

Тепловий і гідродинамічний розрахунок вакуум-апаратів

В.І. Павелко, кандидат технічних наук, професор, кафедра теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

Представлено основні положення методики теплового і гідродинамічного розрахунку вакуум-апаратів цукрового виробництва, розробленої на підставі виконаних досліджень гідродинаміки та теплообміну в утфельних вакуум-апаратах.

Ключові слова: вакуум-апарати, тепловий гідродинамічний розрахунок, аналіз, оптимізація.

Представлены основные положения методики теплового и гидродинамического расчета вакуум-аппаратов сахарного производства, разработанной на основании выполненных исследований гидродинамики и теплообмена в утфельных вакуум-аппаратах.

Ключевые слова: вакуум-аппараты, тепловой гидродинамический расчет, анализ, оптимизация.

Fundamental provisions of method of technique heat and hydrodynamic calculation of vacuum apparatus of sugar production, developed on the basis of the studies of hydrodynamics and heat exchange in massecuite vacuum apparatus are presented.

Key words: vacuum apparatus, heat and hydrodynamic calculation, analysis, optimisation.

Ефективність роботи вакуум-апаратів цукрового виробництва залежить від інтенсивності теплообміну і циркуляції утфеля. Велика різноманітність існуючих і розробка нових конструкцій цих апаратів вимагають універсального метода технологічного, теплового, гідродинамічного і конструктивного розрахунків.

Основоположником теорії і практики технологічного і теплового розрахунку утфельних вакуум-апаратів є професор В.Д. Попов [1]. Пізніше професор І.С. Гулий вніс деякі зміни і доповнення в методику теплового розрахунку вакуум-апаратів, запропонувавши, зокрема, визначення коефіцієнтів теплопередачі для утфелів 1-ї і 2-ї кристалізації за емпіричними залежностями, отриманими ним на підставі узагальнення власних дослідних даних по теплообміну під час уварювання утфелю в апаратах періодичної і безперервної дії [2].

У 1965-1975 роках групою дослідників (Ю.Г. Артюхов, В.І. Павелко, В.Р. Кулінченко, Б.Г. Дідушко) під керівництвом доцента В.Т. Гаряжі було виконано комплексне дослідження процесів теплообміну і гідродинаміки в робочих каналах вакуум-апаратів періодичної і безперервної дії. Вперше були отримані дані щодо зміни локальних параметрів теплообміну і гідродинаміки по довжині кип'ятильної труби для всіх гідродинамічних режимів течії утфеля та пароутфельної суміші. В залежності від зміни значень теплового потоку, швидкості циркуляції, теплофізичних властивостей утфеля визначені оптимальні режими роботи утфельних вакуум-апаратів, запропоновані розрахункові залежності для здійснення теплового і гідродинамічного розрахунку вакуум-

апаратів періодичної та безперервної дії, які ввійшли складовою частиною до створеної методики теплового і гідродинамічного розрахунків вказаних апаратів. Основні положення створених вищезазначеними науковцями методик теплового і гідродинамічного розрахунків утфельних вакуум-апаратів наводяться у цій статті.

Методика теплового розрахунку утфельних вакуум-апаратів оснований на роздільному визначенні коефіцієнтів тепловіддачі для економайзерної і випаровувальної ділянок кип'ятильної труби циркуляційно-трубчатого вакуум-апарата з наступним розрахунком середньої інтенсивності теплового потоку для всієї труби [3].

Для заданих вихідних величин: середньої інтенсивності теплового потоку для всієї труби апарата (q); геометричних розмірів кип'ятильної і циркуляційної труб (d_{mp} , l_{mp}) контура; п'єзометричного рівня ($h_{тр}$), при якому працює кип'ятильна труба, і технологічних параметрів цукрового розчину, що кристалізується, які визначаються загальною концентрацією сухих речовин утфеля (CP_y) і між кристального розчину (CP_m), а також масовим вмістом кристалів цукру (K_p) і чистотою розчину ($Ч$), з якого відбувається кристалізація, визначається середня приведена швидкість пари на виході із кип'ятильної труби

$$W_0'' = \frac{\bar{q} F_{тр}}{r \rho'' f_{тр}}, \quad (1)$$

де $F_{тр}$ – площа поверхні кип'ятильної труби, m^2 ; r – теплота пароутворення, kJ/kg ; ρ'' – густина пари, kg/m^3 ; $f_{тр}$ – площа поперечного перерізу кип'ятильної труби, m^2 .

Швидкість циркуляції розчину, що кристалізується, визначається за виразом:

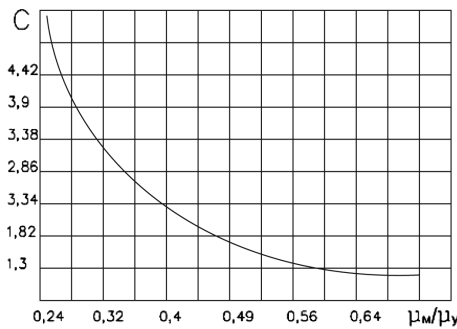


Рис. 1. Визначення сталої C в залежності від μ_M/μ_Y

$$W_o = c(W_o'')^{0,55} h_{тр}^{1,3} l_{тр}^{-h} \left(\frac{\mu_M f_{оп}}{\mu_Y f_{пл}} \right), \quad (2)$$

Де C – постійна (стала), що враховує зміну W_o в залежності від зміни μ_M/μ_Y , і визначається за графіком (рис 1); μ_M , μ_Y – коефіцієнт динамічної в'язкості між кристалного розчину та утфелю, відповідно Па·с; $f_{оп}$, $f_{пл}$ – площа поперечного перерізу опускних і підйомних труб, відповідно, м². Розрахункова температура утфелю

$$t_y = t_n + \Delta_{фх} + \Delta_{г} \quad (3)$$

де t_n – температура насичення (кипіння) розчину, °С; $\Delta_{фх}$, $\Delta_{г}$ – фізико-хімічна та гідродинамічна температурна депресія, °С.

Корисна різниця температур (розрахункове значення) визначається як:

$$\Delta t = t_n - t_y, \quad (4)$$

де t_n – температура гріючої пари, °С.

Коефіцієнти тепловіддачі при конденсації пари на вертикальній трубі довжиною визначаються за рівнянням Нуссельта:

$$\bar{\alpha}_1 = CA^4 \sqrt{l_{тр} (t_n - t_{конд.})}, \quad (5)$$

де $A = \sqrt[4]{\lambda^3 \text{rg}(\rho' - \rho'')v}$; $c = 0,943$ [1].

Середнє значення теплового потоку на економайзерній ділянці кип'ятильної труби апарата

$$\bar{q}_{ек} = \bar{q} W_o^{(0,5-0,005 \cdot CP_y)}, \quad (6)$$

Довжина економайзерної ділянки кип'ятильної труби

$$l_{ек} = \frac{\frac{\partial h'}{\partial p} [h_{тр} \rho' g - \Delta p_{оп} - \xi_{вх} \rho' \frac{W_o^2}{2g}] - \Delta h'_{оп}}{\left(\frac{4 \bar{q}_{ек}}{d_{тр} W_o \rho' g} + \left(\frac{\partial h'}{\partial p} \right) (\rho' g) [1 + 32 \cdot W_o \cdot \frac{\mu_Y}{d_{тр}^2} \cdot \rho' g] \right)}, \quad (7)$$

де $\Delta h'_{оп}$ – збільшення ентальпії в опускній трубі у випадку її обігріву, кДж/кг; ρ' – густина розчину, кг/м³; $\Delta P_{оп}$ – втрата тиску в опускній трубі, Па, визначається за виразом:

$$\Delta P_{оп}^{тр} = 32 \cdot W_o \cdot \mu_Y \cdot h_{тр} / d_{тр}^2, \quad (8)$$

Довжина випарувальної ділянки кип'ятильної труби

$$l_{вип} = l_{тр} - l_{ек}, \quad (9)$$

Інтенсивність теплового потоку на випарувальної ділянці для заданої середньої інтенсивності теплового потоку для всієї кип'ятильної труби

$$q_{лтр} = q_{ек} l_{ек} + q_{вип} \cdot l_{вип}; \quad (10)$$

$$\bar{q}_{вип} = (\bar{q}_{лтр} - \bar{q}_{ек} l_{ек}) / l_{вип}, \quad (11)$$

Коефіцієнт тепловіддачі на випарувальної ділянці кип'ятильної труби визначається за рівнянням:

$$(\bar{\alpha}_2)_{вип} = 5,39 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda_y (\bar{q} / r \rho'' a_y)^{0,6} p^{0,84} / \rho_y^{0,295} \sigma^{0,125} \nu^{0,1}, \quad (12)$$

Коефіцієнт тепловіддачі на економайзерній ділянці кип'ятильної труби визначається за критеріальним рівнянням:

$$Nu_{ек} = 7,1 \cdot Nu \{ [\bar{q}_{ек} (\rho'' r)^{-1} / W_o] Pr_y^{0,1} \}^{0,5}, \quad (13)$$

$Nu_{ек}$ для ламінарного режиму руху ($Re < 2300$) визначається за рівнянням:

$$Nu_{ек} = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr_y^{0,43} \cdot (Pr_y / Pr_{cm})^{0,25} \cdot Gr^{0,1} \cdot \epsilon, \quad (14)$$

Для турбулентного режиму руху ($Re > 2300$) $Nu_{ек}$ визначається за рівнянням:

$$Nu_{ек} = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_y^{0,43} \cdot (Pr_y / Pr_{cm})^{0,25}, \quad (15)$$

де $(Pr_y / Pr_{cm})^{0,25}$ – поправка на тепловіддачу, яка враховує вплив зміни теплофізичних параметрів утфеля зі зміною температури.

Середній коефіцієнт тепловіддачі від стінки до утфелю для всієї кип'ятильної труби апарата визначається як середньозважена величина:

$$\bar{\alpha}_2 l_{тр} = (\bar{\alpha}_2)_{ек} \cdot l_{ек} + (\bar{\alpha}_2)_{вип} \cdot l_{вип}, \quad (16)$$

$$\bar{\alpha}_2 = [(\bar{\alpha}_2)_{ек} \cdot l_{ек} + (\bar{\alpha}_2)_{вип} \cdot l_{вип}] / l_{тр}, \quad (17)$$

Коефіцієнт тепловіддачі в процесі уварювання утфелю змінюється внаслідок зміни теплофізичних властивостей розчину, що кристалізується, і витрати пари впродовж циклу роботи вакуум-апарата. Розрахункове значення загального коефіцієнту теплопередачі визначається як:

$$K = 1 / [(1/\bar{\alpha}_1) + (\delta_{cm}/\lambda_{cm}) + (1/\bar{\alpha}_2)], \quad (18)$$

Кількість випареної води у вакуум-апараті протягом його активної роботи визначається за виразом:

$$W_{в/а} = a_1 \frac{CP_y - CP_1}{CP_y} + a_2 \frac{CP_y - CP_2}{CP_y}, \quad \% \text{ мас.}, \quad (19)$$

де a_1 і a_2 – кількість сиропу і відтоків (паток), які підкачуються у вакуум-апарат під час уварювання утфелю, %мас., CP_1 і CP_2 – вміст сухих речовин в сиропі і відтоках, %мас.

Витрата гріючої пари на вакуум-апарати визначається за рівнянням:

$$D_{в/а} = x \cdot W_{в/а} + c, \quad (20)$$

де x – коефіцієнт, який враховує втрати в навколишнє середовище та співвідношення теплоти пароутворення вторинної і гріючої пари; c – величина, яка враховує можливості відхилення фактичної кількості та концентрації продуктів від розрахункових та водні підкачки в процесі варіння утфелю.

Площа поверхні нагріву вакуум-апарата, в м², визначається за формулою:

$$F = \frac{1000 \cdot D_{в/а} \cdot M \cdot \tau \cdot 60}{a \cdot z \cdot \Delta t \cdot K}, \quad (21)$$

де M – маса однієї варки утфеля, тн; a – вихід утфелю, % мас. (визначається технологічним розрахунком); z – тривалість циклу уварювання утфе-

ля, хв.; γ – теплота пароутворення, кДж/кг; K – коефіцієнт теплопередачі, кДж/м²К.

Визначенням розрахункового значення площі поверхні нагріву завершується проектний тепловий розрахунок утфельного циркуляційно-трубчастого вакуум-апарата, який дає підстави для подальшого конструктивного розрахунку. Проте отриманих даних теплового розрахунку вакуум-апарата недостатньо для повноцінного конструктивного розрахунку. Їх треба доповнювати даними, які отримують із гідродинамічного розрахунку вакуум-апарата.

Гідродинамічний розрахунок вакуум-апаратів оснований на спільному розв'язанні рівнянь матеріального і енергетичного балансів для циркуляційного контуру.

Рівняння матеріального балансу ($G_{\text{оп}} + G_{\text{пк}} = G' + G''$) приводить у відповідність масову витрату потоків утфеля в опускних ($G_{\text{оп}} = G'$) і підйомних ($G_{\text{пк}} = G' + G''$) каналах вакуум-апарата з урахуванням підкачок свіжого сиропу, паток, води і пари, що видаляється (G'').

Рівняння енергетичного балансу ($\Delta P_{\text{оп}} = \Delta P_{\text{прискор.}} + \Delta P_{\text{оп}}^{\text{опорів}}$) підтверджує факт, що при існуючій у вакуум-апараті швидкості циркуляції весь рухомий тиск ΔP витрачається на подолання всіх опорів циркуляційного контуру.

Втрати тиску в кип'ятильних (підйомних) трубах визначаються як:

$$\Delta P_{\text{підй.}} = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{тр}}^{\text{ек}} + \Delta P_{\text{тр}}^{\text{вип}} + P_{\text{вих}}, \quad (22)$$

$$\Delta P_{\text{тр}}^{\text{ек}} = 32 \cdot l_{\text{ек}} \cdot \mu_{\text{у}} \cdot W_{\text{о}} / d_{\text{тр}}^2, \quad (23)$$

$$\Delta P_{\text{тр}}^{\text{вип}} = 32(l_{\text{тр}} - l_{\text{ек}}) \mu_{\text{у}} \cdot W_{\text{о}} / d_{\text{тр}}^2 (1 - \varphi_{\text{сп}})^2, \quad (24)$$

$$\Delta P_{\text{вх}} = [1 + (500 \mu_{\text{у}} / W_{\text{о}} d_{\text{тр}} \rho')] W_{\text{о}}^2 \rho' / 2, \quad (25)$$

$$\Delta P_{\text{вих}} = [1 + (250 \mu_{\text{у}} / W_{\text{о}} d_{\text{тр}} \rho')] \{1 + W_{\text{о}}^2 \rho' / W_{\text{о}}\} W_{\text{о}}^2 \rho' / 2, \quad (26)$$

Втрата тиску на прискорення руху пароутфельної суміші в кип'ятильних трубах визначається як:

$$\Delta P_{\text{прискор.}} = W_{\text{о}}^2 \rho' \varphi_{\text{вих}} / (1 - \varphi_{\text{вих}}), \quad (27)$$

Втрата тиску в опускних каналах визначаються як:

$$\Delta P_{\text{оп}} = \Delta P_{\text{оп}}^{\text{вх}} + \Delta P_{\text{оп}}^{\text{тр}} + \Delta P_{\text{оп}}^{\text{вих}}, \quad (28)$$

$$\Delta P_{\text{оп}}^{\text{вх}} = [1,6 + (500 \cdot \mu_{\text{у}} / W_{\text{оп}} \cdot d_{\text{оп}}^{\text{тр}} \cdot \rho')] W_{\text{оп}}^2 \rho' / 2, \quad (29)$$

$$\Delta P_{\text{оп}}^{\text{вих}} = [1 + (250 \cdot \mu_{\text{у}} / W_{\text{оп}} \cdot d_{\text{оп}}^{\text{тр}} \cdot \rho')] W_{\text{оп}}^2 \rho' / 2, \quad (30)$$

$\Delta P_{\text{оп}}^{\text{вих}}$ визначається за виразом (8).

У вищевказаних виразах (23)-(30) всі теплофізичні властивості утфеля, як то: $\mu_{\text{у}}$, $\rho_{\text{у}}$, $c_{\text{у}}$, $a_{\text{у}}$ рекомендується визначати за методикою [3]. Там же приведені розрахункові залежності щодо визначення гідродинамічних параметрів пароут-

фельних потоків, таких як $\lambda_{\text{тр}}$, $\xi_{\text{вх}}$, $\xi_{\text{вих}}$, $W_{\text{о}}''$, $W_{\text{см}}$, $W_{\text{іст.}}$.

Вихідними даними для гідродинамічного розрахунку вакуум-апарата є технологічні характеристики утфеля на всіх стадіях уварювання, отримані на основі розв'язання рівнянь кінетики кристалізації, масообміну і технології, а також дані по інтенсивності теплообміну, які, в свою чергу, залежать від гідродинамічної ситуації в апараті. Через це тепловий і гідродинамічний розрахунок туфельних вакуум-апаратів ведуться сумісно методом поступових наближень. Суть цього метода полягає в тому, що задаючись послідовно декількома значеннями швидкості циркуляції утфеля $W_{\text{о}}$, визначають таке значення $W_{\text{о}}$, для якого справедливим буде рівняння енергетичного балансу циркуляційного контуру $\Delta P_{\text{о}} = \Delta P_{\text{підй.}} + \Delta P_{\text{прискор.}} + \Delta P_{\text{оп}}^{\text{опорів}}$.

Для наближених (одиничних) гідродинамічних розрахунків можна використовувати також розрахунково-графічний метод, який полягає в тому, що при заданих значеннях $W_{\text{о}}$ визначаються сумарні рухомі тиски і сумарні втрати тиску в циркуляційному контурі. Потім будується графік залежності рухомих тисків і гідравлічних опорів від швидкості циркуляції. Як відомо, рухомі тиски зі збільшенням швидкості циркуляції зменшуються, а гідравлічні опори зростають, через що шукані значення $W_{\text{о}}$ будуть визначені точкою перехрещення кривих $\Delta P_{\text{о}}$ і $\Delta P_{\text{опорів}}$.

Розглянуті в статті основні положення методик теплового і гідродинамічного розрахунку дозволяють аналізувати роботу діючих і проектувати оптимальні конструктивні елементи нових вакуум-апаратів, а також розробляти методи оптимізації і інтенсифікації процесів уварювання утфелів у циркуляційно-трубчастих вакуум-апаратах. ■

Список використаних джерел

1. В.Д. Попов. Тепловий розрахунок туфельних вакуум-апаратів, Держтехвидав України, К., 1958. - 327 с.
2. И.С. Гульий. Непрерывная варка и кристаллизация сахара. – М. : Пищевая промышленность, 1976. - 267 с.
3. В.Т. Гаряжа и др. Интенсификация процесса уваривания утфелей. - М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 152 с.

ЦІКАВІ НОВИНИ

Створена тривимірна матриця мережі кровоносних судин з цукру

Дослідники створили тривимірну матрицю, по якій вирощуються кровоносні судини з цукру, який розчиняється після того, як навколо нього наросте «судинна архітектура». Порожнисті трубки, що виходять в результаті, придатні для того, щоб по них разом з кров'ю доставлялися поживні речовини і кісьень для нових органів.