХ В УМОВАХ ПРИРОДНОЇ КОНВЕКЦІЇ

Н. В. Пішеніна

Створено експериментальний стенд для визначення комплексу фізичних властивостей рідин з обмеженою інформацією щодо теплофізичних властивостей. Запропоновано методику обробки експериментальних даних. Досліджено умови теплообміну в елементах портативної експериментальної установки в системі експериментально-розрахункового методу.

Создано экспериментальный стенд для определения комплекса физических свойств жидкостей и смесей, информация по теплофизическим свойствам для которых ограничена. Предложено методику обработки экспериментальных данных. Исследовано условия теплообмена в элементах портативной экспериментальной установки в системе экспериментально-расчетного метода.

Improved experimental stand to determine the physical properties of complex fluids and mixtures, information on thermophysical properties for which limited. Proposed a method of processing experimental data. The conditions of heat transfer in a portable elements of the experimental setup in the experimental-calculation method.

Вступ, постановка задачі

Основними фізико-хімічними величинами, які характеризують теплообмін, є базові теплофізичні властивості, такі як коефіцієнти динамічної в'язкості μ , кінематичної в'язкості ν , теплопровідності λ , густина ρ , теплоємність c . Для визначення фізичних властивостей рідких органічних речовин також використовують комплексні величини, такі, як параметр реохора, парахора, ортохора, вони містять комплекс (набір) теплофізичних властивостей (ТФВ) [1].

При проектуванні теплотехнологічного обладнання, робочим середовищем в яких є складні суміші і рідини, і для яких інформація щодо теплофізичних властивостям обмежена, виникають складнощі при визначенні коефіцієнтів тепловіддачі та теплопередачі в елементах цього обладнання. Суміші є полі компонентними і багатофазними середовищами, склад яких може змінюватись з часом і залежить від умов їх отримання, умов і часу зберігання до переробки, способу транспортування тощо. Різноманіття комбінацій сумішей, органічне їх походження та структура ускладнює проведення експериментального дослідження ТФВ сумішей в лабораторіях [2].

Існують залежності, номограми для визначення ТФВ розчинів, суспензій, емульсій. Щоб використати ці формули потрібно знати компонентний склад суміші (рідини), будову молекул компонентів, характеристики міжатомних взаємодій, або одне значення ТФВ для даних умов і закон змінювання ТФВ від температури, тиску [1]. Також для визначення ТФВ користуються методами аналогії властивостей різних речовин за допомогою теорії відповідних станів речовин [1]. Застосування цих методів можливе тільки для речовин, які належать до одного класу та близькі за своєю будовою. Виявити до якого класу належить рідина (суміш), інформація щодо ТФВ якої обмежена, складно.

Відповідно до зазначеного вище, виникла проблема визначення ТФВ складних сумішей, рідин. Авторами [2, 3] розроблено оригінальний експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ), який дозволяє проводити розрахунки коефіцієнта тепловіддачі до складних сумішей і рідин з точністю до 35 %. ЕРМ передбачає проведення базового експерименту з використанням зразка рідини або суміші, для якої інформація щодо теплофізичних властивостей обмежена. Базовий експеримент проводиться на портативній експериментальній установці, в результаті якого визначається базовий комплекс фізичних властивостей $KФВ_6$ [2-4]. $KФВ_6$ являє собою набір теплофізичних властивостей, що відповідає тому критеріальному рівнянню, яке описує відповідний режим теплообміну в експериментальній установці. Тобто введена комплексна величина $KФВ_6$ – спеціалізована і пристосована до умов і режимів теплообміну, які здійснюються в конкретній базовій експериментальній установці. У випадку, коли інформація що теплофізичних властивостей речовини обмежена, але є експериментальний зразок досліджуваної суміші, тоді в ролі початкових даних про властивості речовини також виступає $KФВ_6$, який отримуємо в

результаті базового експерименту.

Отже, визначення комплексу фізичних властивостей КФВ₆, застосування цього комплексу в розрахунках, висуває помірні вимоги до базового експериментального стенда в системі ЕРМ і високі вимоги до методики обробки експериментальних даних. Основною вимогою до експериментальної установки є компактність і простота конструкції, що зумовило відносно невеликі геометричні розміри робочих об'ємів та теплообмінної поверхні. Відповідно до цього, виникає невизначеність щодо режиму теплообміну який здійснюється в установці – в умовах природної конвекції у великому об'ємі, чи природної конвекції в обмеженому просторі.

Відповідно до [5] великим об'ємом є такий об'єм рідини, що вільний рух, який виникає біля інших тіл в цьому об'ємі, не впливає на течію біля теплообмінної поверхні, яка розглядається. Вважається, що швидкість руху рідини вдалині від теплообмінної поверхні дорівнює нулю, визначальною температурою t_b для розрахунку критеріїв подібності є температура рідини за межами рухомого шару t_c . При цьому середня тепловіддача вертикальної пластини у великому об'ємі визначається за такими залежностями [5]:

ламінарна течія	при $t_c = \text{const}$	$\overline{Nu} = 0,63 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}$;
	при $q_c = \text{const}$	$\overline{Nu} = 0,75 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot (Pr_p / Pr_c)^{0,25}$;
турбулентний рух		$\overline{Nu} = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33} \cdot (Pr_p / Pr_c)^{0,25}$.

Авторами [6-9] зазначено, що теплообмін у великому об'ємі (необмеженому просторі) – це теплообмін в умовах, коли розміри тіла, яке порушує теплову рівновагу, малі, порівняно з об'ємом рідини. Визначальною температурою при розрахунках теплообміну в умовах вільної конвекції приймається середня температура між температурою стінки t_c та $t_{c0} = (t_c + t_{c0})/2$.

В обмеженому об'ємі в умовах природної конвекції товщина примежевого шару біля обмежувальних поверхонь стає співрозмірною з геометричними розмірами самого простору. В такому випадку процеси нагрівання і охолодження неможливо розглядати незалежно. Якщо у великому об'ємі інтенсивність тепловіддачі майже не залежить від форми теплообмінної поверхні, то в обмеженому об'ємі формування швидкісного і температурного полів в рідині відбувається під сильним впливом форми стінок [5, 8]. В режимі ламінарної конвекції найбільш інтенсивне перенесення теплоти відбувається в порожнині з $h/\delta \sim 1,5$ [10]. Рух в рідині при наявності вертикального градієнта густини та бокового підведення теплоти має комірчастий характер. При цьому густина рідини з часом не вирівнюється між комірками, а в кожній комірці густина має визначене, відмінне від суміжних комірок значення [5, 10-12]. Залежності для розрахунку тепловіддачі в обмеженому об'ємі мають різну структуру (табл. 1) [6-12].

Мета роботи – створення експериментального стенда малих розмірів (настільного стенда) для визначення комплексу фізичних властивостей (КФВ₆) рідини з обмеженою інформацією щодо теплофізичних властивостей.

Основні дослідження

Розроблено експериментальну установку для проведення базового експерименту [2]. При проведенні оціночних досліджень авторами визначено, що умови теплообміну для обох теплоносіїв, які здійснюються в установці – вільна конвекція у великому об'ємі біля вертикальної стінки, режим течії ламінарний [2].

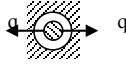

В процесі проведення досліджень експериментальну установку для проведення базового експерименту було модернізовано. Установка (рис.1) складається із зовнішньої металевої посудини 1 з циліндричними стінками, зовнішня поверхня якої ізольована, внутрішньої металевої циліндричної посудини 2 та ізольованої ззовні металевої кришки 4. Посудина 2 коаксіально розміщується в посудині 1 за допомогою фіксуєної підставки 3, утворюючи циліндричну теплообмінну поверхню. Таким чином, основними елементами установки є дві робочі порожнини – зовнішня, кільцевий канал ємністю V_1 , та внутрішня, ємністю V_2 . Співвідношення об'ємів $V_1/V_2 = 3,7$. Висота циліндричної теплообмінної поверхні $H_1 = 0,108$ м. Фіксуєная підставка 3 виконана із матеріалу з малим значенням коефіцієнта теплопровідності.

Досліджуваними рідинами з умовно невідомими ТФВ для експерименту були прийняті рідини з відомими теплофізичними властивостями: вода, гліцерин. В процесі проведення базового експерименту температура холодного теплоносія (досліджуваної рідини) змінюється в межах 25...75 °С. Вибрані для досліджень рідини характерні тим, що вони належать до різних класів, та теплофізичні властивості цих рідин в залежності від температури змінюються за різними

закономірностями. Зміна теплофізичних властивостей вибраних рідин в даному діапазоні температур показано в табл. 2.

Таблиця 1

Приклади залежностей для розрахунку тепловіддачі в обмеженому об'ємі

Форма обмеженого простору, напрям теплового потоку	Критеріальне рівняння, залежність	Визначальні параметри		Літературне джерело
		температура	лінійний розмір	
Кільцева щілина $10^6 \leq Gr_\delta \cdot Pr < 10^8$	$\lambda_g/\lambda = 0,4(Gr_\delta \cdot Pr)^{0,2}$ $q = 2\pi \cdot \lambda_g \cdot (t_1 - t_2) / \ln(d_1/d_2)$ λ_g – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності; λ – коефіцієнт теплопровідності рідини	$t = 0,5(t_1 + t_2)$ t_1, t_2 – температури на границях шару;	$\delta = 0,5(d_1 - d_2)$	[7, 8]
	$\lambda_g/\lambda = 1 + [0,119(Gr_\delta \cdot Pr)^{1,27} / (Gr_\delta \cdot Pr + 1,45 \cdot 10^{-4})]$ d_1, d_2 – зовнішній та внутрішній діаметри кільцевої щілини			[7, 11]
	$\lambda_g/\lambda = 1 + [0,0236(Gr_\delta \cdot Pr)^{1,393} / (Gr_\delta \cdot Pr + 1,01 \cdot 10^{-4})]$		Відстань між вертикальними поверхнями δ	[6, 7]
Обмежений простір, утворений вертикальними плоскими поверхнями $10^3 < Gr_\delta \cdot Pr < 10^7$; $5 < h/\delta < 20$	Для крапельних рідин: вода, спирт, масло, гліцерин $\overline{Nu} = 0,28 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot (h/\delta)^{-0,25}$	температура рідини на віддаленні від поверхні t_∞ .		[10]
Обмежений простір, утворений поверхнями циліндричного профілю (коаксіальні циліндри) $\frac{h}{d_1} \cdot Ra_h^{-0,25} < 0,1$	при умові, що температури стінок поверхонь 1 і 2 $t_1, t_2 = \text{const}$ та δ достатньо великі, порівняно з товщиною приграничних шарів $\overline{Nu} = 0,48 \cdot Ra_h \left[6830 \cdot \left(\frac{h}{d_2}\right)^4 \frac{d_1}{h} + Ra_h^{0,75} \right]^{-1}$	$t_m = 0,5(t_c + t_\infty)$	Висота поверхонь h	[9]

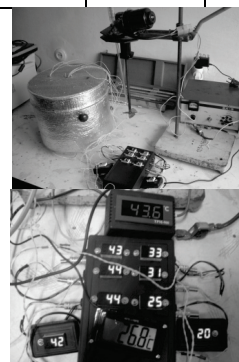
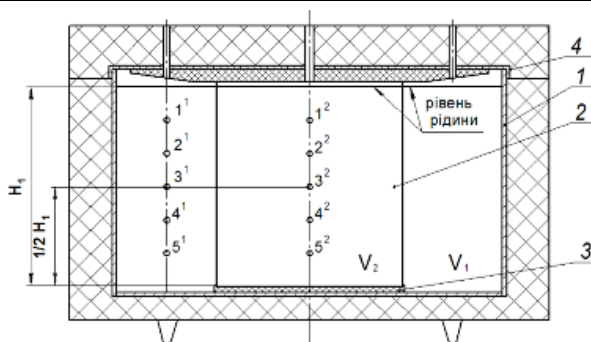


Рис. 1. Установка для проведення базового експерименту в системі ЕРМ

Таблиця 2

Теплофізичні властивості рідин при зміні температури від 25 до 75°C

Рідина	Динамічна в'язкість μ , Па·с		Теплопровідність λ , Вт/(м ² К)		Густина ρ , кг/м ³		Теплоємність c , кДж/(кгК)	
	25°C	75°C	25°C	75°C	25°C	75°C	25°C	75°C
Вода	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	0,605	0,665	997	975	4,18	4,19
Гліцерин 100%	1,2	$5,2 \cdot 10^{-2}$	0,279	0,286	1258	1228	2,37	2,64

Із табл. 2 видно, що в'язкість гліцерину зі зміною температури зменшується в 23 рази, а води – лише в 2,4 рази. Теплопровідність гліцерину менша за теплопровідність води в 2,2...2,3

раза. Теплоємність гліцерину менша за теплоємність води в 1,6..1,8 раза. Розрахунок теплообміну в елементах експериментального стенда проводився для таких умов: природна конвекція у великому об'ємі, природна конвекція в обмеженому просторі (табл. 3.)

Таблиця 3

Варіанти розрахунку теплообміну в елементах експериментального стенда

№ п/п	Елементи експериментальної установки	
	Кільцевий канал	Внутрішня порожнина
1	Природна конвекція у великому об'ємі, вертикальна стінка, розрахункова формула [5]	
	ламінарний режим $10^3 < Ra < 10^9$	$\overline{Nu} = 0,75 \cdot Ra_h^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,25}$;
	турбулентний режим $Ra > 10^9$	$\overline{Nu} = 0,15 \cdot Ra_h^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,25}$.
2	Природна конвекція в просторі, обмеженому вертикальними коаксіальними циліндрами, розрахункова формула [10]	
	при $\frac{h}{d_1} \cdot Ra_h^{-0,25} < 0,1$	при $0,25 < h/d < 2$; $Pr > 0,5$; $Ra = 10^6 \dots 10^{10}$
	$\overline{Nu} = 0,48 \cdot Ra_h \cdot \left[6830 \cdot \left(\frac{h}{d_2} \right)^4 \cdot \frac{d_1}{h} + Ra_h^{0,75} \right]^{-1}$	$\overline{Nu} = 0,52 \cdot Ra_d^{0,25}$

Для обробки експериментальних даних нами запропонована уточнена методика, яка полягає в тому, що:

- із рівняння теплового балансу визначаємо теплоємність досліджуваної рідини $\overline{c}_{експ}$;
- будуємо графічну залежність отриманих значень $\overline{c}_{експ}$ від середньої температури досліджуваної рідини $\overline{c}_{експ} = f(t_2)$;
- визначаємо величину теплового потоку, який прийнятий холодним теплоносієм Q_2 , з використанням залежності $\overline{c}_{експ} = f(t_2)$. Для подальших розрахунків приймаємо Q_2 за визначальний тепловий потік. Розраховуємо експериментальне значення коефіцієнта тепловіддачі $k_{експ}$ за Q_2 .

Приклад застосування способу визначення теплоємності досліджуваної рідини $\overline{c}_{експ}$ та зіставлення отриманих експериментально $\overline{c}_{експ}$ і табличних $c_{табл}$ значень теплоємності подано на рис. 2. Визначення $\overline{c}_{експ}$ проводилося на експериментальному стенді в системі ЕРМ з врахуванням можливих тепловтрат. Для цього попередньо було проведено оцінювання величини тепловтрат експериментальної установки в залежності від часу проведення експерименту т.

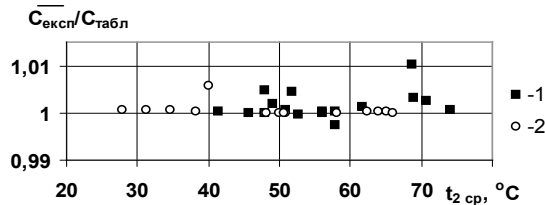


Рис. 2. Зіставлення експериментальних $\overline{c}_{експ}$ і табличних $c_{табл}$ значень теплоємності: 1 – гліцерин; 2 – вода

Коефіцієнти теплопередачі, які отримані експериментально, порівнювалися з розрахунковими значеннями коефіцієнтів теплопередачі. Варіанти методик вибору визначальних температур та температурних напорів в процесі обробки експериментальних даних наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Варіанти вибору визначальних температур та температурних напорів, в процесі обробки експериментальних даних

№ методики	K _{експ}		Середній температурний напір, °C	K _{розр}		Температура стінки
	Визначальна температура для розрахунку теплового потоку, °C			Визначальна температура для вибору теплофізичних властивостей, °C		
	Q ₁ Кільцевий канал	Q ₂ Внутрішня порожнина		Кільцевий канал	Внутрішня порожнина	
1	осереднена по 5-ти точках і в часі, \bar{t}_1	осереднена по 5-ти точках і в часі, \bar{t}_2	$\bar{\Delta t} = \bar{t}_1 - \bar{t}_2$	осереднена по 5-ти точках і в часі, \bar{t}_1	осереднена по 5-ти точках і в часі, \bar{t}_2	Вода-вода: $\bar{t}_c = \bar{t}_1 - 0,45 \cdot \bar{\Delta t}$ Вода-гліцерин: $\bar{t}_c = \bar{t}_1 - 0,25 \cdot \bar{\Delta t}$
2	осереднена по 5-ти точках і в часі, \bar{t}_1	осереднена по 5-ти точках і в часі, \bar{t}_2	$\bar{\Delta t} = \bar{t}_1 - \bar{t}_2$	максимальна по висоті теплообмінної поверхні, осереднена в часі, \bar{t}_1^{\max}	мінімальна по висоті теплообмінної поверхні, осереднена в часі, \bar{t}_2^{\min}	Вода-вода: $\bar{t}_c = \bar{t}_1 - 0,5 \cdot \bar{\Delta t}$ Вода-гліцерин: $\bar{t}_c = \bar{t}_1 - 0,25 \cdot \bar{\Delta t}$
3	осереднена по 5-ти точках і в часі, \bar{t}_1	осереднена по 5-ти точках і в часі, \bar{t}_2	$\bar{\Delta t}^* = \bar{t}_1^{\max} - \bar{t}_2^{\min}$	максимальна, осереднена в часі**, \bar{t}_1^{\max}	мінімальна, осереднена в часі**, \bar{t}_2^{\min}	Вода-вода: $\bar{t}_c = \bar{t}_1 - 0,5 \cdot \bar{\Delta t}$ Вода-гліцерин: $\bar{t}_c = \bar{t}_1 - 0,25 \cdot \bar{\Delta t}$

** – Примітка. При визначенні поправки на напрямок теплообміну $(Pr_p/Pr_{cr})^{0,25}$ для обох теплоносіїв, значення критеріїв Прандтля за температурою рідини Pr_p приймалися за температурами t_1 та t_2

На рис. 3 показано характер зміни максимальних, мінімальних та осереднених по висоті теплообмінної поверхні (\bar{t}_1 , \bar{t}_2) температур в часі у кільцевому каналі та внутрішній порожнині, принцип визначення середніх температурних напорів $\bar{\Delta t}$ та $\bar{\Delta t}^*$.

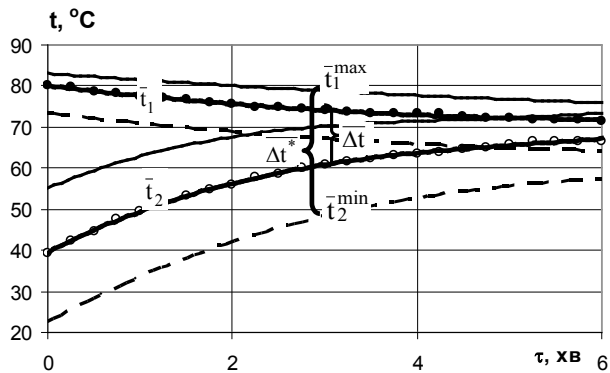


Рис. 3. Визначення середніх температурних напорів

$$\bar{\Delta t} = \bar{t}_1 - \bar{t}_2 \quad \text{та} \quad \bar{\Delta t}^* = \bar{t}_1^{\max} - \bar{t}_2^{\min}$$

Нерівномірність розподілу температур вздовж вертикальної теплообмінної поверхні подано на рис. 4. Із рис. 4 видно, що умови теплообміну нестационарні, температура стінки

$\bar{t}_c \neq \text{const}$ та питомий тепловий потік $\bar{q}_c \neq \text{const}$. Більш рівномірний розподіл температур на стінці впродовж експерименту відбувається при передачі теплоти вода–гліцерин.

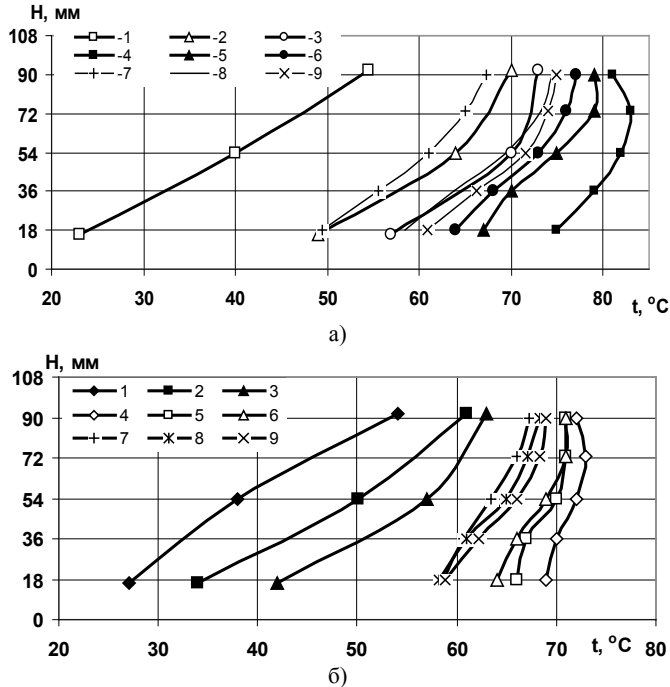


Рис. 4. Розподіл температур вздовж теплообмінної поверхні в елементах експериментальної установки; передача теплоти: а) вода–вода, б) вода–гліцерин: 1, 2, 3, 4, 5, 6; – розподіл температур у внутрішній порожнині та в кільцевому каналі; 7, 8, 9 – зміна температури стінки в моменти часу t_0 – початковий, $1/2\tau$ – середній, τ – кінцевий, відповідно.

Зіставлення експериментальних $k_{\text{експ}}$ та розрахункових $k_{\text{розрах}}$ коефіцієнтів теплопередачі для різних умов теплообміну і методів обробки результатів досліджень (табл. 3, 4) представлено на рис. 5. Аналізуючи результати досліджень можна зробити висновок, що процес теплообміну в елементах портативної установки для проведення базового експерименту в системі ЕРМ відповідає умовам теплообміну у великому об’ємі при вільній конвекції (рис. 5, а, б). Із рис. 5 видно, що обробка експериментальних даних відповідно до методики №1 (табл. 4) дає розбіжність $k_{\text{експ}}$ та $k_{\text{розрах}}$ в межах $\pm 12...35\%$, методики № 2 (табл. 4) – розбіжність $\pm 2...14\%$, методики № 3 (табл. 4) – $\pm 20...55\%$, методики № 4 (табл. 4) – $\pm 25...50\%$.

В результаті порівняння варіантів вибору визначальних температур та температурних напорів встановлено, що найкраще узгодження експериментальних $k_{\text{експ}}$ та розрахункових $k_{\text{розрах}}$ коефіцієнтів теплопередачі спостерігається, якщо визначальною температурою для гарячого теплоносія буде максимальна (точка 1¹, рис. 1), осереднена в часі \bar{t}_1^{max} , а для холодного теплоносія (досліджуваної рідини) – мінімальна (точка 5², рис. 1), осереднена в часі \bar{t}_2^{min} . Середній температурний напір та температура стінки в цьому випадку визначається за температурами \bar{t}_1 (кільцевий канал) і \bar{t}_2 (внутрішня порожнина), які осереднені по висоті теплообмінної поверхні і в часі (табл. 4, методика № 2).

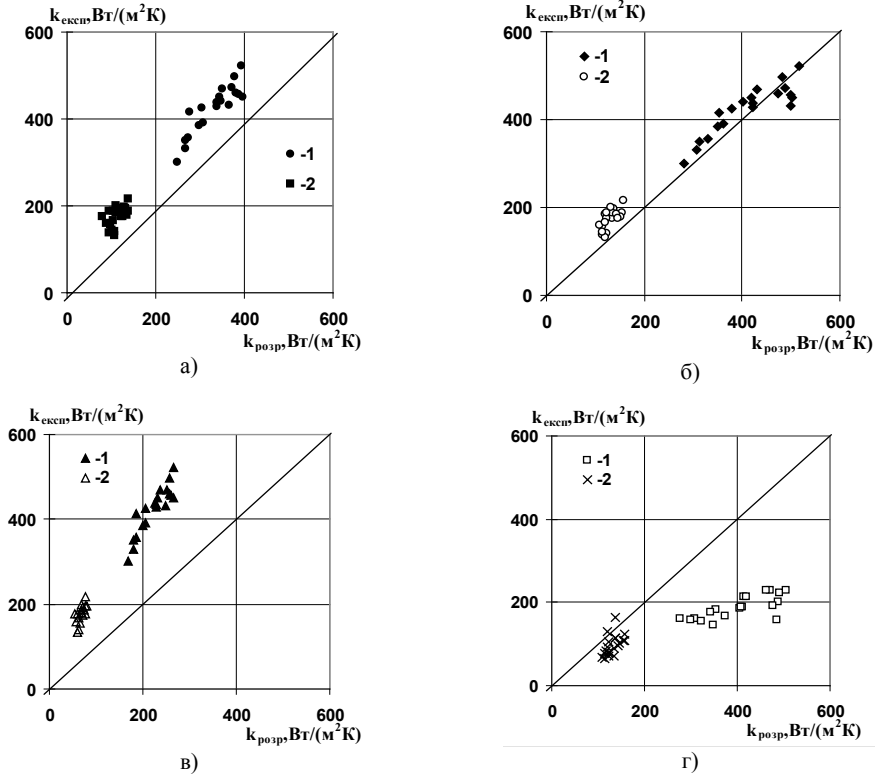


Рис. 5. Зіставлення експериментальних $k_{\text{експ}}$ та розрахункових $k_{\text{розра}}$ коефіцієнтів теплопередачі: а) методика обробки даних № 1 (табл. 4), $k_{\text{розра}}$ визначено за рівняннями для вільної конвекції у великому об'ємі; б) методика обробки даних № 2 (табл. 4), $k_{\text{розра}}$ визначено за рівняннями для вільної конвекції у великому об'ємі; в) методика обробки даних № 1 (табл. 4), $k_{\text{розра}}$ визначено за рівняннями для вільної конвекції в обмеженому об'ємі; г) методика обробки даних № 3 (табл. 4) $k_{\text{розра}}$ визначено за рівняннями для вільної конвекції у великому об'ємі: 1 – досліджувана рідина вода; 2 – гліцерин

Такий спосіб вибору визначальних температур і температурного напору дозволяє застосувати загальновідоме критеріальне рівняння розрахунку тепловіддачі при вільній конвекції у великому об'ємі біля вертикальної стінки [5] для визначення коефіцієнтів тепловіддачі в базовій експериментальній установці ЕРМ.

Отже, дослідження показали, що за визначальну температуру рідини у внутрішній ємності (досліджуваної рідини) для подальших розрахунків, відповідно до ЕРМ [2], необхідно приймати мінімальну по висоті теплообмінної поверхні, осереднену в часі \bar{t}_2^{min} .

Висновки

- В результаті досліджень умов теплообміну визначено, що в елементах базової експериментальної установки в системі експериментально-розрахункового методу закономірності теплообміну підпорядковуються закономірностям теплообміну у великому об'ємі при вільній конвекції, при цьому температура стінки $t_c \neq \text{const}$, питомий тепловий потік q_c змінюється в часі і по поверхні, умови теплообміну нестационарні.
- Запропоновано методику вибору визначальних температур та температурного напору (табл. 4, методика № 2), що дозволяє зберегти структуру критеріального рівняння для розрахунку

теплообміну у великому об'ємі при $\overline{q_c} = \text{const}$, яким можна описати режим теплообміну в елементах даної експериментальної установки. Відхилення експериментальних коефіцієнтів та розрахункових $k_{\text{експ}}$ і розрахункових значень $k_{\text{розра}}$, отриманих з використанням запропонованої методики знаходиться в межах $\pm 5 \dots 8$ % для теплопередачі вода-вода, та в межах $\pm 2 \dots 14$ % – вода-гліцерин, що в 4,2...5,5 разів менше, ніж при розрахунках із застосуванням методик № 1, № 3 (табл. 4).

Використана література

1. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Иженерные методы расчета / С. Бретшнайдер, под ред. П. Г. Романкова. – Л. : Химия, 1966. – 536 с.
2. Ткаченко С. Й. Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // Монографія. – Вінниця : Універсум – Вінниця, 2011. – 132 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. Исаченко В. П. Теплопередача: [учебн. для вузов] / В. П. Исаченко [и др.]. – [3-е изд. доп.]. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.
6. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – [5-е изд. доп.]. – М. : Атомиздат, 1979, – 416 с.
7. Гребер Г. Основы учения о теплообмене / Г. Гребер, С. Эрк, У. Григуль, под ред. А. А. Гухмана. – М. : Издательство иностранной литературы, 1958. – 566 с.
8. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – 2-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1949 – 396 с.
9. Кутателадзе С. С. Справочник по теплопередаче / С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. – М. : – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.
10. Акельев, В. Д. Тепло, и массообмен в ограниченных пространствах строительных конструкций и сооружений / В. Д. Акельев, под общ. ред. А. П. Несенчука // Монография. – Минск : БНТУ, 2010. – 317 с.
11. Кулинченко В. Р. Справочник по теплообменным расчетам / В. Р. Кулинченко. – К. : Техніка. – 1988. – 256 с.
12. Эккерт Э. Р. Теория тепло- и массообмена / Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк, под. ред. А. В. Лыкова. – М. : Госэнергоиздат, 1961 – 680 с.

Пішеніна Надія Володимирівна – аспірантка кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.