

УДК 664:66.021.3

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОМАСООБМІНИХ ПРОЦЕСІВ У ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВАХ

В.П. Василів канд. тех. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

С. М. Кудашев канд. тех. наук, **П. І. Осадчук** канд. тех. наук,

І. В. Москалюк канд. тех. наук

Одеський державний аграрний університет

Наведено огляд і аналіз способів інтенсифікації тепломасообмінних процесів. Зазначено напрямки досліджень, які можуть бути найбільш ефективними.

Ключові слова: процеси, масообмін, теплопередача, дисипація енергії, гідродинаміка, витрати, вихри, оптимізація.

Вступ. Поступальний розвиток нашої країни багато в чому визначається успішною роботою переробних і харчових підприємств. Разом з тим, по оцінках фахівців, з діючих у цей час підприємств цього профілю сучасним вимогам відповідають лише 20-30 % [1]. Інтенсифікація технологічних процесів - загально визнаний напрямок науково-технічного прогресу в галузі.

Проблема. За останні роки на харчових і переробних виробництвах одержали розвиток гідродинамічні, вібраційно-акустичні, магнітні, іонно-радіаційні й інші методи ведення процесів, а також впроваджуються мембранні, кристалогідратні, електрохімічні, суперкавітаційні й інші технології. Науковою основою інтенсифікації технологічних процесів харчових і переробних виробництв повинне бути встановлення й використання нових фізико-хімічних ефектів при веденні технологічних процесів. Тільки використовуючи нові конструктивні рішення, потужності й технології, що дозволяють зменшити втрати й поглибити переробку, можна домогтися збільшення обсягу виходу готової продукції з тої ж кількості сировини. Підвищити ефективність виробництва харчових продуктів із сировини сільськогосподарських підприємств можна на основі інтенсифікації технологічних процесів, створення й впровадження сучасного встаткування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналізуючи літературні джерела, прийшли к висновку, що досить часто зустрічаються наукові публікації у даному напрямку, але аналіз можливих напрямків інтенсифікації тепломасообмінних процесів у тісному зв'язку із законами дисипації енергії та оптимізацією енергетичних витрат практично відсутні.

Мета досліджень: Проаналізувати можливі напрямки інтенсифікації тепломасообмінних процесів у тісному зв'язку із законами дисипації енергії й оптимізацією енергетичних витрат.

Результати досліджень. Найкращі результати в підвищенні ефективності промислового виробництва продуктів харчування можна одержати,

об'єднавши нові режимно-технологічні й апаратурно-конструктивні рішення. Використовуючи прийоми сполучення й оптимізації процесів, створення замкнутих циклів матеріальних і енергетичних потоків, уніфікації й раціонального вибору матеріалів вузлів і агрегатів, підвищення в оптимальних межах одиничних потужностей устаткування можна одержати істотний техніко-економічний ефект. У переробній і харчовій промисловості широко застосовуються процеси ректифікації, абсорбції, адсорбції, екстракції, розчинення, кристалізації, теплообміну. Загальною ознакою цих процесів є системи взаємодії газ (рідина) - рідина (тверде тіло). Інтенсифікація таких процесів досягається, у більшості випадків, тими самими прийомами, тому що процес переносу маси й тепла визначається структурою матеріальних потоків [3,4,5]. Як правило, гідродинаміка процесів описується рівняннями Нав'є-Стокса. Однак труднощі й неточності математичного опису не дозволяють знайти оптимальні параметри процесів масопередачі або теплопередачі й, тому, виникає необхідність розвитку експериментальних методів дослідження й емпіричного підходу до опису тепломасопередачі [2,3,5]. Інтенсифікацію гідродинамічних процесів переважно зв'язують із розвитком турбулентності в потоці. Турбулізація гідродинамічних плинів є однією із самих важких завдань. І перспективними є ті дослідження, які спрямовані на вивчення впливу різних збурювань (акустичних хвиль, вібрацій, автоколивань) на виникнення й розвиток турбулентності потоків [1,3,4]. Такі дослідження надзвичайно важливі вже тому, що сучасні методи інтенсифікації теплових і дифузійних процесів засновані скоріше на більш швидкому зростанні витрат енергії, чим на збільшенні кількості переносимого тепла або маси речовини. Однак відомі випадки, коли, наприклад, ріст тепловіддачі перевищує ріст гідравлічного опору. Зазначений метод інтенсифікації виявлений Дрейцером Г.А., Калініним Э.К. і ін. при вивченні тепловіддачі на стінках каналів з дискретною турбулізацією потоків при змушеній конвекції. Ними встановлено, що наявність на стінках каналів виступів висотою 5-10% від радіуса труби й із кроком в 5(10 разів більшим товщини пристінного шару теплоносія сприяє закручуванню потоку й створенню вихрів у цьому шарі. Оребрення труб дозволяє збільшити коефіцієнт теплопередачі на 50%. Створення автоколивань у потоці газу сприяє інтенсифікації теплообмінного газорідинного процесу без додаткових витрат енергії. Це досягається за рахунок перерозподілу втрат енергії. При проходженні газу через контактні пристрої з резонуючими порожнинами в його потоці виникають автоколювання, які підсилюють перемішування з рідиною в поверхні розділу фаз. У цьому випадку опір поверхневого шару переносу маси речовини знижується й швидкість масопереносу зростає [6]. В інтенсифікації тепломасообмінних процесів переробних і харчових виробництв можна виділити такі напрямки:

- підвищення ефективності перемішування тих обсягів або шарів фаз, які чинять основний опір тепломасопереносу;

- створення розвитку поверхні контакту фаз;
- збільшення швидкості відносного руху фаз;
- створення умов для утворення вихрів оптимального розміру в зоні контакту фаз та в об'ємі середі що перемішується;
- удосконалювання умов контакту фаз;
- створення при межфазном обміні нестационарних режимів за рахунок зміни профілів, концентрацій, швидкостей і температур потоків;
- реалізація тепломасообмінних процесів в умовах гідродинамічної нестійкості міжфазної поверхні;
- створення нерівноважних станів з більшими температурними й концентраційними градієнтами.

Наприклад, інтенсифікувати масообмінний процес у ректифікаційних колонах можна за рахунок удосконалення локального контакту фаз на тарілках і поліпшення розподілу потоків по них для усунення застійних зон рідини, байпасного руху фаз, що більш ніж на 50% може зменшити ефективність ведення процесу. Експериментально встановлено [7], що при використанні постійного струму з напруженістю поля $E = 3,7 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^5$ В/м² процес абсорбції вуглекислого газу проходить інтенсивніше, ніж при змінному струмі. Найбільший ефект отриманий при негативній полярності коронуючого електрода. Коефіцієнт масопередачі збільшується в 1,7 рази. Інтенсивне поглинання негативних іонів вуглекислого газу пояснюється їхньою більшою рухливістю в порівнянні з позитивними іонами. Ефективною також є попередня іонізація газу. У цьому випадку спрощується конструкція масообмінного апарата, але зменшується ефективність ведення процесу внаслідок часткової втрати зарядів іонізованого газу на ділянці від іонізатора до абсорбера [1]. Нашими дослідженнями виявлене збільшення в 2-3 рази коефіцієнта тепловіддачі пари на твердій охолоджуваній поверхні при створенні електричного поля усередині транспортуючих труб. Діаметр труби рівнявся 0,08 м, а напруга між центральним коронуючим електродом і трубою $1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3$ В [1]. Масообмін між газом і рідиною - розповсюджений процес у харчових технологіях. Відомі теоретичні роботи [1,4,5 і ін.], у яких масообмін описаний за допомогою гідродинамічних параметрів стану рідини, наприклад:

$$\beta_L = C(S_c)^{-\frac{1}{2}} (E \cdot \nu)^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

де β_L – коефіцієнт масовіддачі, м/с; $S_c = \frac{V}{D}$ – число Шмидта; ν - коефіцієнт

кінематичної в'язкості м²/с; D - коефіцієнт молекулярної дифузії, м²/с; E - дисипація енергії, Вт/м³; C – емпіричний коефіцієнт.

Внаслідок відсутності узагальнюючої гідродинамічної теорії не розроблена досить повна модель масопередачі. Для аналізу процесу використовують розрахункові залежності, отримані на основі дисипативної моделі масопередачі [8,9]. Модель має істотні обмеження по застосуванню, однак, корисним у ній є те, що в основу її побудови закладена дисипація енергії E и

гідродинамічна характеристика – градієнт швидкості dw/dx , а також характеристика середовища – динамічна в'язкість μ . Для визначення дисипації енергії E , обумовленою в'язкістю (виділимо елементарний куб обсягом d з довжиною ребер dx, dy, dz . При градієнті швидкості dw/dx дисипація енергії E вихрів в обсязі буде описуватися рівнянням :

$$E = g \cdot dF \frac{dz}{t \cdot dV} = \mu \left(\frac{dw}{dx} \right)^2, \quad (2)$$

де $g = \mu \cdot dw/dx$ - дотичне напруження; $dF = dy \cdot dz$ - площа бокової грані куба; $t = dz/dw$ - час зрушення протилежної грані куба на відстань рівне dz при градієнті швидкості dw/dx .

Існуючі в потоці турбулентні вихри розміром δ спричиняють зміну швидкості потоку на величину $\Delta\omega$, тому градієнт швидкості виразиться в такий спосіб:

$$\frac{\Delta \omega}{\delta} = \frac{dw}{dx} \quad (3)$$

Підставимо (2) в (3) і визначимо градієнт швидкості:

$$\frac{\Delta \omega}{\delta} = \sqrt{\frac{E}{\mu}} \quad (4)$$

При інтегруванні рівняння нестационарної дифузії, у випадку допущення постійного часу контакту τ для всіх елементів, одержимо наступне, відоме як формула Хигби, значення коефіцієнта масоотдачі (:

$$\beta = 2\sqrt{D/(\pi \tau)}, \quad (5)$$

де D - коефіцієнт молекулярної дифузії.

Відповідно до запропонованої моделі час контакту вихрів буде таким:

$$\tau = \alpha_1 \cdot \frac{\delta}{\Delta \omega}, \quad (6)$$

де α_1 - коефіцієнт.

Підстановкою (4) в (6), а (6) в (5) одержимо коефіцієнт масоотдачі:

$$\beta = \alpha_1 \sqrt{D/(E \cdot \mu)}, \quad (7)$$

де $\alpha = 2/\sqrt{\pi} \alpha_1$ - коефіцієнт.

Формула (7) відповідає відомій залежності (1). До неї входить інтегральне значення величини динамічної в'язкості й урахується молекулярна й турбулентна в'язкість. Відомо, що на поверхні рідини турбулентні вихри додатково гасяться за рахунок дії сил поверхневого натягу σ . Тому на поверхні рідини утворюються дві, що змінюються в часі й по розмірах, зони. В одній зоні утвориться постійно оновлюєма поверхня, а в іншій – у поверхні утвориться прикордонний шар товщиною Z . Для турбулізації поверхневого шару й створення рівномірного по товщині опору переносу маси речовини поверхня рідини може бути опромінена акустичними хвилями частотою f .

Частоту визначають із умови рівності періоду акустичних коливань часу τ контакту вихрів в обсязі:

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{E}{\mu}}, \quad (8)$$

Товщина прикордонного шару f повного перемішування при впливі акустичних хвиль дорівнює:

$$Z = \frac{P}{\sqrt{2 \rho \mu \omega^3}}, \quad (9)$$

де $\omega = 2\pi$ - кругова частота акустичних хвиль; P - звуковий тиск.

Прийmemo товщину Z прикордонного шару рівної розміру δ вихря й виходячи із залежностей (4) і (9), визначимо граничну величину звукового тиску акустичних хвиль:

$$P = \Delta W \mu \sqrt{2 \cdot \rho \omega^3 / E} \quad (10)$$

Експериментальними дослідженнями підтверджені залежності (7, 8, 10). Для масообмінних процесів оптимальна частота акустичних коливань була близької до $1 \cdot 10^3$ Гц при дисипації енергії $E \approx 10^3$ Вт/м³ [1]. Для підвищення ефективності роботи масообмінних апаратів при їхньому конструюванні й модернізації доцільно проводити ретельний аналіз і оптимізацію енергетичних витрат. У виробництві продуктів харчування використовується різноманітна масообмінна апаратура із широким діапазоном дисипації енергії в активній зоні. Відомі теоретичні й експериментальні дані показують, що зі збільшенням дисипації енергії швидкість масообмінного процесу й, відповідно, енергетичні витрати зростають і необхідна їхня оптимізація [9].

В основу рішення завдання оптимізації покладений аналіз наведених витрат [10]. Як узагальнена оцінка ефективності роботи масообмінного апарата прийmemo суму річних наведених витрат для випуску продукту в апараті при масопереносі M [кг/рік]:

$$Z = (Z_0 + Z_k + Z_z + Z_e + Z_t) / M, \quad (11)$$

де $Z_0 = N_0 A_0 \cdot (V_c + V_a)$ - річні капітальні вкладення й амортизаційні відрахування на один апарат, грн/рік; $Z_k = N_k A_k \cdot (V_c + V_a)$ - річні капітальні вкладення й амортизаційні відрахування на будинок і спорудження, які доводяться на один апарат, грн/рік; $Z_z = A_z \cdot (V_c + V_a)$ - річний фонд зарплати при експлуатації одного апарата, грн/рік; $Z_e = A_e \cdot E \cdot V_a \cdot T$ - річна вартість енергії, затрачуваної на роботу одного апарата, грн/рік; $Z_t = A_t \cdot (V_c + V_a)$ - інші річні поточні витрати на один апарат, що залежать від обсягу апарата, грн/рік; A_e - нормативний коефіцієнт капвкладень і амортизацийний на капремонт апарата 1/рік; N_k - нормативний коефіцієнт капвкладень і амортизацийний на капремонт будинку, 1/рік; A_0 - питома первісна вартість апарата, грн/м³, A_k - питома первісна вартість будинку, грн/м³; V_c, V_a - обсяги, відповідно, неактивної (сепараційної) і активної зони апарата, м³; A_z - питомий фонд зарплати, грн/м³; T - річний фонд часу роботи апарата, с/рік;

A_e - вартість 1 Дж енергії, грн/Дж; E - дисипація енергії в активній зоні апарата, Вт/м³; A_T - питома річна вартість інших поточних витрат, грн/м³ рік. Після підстановки відповідних доданків в (11) одержимо суму річних наведених витрат:

$$Z = [(H_o A_o + H_k A_k + A_3 T + A_T) \cdot (V_a + V_c) + A_e E V_a T] / M \quad (12)$$

Річна кількість перенесеної маси M речовини в апараті складе:

$$M = k_a \cdot V_a \cdot \Delta C T = A \cdot E^n \cdot V_a \cdot \Delta C T, \quad (13)$$

де $k_a = A E^n$ - об'ємний коефіцієнт масопередачі; A - коефіцієнт; n - показник ступеня; ΔC - рушійна сила процесу, кг/м³.

Позначимо: $V_c = A_v \cdot V_a$, (14)

де A_v - коефіцієнт.

Підставимо V_a з (13) і V_c з (14) в (12) і одержимо

$$Z = B_1 E^{-n} + B_2 E^{-n} + B_3 E^{-n} + B_4 E^{1-n} + B_5 E^{-n}, \quad (15)$$

$$\text{де } B_1 = H_o A_o (1 + A_v) \frac{1}{A \cdot \Delta C T}; \quad B_2 = H_k A_k (1 + A_v) \frac{1}{A \cdot \Delta C \cdot T};$$

$$B_3 = A_3 (1 + A_v) \frac{T}{A \cdot \Delta C T}; \quad B_4 = A_e \frac{1}{A \cdot \Delta C}; \quad B_5 = A_T (1 + A_v) \frac{1}{A \cdot \Delta C T};$$

Мінімум функції $Z = Z(E)$ буде при $\frac{dZ}{dE} = 0$ (16)

$$\frac{dZ}{dE} = 0 \text{ при } E > E_{\text{опт}}; \quad \frac{dZ}{dE} = 0 \text{ при } E < E_{\text{опт}} \quad (17)$$

Мінімум наведених витрат буде при $E = E_{\text{опт}}$. З рівняння (16) визначимо оптимальне значення дисипації енергії:

$$E_{\text{опт}} = \frac{n(1 + A_v)(H_o A_o + H_k A_k + A_3 T + A_T)}{(1 - n) A_e T} \quad (18)$$

Таким чином, якщо дисипація енергії в апараті $E < E_{\text{опт}}$, то доцільно вводити в апарат додатково енергію для інтенсифікації процесу.

Висновки: 1. Турбулізація гідродинамічних плинів збільшує масовіддачу й теплоперенос, а тому при конструюванні апаратури необхідно прагнути створювати в потоках рідини збурювання з використанням акустичних хвиль, вібрацій, автоколивань, оребрення транспортуючих труб і виключати застійні зони в апаратах. 2. Створенням електричного поля усередині транспортуючих труб можна в 1, 7-3 рази збільшити коефіцієнти масопередачі й тепловіддачі в газорідних технологічних середовищах. 3. Для підвищення ефективності роботи масообмінних апаратів доцільно лише тоді вводити в апарат додаткову енергію, коли дисипація енергії в ньому менше розрахованого оптимального значення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Интенсификация процессов и защита оборудования пищевых производств: Монография /Под ред. проф. Ю.Г. Сухенка. – К.: ТОВ «ДІЯ», 2006. – 254 с.
2. Борщевский П.П. Интенсификация производств в пищевой промышленности. – К.: Урожай, 1989. – 136 с.

3. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / За ред. проф. І.Ф. Мележика. К.: НУХТ, 2003. – 400 с.
4. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача.-М.: Химия,- 1982.- 696 с.
5. Майков В.П., Цветков А.А. Методика сравнения эффективности контактных массообменных устройств. - ТОХТ, 1984. - Т.VI, №2. - С. 269-275.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

В.П. Васильев, С. Н. Кудашев, П. И. Осадчук, И. В. Москалюк,

Ключевые слова: процессы, массообмен, теплопередача, диссипация энергии, гидродинамика, затраты, вихри, оптимизация

Резюме

Приведен обзор и анализ способов интенсификации тепломассообменных процессов. Указаны направления исследований, которые могут быть наиболее эффективными.

WAYS OF INCREASE OF EFFICIENCY WARMLY-WEIGHT EXCHANGE PROCESSES IN FOOD MANUFACTURES.

V. P. Vasuliv, S. N. Kudahev, P.I.Osadchuk, I. V. Moskaluk

Key words: processes, mass-transfer, heat transfer, dissipation of energy, hydrodynamics, expenses, whirlwinds, optimization.

Summary

A review and analysis of methods of intensification of Thermal mass-transfer processes is resulted. Directions of researches which can be most effective are indicated.