

**ТЕПЛООБМІН В РІДИННИХ СУМІШАХ ПРИ ПЕРЕМІШУВАННІ**

Т. Ю. Румянцева

**HEAT TRANSFER IN THE LIQUID MIXTURE IS STIRRED**

T. Rumyantseva

*У результаті досліджень теплообміну в рідинних сумішах в умовах вимушеної конвекції та при аналітичному огляді літературних джерел, в яких описані критеріальні рівняння теплообміну в апаратах з пропелерними мішалками, обґрунтовано доцільність виведення критеріальної залежності, яка б достатньо точно описувала умови теплообміну в базовій експериментальній установці, що використовується в експериментально-розрахунковому методі (ЕРМ) визначення інтенсивності теплообміну до рідин з невизначеними теплофізичними властивостями.*

*Експериментально визначено коефіцієнти тепловіддачі від внутрішньої стінки базової експериментальної установки до досліджуваних рідин (вода, цукровий розчин, гліцерин безводний, олія соняшникова).*

*В результате исследований теплообмена в жидких смесях в условиях вынужденной конвекции и при аналитическом обзоре литературных источников, в которых описаны критериальные уравнения теплообмена в аппаратах с пропеллерными мешалками, обоснована целесообразность вывода критериальной зависимости, которая достаточно точно описывает условия теплообмена в базовой экспериментальной установке, что используется в экспериментально-расчетном методе (ЭРМ) определение интенсивности теплообмена к жидкостям с неопределенными теплофизическими свойствами.*

*Экспериментально определены коэффициенты теплоотдачи от внутренней стенки базовой экспериментальной установки к исследуемым жидкостям (вода, сахарный раствор, глицерин безводный, масло подсолнечное).*

*The studies of heat transfer in liquid mixtures in forced convection and by analytic review of the literature in which the criterion equations of heat transfer in the apparatus with propeller stirrer has been described, appropriateness output criterial dependence has been justified, which describes the conditions of heat exchange in the basic experimental setup accurately is used in experimental and computational methods to determine the intensity of heat transfer fluids with uncertain thermal properties.*

*The heat transfer coefficient has been determined experimentally from the inner wall of the base experimental installation to liquids which has been investigated (water, sugar solution, anhydrous glycerin, sunflower oil).*

**Вступ та постановка задачі**

Перемішування – це одна з найбільш розповсюджених виробничих операцій в хімічній, харчовій, фармацевтичній промисловості, в сільському господарстві та ін. Перемішування приводить до пониження температурного і концентраційного градієнтів в системі, яка обробляється, тому воно створює позитивний вплив на хід усіх операцій, що пов'язані з передачею теплоти і маси [1-3].

Перемішування може здійснюватись в трубопроводі, через який протікає рідина, в насосі, що її перекачує, а також в апаратах з мішалками, може протікати самостійно або ж примусово, як наслідок підведення до системи ззовні механічної енергії, наприклад за допомогою мішалки [2].

Механічне перемішування здійснюється з метою:

- створення однорідних розчинів, емульсій та суспензій;
- інтенсифікації процесів теплообміну;
- інтенсифікації процесів масообміну.

Особливо багаточисельна третя група процесів, оскільки вони можуть протікати в різноманітних неоднорідних системах, таких як рідина–рідина, рідина–газ чи рідина–тверде тіло. В таких випадках інтенсивність процесу може бути обумовлена створенням двофазної системи – емульсії або суспензії [2].

Механічне перемішування виконується в апаратах з мішалками. В окремих випадках такі апарати можуть називатись реактором, автоклавом, нітратором та ін. [1, 2].

Процес теплообміну в апаратах з мішалками більш складний, ніж в трубчастих теплообмінниках, зважаючи на ускладнення гідродинамічної ситуації. Коефіцієнти тепловіддачі в апаратах з мішалками відрізняються і залежать від багатьох факторів. Згідно з результатами експериментальних досліджень, наприклад у випадку турбінних мішалок, які створюють радіальний потік рідини, найбільш інтенсивна тепловіддача відбувається на рівні установаження мішалки [2]. Таким чином, можна говорити про місцеві (локальні) коефіцієнти тепловіддачі чи про середню величину коефіцієнта тепловіддачі, яка дійсна на всій поверхні.

Відповідно до проведених при експериментальних дослідженнях спостережень, коефіцієнт тепловіддачі є функцією від [1-5]:

$$\alpha = f(n, d_m, \rho, \mu, \lambda, c, D), \quad (1)$$

де  $n$  – кількість обертів мішалки,  $c^{-1}$ ;  $d_m$  – діаметр мішалки, м;  
 $\rho$  – густина,  $кг/м^3$ ;  
 $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;  
 $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  
 $c$  – питома теплоємність, Дж/(кг·К);  
 $D$  – внутрішній діаметр апарату з мішалкою, м.  
 Критерій Нуссельта описується такою залежністю [1-5]

$$Nu = f(Re_{ц}, Pr), \quad (2)$$

де  $Re_{ц}$  – центробіжний критерій Рейнольдса;  
 $Pr$  – критерій Прандтля.  
 В [2, 4, 5] наведені результати досліджень теплообміну через рубашку в апаратах з пропелерними мішалками у вигляді критеріальних рівнянь (табл. 1).

Таблиця 1

**Критеріальні рівняння теплообміну для апаратів з пропелерними мішалками**

№ п/п	Режим руху	Критеріальне рівняння	Визначальні параметри	Літературне джерело
1	$Re_{ц} = \frac{\rho \cdot n \cdot d_m}{\mu}$ $200 < Re_{ц} < 3,15 \cdot 10^6$ $2,16 < Pr < 2500$	$Nu = 0,37 \cdot Re_{ц}^{2/3} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{cm}}\right)^{0,14}$	Визначальна температура – середня температура досліджуваної рідини в апараті ( $\bar{t}_2$ ). Визначальний розмір – діаметр мішалки ( $d_m$ ). $0,25 < d_m/D < 0,6$	[4]
2	$Re_{ц} = \frac{\rho \cdot n \cdot d_m}{\mu}$	$Nu = 0,54 \cdot Re_{ц}^{0,67} \cdot Pr^{0,25} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{cm}}\right)^{0,14}$	Дослід був проведений в чугунних нітраторах періодичної дії об'ємом $2,85 м^3$ . $D=1,5 м, d_m=0,6 м, n=2 об/с$ . Визначальна температура – $\bar{t}_2$ . Визначальний розмір – $d_m$ .	[5]
3	$Re_{ц} = \frac{\rho \cdot n \cdot d_m}{\mu}$	$Nu = 0,85 \cdot Re_{ц}^{1/2} \cdot Pr^{1/4} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{cm}}\right)^{0,14}$	Кут нахилу лопаток $\alpha=60^\circ$ , кількість лопаток $Z=3$ . Визначальна температура – $\bar{t}_2$ . Визначальний розмір – $d_m$ .	[2]

Проаналізувавши залежності наведені в табл. 1 та особливості їх отримання, зробили висновок, що дані критеріальні рівняння не можуть бути однозначно застосовані для опису характеру теплообміну в базовій експериментальній установці [6-8] без попередньої перевірки, тому що автори [2, 5] не вказують діапазону значень критерія Рейнольдса, для якого це рівняння дійсне, або вони виведені для геометрично більших апаратів [5]. У той час як експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) визначення коефіцієнтів тепловіддачі від рідин з невизначеними теплофізичними властивостями потребує проведення багатоваріантних досліджень на мобільній, легкій в обслуговуванні експериментальній установці [6-8]. Тому для подальшого розвитку ЕРМ потрібно мати надійні методи визначення інтенсивності теплообміну в посудинах обмеженого об'єму з перемішувальним пристроєм.

Отже, **метою даної роботи** є створення надійних критеріальних рівнянь, які б з достатньою точністю описували інтенсивність тепловіддачі в посудинах обмеженого об'єму, які застосовуються в ЕРМ.

### Основні дослідження

Дослідження проводились на експериментальній установці [6, 8] за умов вимушеної конвекції (перемішування пропелерною мішалкою діаметром  $d_m=0,058$  м, з трьома лопатями, кут нахилу кожної  $60^\circ$ ). Співвідношення діаметрів мішалки та внутрішньої робочої порожнини базової установки становить  $d_m/D = 0,6$ . Висота циліндричної теплообмінної поверхні  $H=0,108$  м. Методика проведення експерименту та обробки дослідів описана в [6, 8].

Досліджуваними рідинами для експерименту було взято речовини з відомими теплофізичними властивостями (тарувальні рідини): вода, гліцерин безводний, цукрові розчини з вмістом сухих речовин (СР) 40 % та 50 %, олія соняшникова (рафінована). В процесі проведення базового експерименту температура холодного теплоносія (досліджуваної рідини) змінюється в межах  $25 \dots 75^\circ\text{C}$  [8]. Характерними особливостями даних рідин є те, що вони відносяться до різних класів, а їх теплофізичні властивості в залежності від температури змінюються за різними законами (табл. 2).

В розрахунках згідно з [2, 4, 5] за визначальний розмір прийнято діаметр мішалки  $d_m$ , за визначальну температуру – середню температуру досліджуваної рідини в апараті  $\bar{t}_2$ . Критерій Рейнольдса знаходили за формулами наведеними в табл. 1.

Таблиця 2

**Теплофізичні властивості рідин при зміні температури від 25 до 75 °С**

Рідина	Динамічна в'язкість $\mu$ , Па·с		Теплопровідність $\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)		Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>		Теплоємність $C_p$ , кДж/(кг·К)		Число Прандтля	
	25 °С	75 °С	25 °С	75 °С	25 °С	75 °С	25 °С	75 °С	25 °С	75 °С
Вода	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	0,605	0,665	997,0	975,0	4,18	4,19	4,31	2,98
Цукровий розчин із вмістом СР 40 %	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	0,48	0,52	1169,0	1158,0	3,288	3,348	23,29	12,23
Цукровий розчин із вмістом СР 50%	$7 \cdot 10^{-3}$	$3,73 \cdot 10^{-3}$	0,469	0,475	1221,0	1210,0	3,063	3,138	45,71	24,64
Гліцерин безводний	0,33	0,102	0,281	0,284	1250,0	1238,0	2,451	2,556	2874,48	917,31
Олія соняшникова (рафінована)	0,049	0,011	0,106	0,106	918,0	885,5	1,81	2,005	853,44	212,61

Із табл. 2 видно, що в'язкість гліцерину безводного зі зміною температури зменшується в

3,2 раза, в'язкість цукрового розчину з вмістом СР 40 % та 50 % зменшується в 1,7 та 1,8 раза відповідно, а води – лише в 1,4 раза. Теплопровідність гліцерину безводного менша за теплопровідність води в 2,2...2,3 раза, теплопровідність цукрового розчину – в 1,2...1,3 раза. Теплоємність гліцерину безводного менша за теплоємність води в 1,6..1,7 раза цукрового розчину – менша в 1,2...1,4 раза. Число Прандтля гліцерину безводного більше за число Прандтля води у 307...667 разів, а цукрового розчину – у 4,1...10,6 раза.

Під час експерименту число обертів мішалки змінювали. На рис. 1 подано залежність числа Рейнольдса досліджуваної рідини від кількості обертів пропелерної мішалки.

Рис. 1 наведено, якісне оцінювання можливих режимів руху рідин в експериментальній установці. Видно, що зі збільшенням кількості обертів мішалки число Рейнольдса зростає для води на 85 %, для цукрових розчинів із вмістом СР 40 % та 50 % – на 38 % та на 92 %, відповідно, для гліцерину безводного – на 96 %, для олії соняшникової – на 31 %. Враховуючи високе значення коефіцієнта динамічної в'язкості гліцерину безводного, число Рейнольдса для води на 99 % більше, ніж для гліцерину, і на 76...86 %, ніж для цукрового розчину.

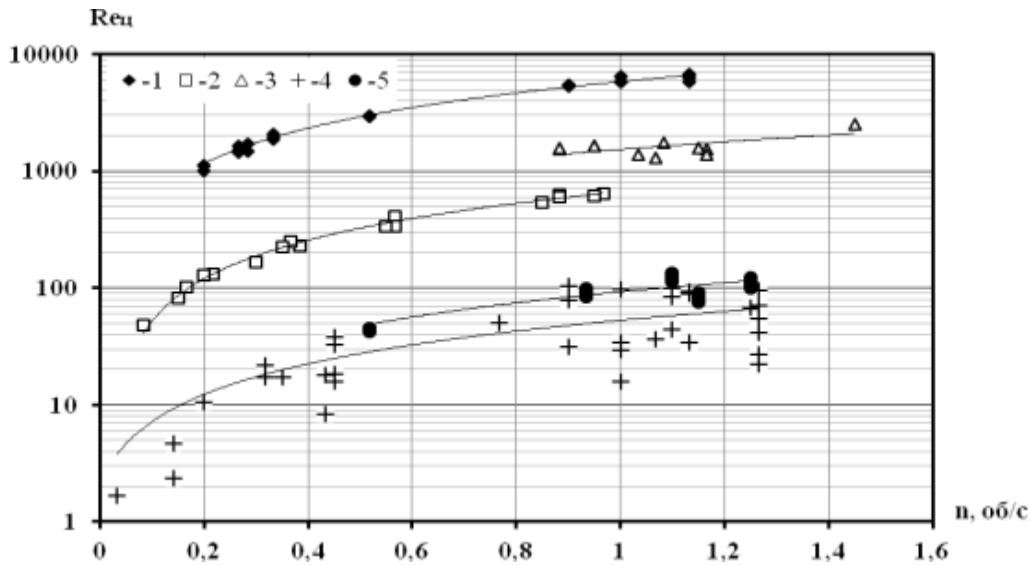


Рис. 1. Залежність числа Рейнольдса досліджуваної рідини від кількості обертів пропелерної мішалки:

1 – вода; 2 – цукровий розчин із вмістом СР 50 %; 3 – цукровий розчин із вмістом СР 40 %; 4 – гліцерин безводний; 5 – олія соняшникова (рафінована)

У результаті проведених досліджень на базовій експериментальній установці [6, 8], отримано експериментальні значення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_2^{експ}$  від стінки внутрішньої посудини до досліджуваних рідин, теплофізичні властивості яких наведені у табл. 2.

Беручи до уваги критеріальні рівняння наведені у табл. 1, власні експериментальні результати обробили у вигляді нижче наведених залежностей (2) та (3), і подали графічно на рис. 2.

Безрозмірні комплекси  $K_1$  та  $K_2$  відповідають рівнянням 1 та 2, 3 з табл. 1 відповідно та є функціями від числа Рейнольдса

$$K_1 \equiv \frac{Nu}{Pr^{1/3} \cdot (\mu / \mu_{ст})^{0,14}} = f_1(Re_{ц}), \quad (3)$$

$$K_2 \equiv \frac{Nu}{Pr^{0,25} \cdot (\mu / \mu_{ст})^{0,14}} = f_2(Re_{ц}), \quad (4)$$

де  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини, Па·с;  
 $\mu_{ст}$  – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини за температури стінки, Па·с.

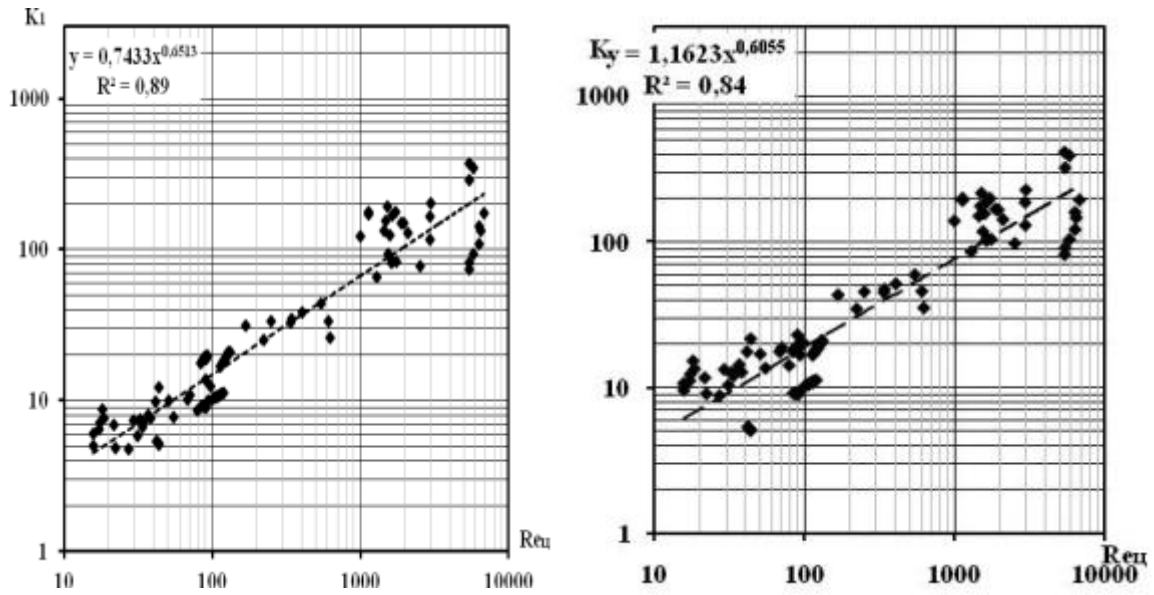


Рис. 2. Залежності безрозмірних комплексів  $K_1$  та  $K_2$  від числа Рейнольдса

З рис. 2 видно, що коефіцієнти детермінації  $R^2$  (достовірність отриманої залежності) не достатньо високі, тому доцільно для базової експериментальної установки уточнити критеріальне рівняння, яке б задовольняло вимоги ЕРМ. Але при цьому слід врахувати, що при перемішуванні пропелерною мішалкою в апараті присутня не лише вимушена конвекція, але й вільна.

Отже, критерій Нуссельта для базової експериментальної установки [6, 8] можна описати такою залежністю [6, 9]

$$Nu = f(Re, Pr, Ra), \quad (5)$$

де  $Re$  – критерій Рейнольдса (за формулою наведеною в [6]);

$Pr$  – критерій Прандтля;

$Ra$  – критерій Релея.

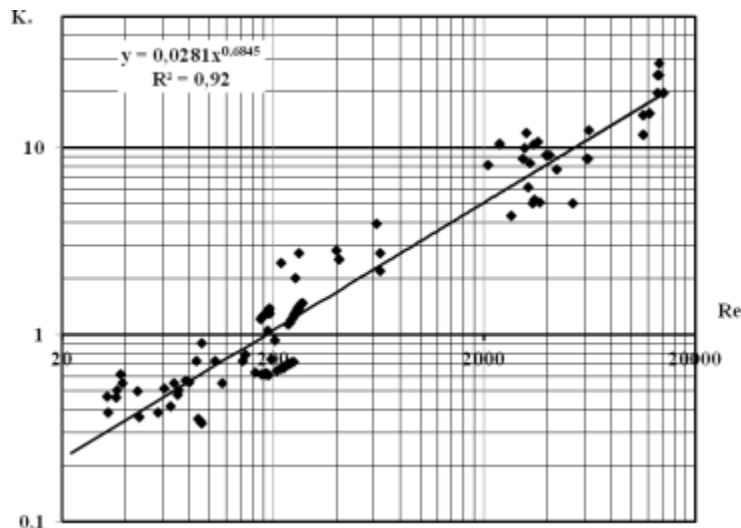


Рис. 3. Залежність безрозмірного комплексу  $K_*$  від числа Рейнольдса для базової експериментальної установки

За визначальний розмір прийнято  $2\delta = D - d_m$  ( $\delta$  – товщина граничного шару, м), а критерій Релея враховує вплив вільної конвекції [6, 9]. Тоді безрозмірний комплекс  $K_*$  може бути поданий у вигляді залежності (6), а його графічна інтерпретація від числа Рейнольдса для базової експериментальної установки подана на рис. 3

$$K_* \equiv \frac{Nu}{Pr^{0,33} \cdot (Pr/Pr_{cr})^{0,25} \cdot Ra^{0,1}} = f(Re) \quad (6)$$

де  $Pr_{cr}$  – критерій Прандтля рідини за температури стінки.

Результат обробки експериментів у вигляді залежності (6) дозволив отримати таке критеріальне рівняння для тарувальних рідин

$$Nu = 0,0281 \cdot Re^{0,6845} \cdot Pr^{0,33} \cdot Ra^{0,1} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{cr}} \right)^{0,25} \quad (7)$$

Отже, обробка експериментальних значень коефіцієнта тепловіддачі від стінки внутрішньої посудини до досліджуваних рідин у вигляді залежності  $Nu = f(Re, Pr, Ra)$  (7) більшою мірою відповідає реальному механізму теплообміну (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,92$ ), ніж в координатах  $Nu = f(Re, Pr)$  (5), коли  $R^2$  при обробці одних і тих же експериментів становить 0,84 та 0,89.

### Висновки

У результаті досліджень теплообміну в рідинних сумішах в умовах вимушеної конвекції та при аналітичному огляді літературних джерел, в яких описані критеріальні рівняння для теплообміну в апаратах з пропелерними мішалками, обґрунтовано доцільність виведення критеріальної залежності, яка з достатньою точністю (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,92$ ) описує умови теплообміну в базовій експериментальній установці, що використовується в ЕРМ, і враховує вплив вільної конвекції. Як результат вдосконалюється матеріальна та методична база експериментально-розрахункового методу визначення інтенсивності теплообміну в посудині обмеженого об'єму з перемішувальним пристроєм.

### Використана література

1. Брагинский Л. Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Л.: Химия, 1983. – 336 с.
2. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [пер. с польск. под. ред. Щупляка И. А.] / Ф. Стренк. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
3. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 784 с.
4. Кулинченко В. Р. Справочник по теплообменным расчетам / В. Р. Кулинченко. – К.: Техника, 1990. – 165 с.
5. Штербачек З. Перемешивание в химической промышленности / З. Штербачек, П. Тауск. – Л.: Ленинградское отделение Госхимиздата, 1963. – 416 с.
6. Ткаченко С. Й. Метод визначення інтенсивності теплообміну в реонестабільних сумішах / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Науково-технічний збірник "Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві". – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2012. – № 2. – С. 87-96.
7. Ткаченко С. Й. Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // Монографія. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2011. – 132 с.
8. Пішеніна Н. В. Теплообмін в складних сумішах в умовах природної конвекції / Н. В. Пішеніна // Науково-технічний збірник "Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві". – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2011. – № 2. – С. 140-148.
9. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко [и др.]. – [3-е изд. доп.]. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

**Румянцева Тетяна Юрївна** – аспірант кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.