

**С.М.Василенко**, канд. тех. наук

**А.В.Форсюк**, канд. тех. наук

**М.І.Колосок**

## **ЛОКАЛЬНЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСЕННЯ В КІЛЬЦЕВИХ ПАРОРІДИННИХ ТЕЧІЯХ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

Впровадження сучасних енерго- та ресурсозберігаючих технологій на сьогодні є пріоритетним заходом з економії паливно-енергетичних ресурсів в харчовій промисловості України. Базуючись на передовому технологічному оформленні, ці технології також забезпечують підвищення якості продукції, можливість проведення заходів із захисту навколишнього середовища, тощо. Однак, позитивний ефект застосування сучасного високотехнологічного обладнання гальмується відсутністю сучасних методів їх теплотехнологічного розрахунку, адекватних фізико-хімічним процесам, які в них відбуваються.

Очевидно, найбільш достовірним методом розрахунку процесів теплообміну з міжфазним перенесенням в теплообмінних апаратах є їх математичне моделювання. З метою отримання розрахункових залежностей для одновимірного моделювання процесів турбулентного теплоперенесення в двофазних кільцевих потоках на кафедрі промислової теплоенергетики УДУХТ були проведені дослідження локальних теплогідродинамічних процесів:

1. Випарювання яблучних соків з поверхні плівки, що стікала по внутрішній поверхні вертикальної труби довжиною 3 м та внутрішнім діаметром 0,028 м; тиск вторинної пари змінювався в межах 0,03...0,07 МПа; швидкість пари – 0...60 м/с; плівкове число

Рейнольдса –  $Re_p=200...1400$ ; масовий витратний паровміст –  $0...0,5$ ; масовий вміст сухих речовин –  $10...60\%$ .

2. Конденсації насиченої водяної пари у вертикальній трубі довжиною 9 м та внутрішнім діаметром 0,016 м; тиск пари в дослідах змінювався в діапазоні  $0,12...0,3$  МПа; локальна швидкість пари –  $0...100$  м/с; ; плівкове число Рейнольдса –  $0...3600$ .

Для визначення загального вигляду рівняння, що апроксимує результати експериментального дослідження, на сьогодні найчастіше застосовуються методи теорії подібності, а більш конкретно – аналіз розмірностей або метод  $\pi$  – теореми.

Однак, при цьому слід враховувати, що цей метод не є однозначним. Оскільки при його застосуванні попередньо слід сформулювати систему розмірних параметрів, що визначають досліджуваний процес, очевидно, що  $\pi$  – теорема лише спрощує вираз інформації, отриманої цим попереднім підбором змінних. При цьому  $\pi$  – теорема не дає прямих способів знаходження визначальних інваріантів подібності (чисел подібності). По суті метод розмірностей застосовується на етапі, коли параметри задачі вже визначені. Аналіз розмірностей дає дуже мало, або взагалі нічого не дає для дослідження та перевірки тих даних, що використовуються для знаходження безрозмірних параметрів, за виключенням чисто інтуїтивного вибору із системи фізичних характеристик. Однак, різний вибір змінних, котрим під час аналізу приписують довільні показники степені, дає різні групи чисел подібності. Хоча  $\pi$  – теорема ясно свідчить, що вибрані рішення не є незалежними, тобто жодна з них не містить нічого, чого б не було в інших, питання про те, якій з різних форм надати перевагу, залишається відкритим. З  $\pi$  – теореми не можна зробити висновок, які безрозмірні комплекси найважливіші для аналізованої задачі, та встановити, які з них забезпечують найкращі співвідношення для неї. Нарешті,  $\pi$  – теорема не

вказує умов, за яких можна знехтувати певними безрозмірними комплексами, що є важливим для складних умов течії.

Під час аналізу даних по локальній тепловіддачі задача ускладнюється тим, що в його основу покладено рівняння Ньютона-Ріхмана, яке базується на понятті коефіцієнта тепловіддачі. А оскільки коефіцієнт тепловіддачі, як коефіцієнт пропорційності в цьому рівнянні не має безпосереднього фізичного сенсу, то відкритим залишається питання про фізичну достовірність безрозмірних рівнянь, отриманих з його застосуванням.

Враховуючи вищенаведене, для вибору системи безрозмірних комплексів, що найкращим чином описували б тепловіддачу в кільцевих плівках рідини, застосували методи регресивного аналізу. Оцінка невідомих параметрів регресії проводилась за методом найменших квадратів. Під час мінімізації нормованої суми квадратів використовувалась квазі-ньютонівська оптимізаційна процедура. За критерій якості регресії було прийнято коефіцієнт кореляції, який вказує на частку загального розкиду відносно вибіркового середнього залежної змінної, яка пояснюється побудованою регресією.

Система розмірних параметрів, які визначають інтенсивність перенесення в плівці рідини, може бути записана у вигляді

$$\alpha = f_1(\Gamma_v, \tau_i, v_p, a_p, c_p, \rho_p).$$

Аналізуючи цю систему з використанням методу розмірностей, отримали наступну систему безрозмірних чисел подібності

$$f_2(St(Nu), Re_p, \Phi^*, Pr_p) = 0,$$

де  $St$  та  $Nu$  – дві форми запису безрозмірного коефіцієнта тепловіддачі.

Розглянемо можливість апроксимації дослідних даних різними групами безрозмірних чисел подібності, наведених в останньому рівнянні:

1. Класичним методом апроксимації дослідних даних по теплообміну в кільцевому потоці є метод еквівалентного ламінарного прошарку Колборна, згідно якого результати представляються залежністю між числами Стентона та Прандтля рідини. Вплив парового потоку на процеси перенесення в плівці враховуються опосередковано, оскільки в число Стентона входить так звана динамічна швидкість (швидкість тертя) на стінці каналу. Експериментальні дані авторів апроксимуються за цим методом залежністю

$$St = 0.0431 Pr_p^{-0.583}.$$

Коефіцієнт кореляції складає 56%. На рис.1. наведено порівняння визначених у дослідях та розрахованих згідно цієї залежності значень числа Стентона. Слід відмітити, що вона описує 35% дослідних даних з точністю  $\pm 10\%$ , 70% даних з точністю  $\pm 20\%$  та 92% з точністю  $\pm 30\%$ .

2. Однак, як показують результати математичного моделювання теплоперенесення в плівці, на його інтенсивність повинні впливати витратні характеристики плівки. Якщо їх врахувати введенням до розрахункової залежності числа Рейнольдса плівки, то дослідні дані апроксимуються залежністю

$$St = 0.176 Re_p^{-0.178} Pr_p^{0.785}.$$

Коефіцієнт кореляції складає 58%. Порівняння визначених у дослідях та розрахованих за цією залежністю значень числа Стентона наведено на рис.2. 43% дослідних даних описуються нею з точністю  $\pm 10\%$ , 87,8% – з точністю  $\pm 20\%$  та 97,9% – з точністю  $\pm 30\%$ .

3. Врахування впливу міжфазної взаємодії на інтенсивність теплообміну в плівці згідно методу Колборна у вигляді  $\alpha \sim \tau_{ct}^{0.5}$  отримана з досить загальних міркувань. Щоб врахувати вплив дотичної напруги на поверхні розділу фаз  $\tau_i$ , введемо до розрахункової залежності комплекс  $(1 + \tau_i^*)$

$$St = 0.125 Re_p^{-0.164} Pr_p^{-0.65} (1 + \tau_i^*)^{0.061}.$$

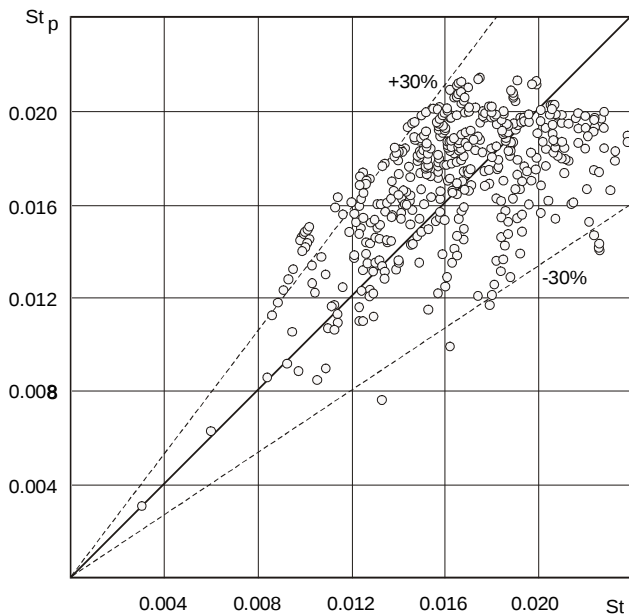


Рис.1.

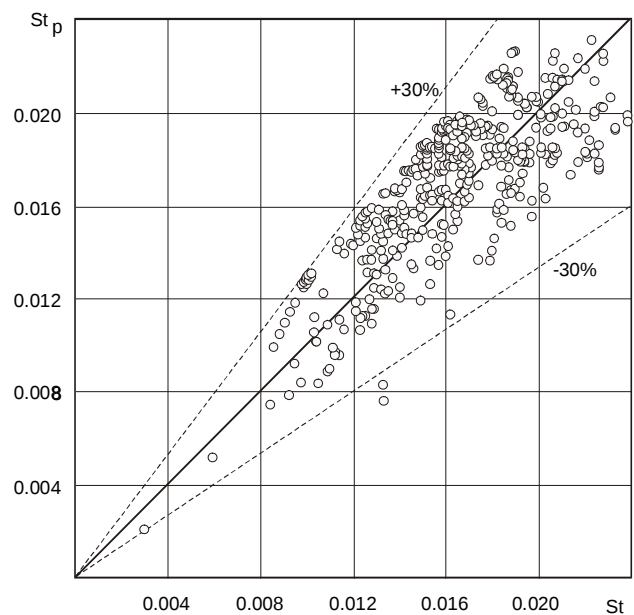


Рис.2.

Коефіцієнт кореляції – 60%. На рис.3. наведено порівняння дослідних та розрахованих за цією залежністю значень числа St. 64,4% дослідних даних описуються залежністю з точністю  $\pm 10\%$ , 91,4% – з точністю  $\pm 20\%$  та 98% – з точністю  $\pm 30\%$ .

4. Під час розрахунку коефіцієнта тепловіддачі необхідно визначати товщину плівки. На сьогодні існує значна кількість достовірних методик для визначення  $\delta$ , але незважаючи на їх відносну простоту, це визначення ускладнює розрахункову процедуру. Тому розглянемо можливість апроксимації дослідних даних з використанням в якості залежного параметра безрозмірного числа Нусельта. Розрахункова залежність при цьому набуває вигляду

$$Nu = 0.289 Re_p^{-0.131} Pr_p^{0.223} (1 + \tau_i^*)^{0.343}.$$

Коефіцієнт кореляції при цьому зростає до – 92%. Порівняння визначених у досліді та розрахованих за залежністю значень числа St наведено на рис.4. 47% дослідних даних описуються залежністю з точністю  $\pm 10\%$ , 82% – з точністю  $\pm 20\%$  та 92% – з точністю  $\pm 30\%$ .

Аналізуючи вищенаведене, можна зробити висновок, що формальне спрощення розрахункових залежностей за рахунок

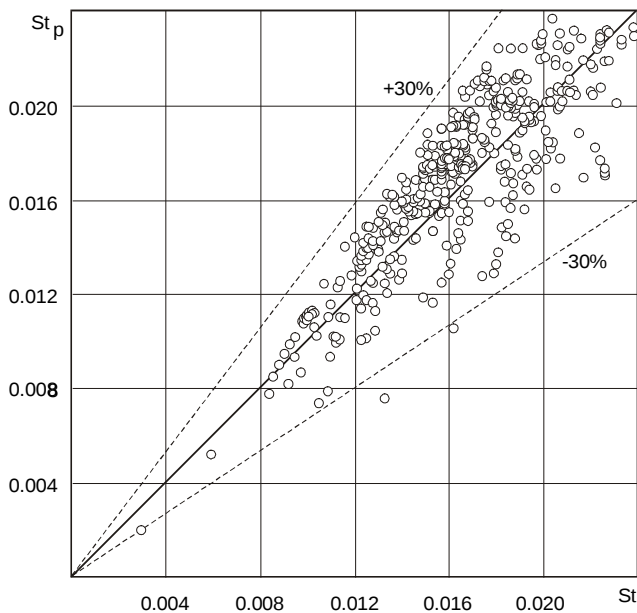


Рис.3.

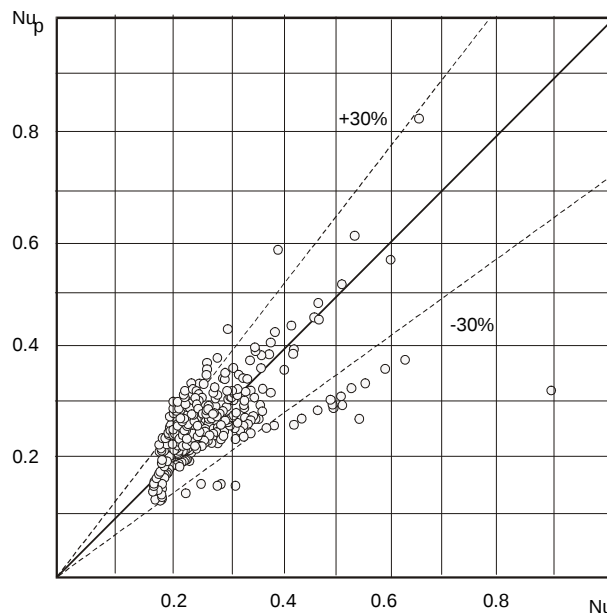


Рис.4.

зменшення кількості безрозмірних комплексів, що до них входять, не призводить до очікуваного полегшення розрахункової процедури, зменшуючи при цьому достовірність результатів розрахунку. Тому при одновимірному моделюванні кільцевих течій рекомендуємо для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі застосовувати дві останні залежності, які максимально враховують вплив на інтенсивність теплообміну характеристик двофазного потоку.

**Висновки.** Наведено результати апроксимації результатів експериментального дослідження теплообміну в кільцевих парорідинних течіях. Отримані залежності для розрахунку локального коефіцієнта тепловіддачі рекомендуються для одновимірного моделювання теплообмінних апаратів харчової промисловості.

#### Умовні позначення.

$L$  – довжина, лінійний розмір, м;  $D, R$  – діаметр та радіус труби відповідно, м;  $q$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $\omega$  – швидкість, м/с;  $u^* = \sqrt{\tau/\rho}$  – динамічна швидкість, м/с;  $\lambda$  – теплопровідність, Вт/(мК);  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $\delta$  – товщина плівки, м;  $\mu$  – динамічна вязкість, Па·с;  $\nu$  – кінематична вязкість, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – дотична напруга, н/м<sup>2</sup>;  $\tau_{ia}$  – адіабатна дотична напруга, н/м<sup>2</sup>;  $c_p$  – ізобарна теплоємність, Дж/(кгК);  $a$  –

температуропровідність,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\sigma$  – поверхневий натяг,  $\text{н}/\text{м}$ ;  $\Gamma$  – густина зрошення,  $\text{кг}/(\text{мс})$ ;  $\nu_T$  – коефіцієнт турбулентного переносу імпульсу (уявна турбулентна кінетична в'язкість),  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$  – число Нусельта;  $St = \frac{\alpha}{\rho_p c_p v^*}$  – число Стентона;  $Pr = \frac{\nu_p}{a}$  – число Прандтля;

$Re_\delta = \frac{4\Gamma_v}{\nu_p}$  – число Рейнольдса;  $\omega^+ = \frac{\omega}{u^*}$  – швидкість;  $\delta^+ = \frac{\delta u^*}{\nu_p}$  – товщина плівки;

$\nu_\tau^+ = \nu_\tau / \nu$  – коефіцієнт турбулентної вязкості;  $\tau_i^* = \tau_i / [\rho g (v^2 / g)^{1/3}]$  – дотична напруга;  $T^+ = St^{-1}$  – температура.

Надійшла до редакції