

## ТЕПЛООБМІННІ ПРОЦЕСИ В ЄМНІСНОМУ ТЕПЛООБМІННОМУ АПАРАТІ З ЦИРКУЛЯЦІЙНИМ КОНТУРОМ

**Шинкарик М.М.**, канд. техн. наук, проф.

**Ворошук В.Я.**, канд. техн. наук, доц.

Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя

Ємнісні теплообмінні апарати використовують у різних галузях харчової промисловості. Нагрівання продукту в таких теплообмінниках відбувається внаслідок передачі теплоти від стінки апарата, у сорочку якого подається теплоносієм. Вони можуть відрізнитися величиною (ємністю), засобами інтенсифікації теплообміну та додатковими функціями. Як засоби інтенсифікації теплообміну в ємнісних теплообмінниках використовуються різного типу мішалки, які надають установкам також функцію перемішувальних пристроїв. У деяких конструкціях установлюються подрібнювальні механізми, які також впливають на гідродинаміку руху. Комплекс подрібнювальних і перемішувальних пристроїв широко використовується під час виробництва композиційних продуктів. Важливим для багатьох продуктів є рівномірність нагрівання всієї маси продукту та однаковий час його перебування за максимальної температури. Тому останнім часом для обробки харчових продуктів використовують ємнісні теплообмінники з циркуляційним контуром. Значно покращити термічну обробку дозволяє емульсор роторно-вихровий Я5-ОЭВ розробки ТІММ УААН, що використовується для виробництва композиційних продуктів на основі сиру кисломолочного. Емульсор крім ємності з теплообмінною сорочкою і мішалкою включає емульгувальний пристрій, виконаний у вигляді роторно-вихрового апарата з насосною вставкою. Вихідний патрубок емульгувального пристрою з'єднаний із циркуляційним трубопроводом. Скребок дволопатева мішалка безперервно перемішує продукт, очищає поверхню теплообміну і запобігає локальному перегріванню маси. У процесі обробки сирна маса безперервно циркулює по замкнутому контуру, забезпечуючи інтенсивне і рівномірне нагрівання. Теплообмін у такому апараті складний, що пов'язано з гідродинамікою руху продукту. Продукт спочатку нагрівають до певної температури, витримують і охолоджують, тобто процес теплообміну нестационарний.

Метою роботи було дослідження процесу теплообміну в ємнісному теплообмінному апараті зі скребковою мішалкою і

циркуляційним контуром під час виробництва композиційних продуктів. Для розрахунку процесів тепловіддачі пропонуємо використати критеріальні рівняння, одержані методом розмірностей. Для апарата з мішалкою залежність коефіцієнта тепловіддачі можна подати у вигляді таких змінних:

$$\alpha = f(d, n, \eta, \lambda, c, \gamma), \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>К;  $n$  – кількість обертів мішалки;  $\eta$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $c$  – питома теплоємність;  $d$  – діаметр ємності (геометричний параметр);  $\gamma$  – густина продукту.

Після проведення перетворень отримаємо рівняння:

$$Nu = C_1 Re^n Pr^m K^z, \quad (2)$$

де  $C_1$  – коефіцієнт, який ураховує конструктивне виконання окремих елементів роторно-вихрового емульсора;  $K$  – число, яке характеризує рух продукту за рахунок циркуляції й перемішування.

Одержане рівняння, ураховуючи перші два члени, типове для теплообмінних апаратів із мішалкою.

У шукане рівняння потрібно ввести інваріанти геометричної й конструктивної подібності, такі як відношення висоти ємності до меншого діаметра  $h_1$ , довжини мішалки до ширини  $h_2$ , кількості лопатей мішалки  $n_1$ . Тоді критеріальне рівняння буде мати вигляд:

$$Nu = C_1 Re^n Pr^m K^z h_1 h_2 n_1. \quad (3)$$

Під час виробництва композиційних продуктів важливим є розрахунок теплофізичних характеристик, які будуть залежати від складових продукту та від ступеня механічної й термічної обробки.

Умовний коефіцієнт теплоємності можна визначити методом адитивності з урахуванням складу окремих компонентів. Коефіцієнт кінематичної в'язкості для неньютонівських рідин необхідно визначати з урахуванням його залежності від швидкості перемішування в процесі обробки. Для дилатантних рідин (сир кисломолочний) можна вважати, що зміна коефіцієнта кінематичної в'язкості проходить по ширині скребка мішалки. Одержане критеріальне рівняння має вигляд:

$$Nu = 0,4 Re^{0,67} Pr^{0,3} K^{0,2} h_1 h_2 n_1. \quad (4)$$

Одержане критеріальне рівняння дозволяє визначити коефіцієнт тепловіддачі для ємнісного теплообмінного апарата з циркуляційним контуром.