

УДК 664.1.05.004.15

В.Р. Кулінченко, доктор техн. наук, **І.К. Мотуз**, асистент.
 Національний університет харчових технологій
V.R. Kulintchenko, doctor of tech. science, **I.K. Motuz**, assistant.
 National university of food technologies

ДО РОЗРАХУНКУ ВАКУУМ-АПАРАТІВ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ
3. Тепловий розрахунок вакуум-апаратів
TO CALCULATION OF VAKUUM-PANS OF BATCH-TYPE
3. Thermal calculation of vakuu-m-pans

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень розроблені методичні основи теплового розрахунку вакуум-апарата періодичної дії і окремих елементів апаратів безперервної дії з нахиленими жолобчастими тепловіддавальними поверхнями.

Ключові слова: утіль, вакуум-апарат, теплообмін, тепловіддача, теплопередача, теплообмінна поверхня.

On the basis of theoretical and experimental researches methodical bases of thermal calculation of vakuu-m-pans of batch-type and separate elements of vehicles of continuous action are developed with sloping chamfer exchanging surfaces.

Keywords: massecuite, vakuu-m-pans, heat exchange, heat emission, heat-transfer, exchanging surface

На основании теоретических и экспериментальных исследований разработаны методические основы теплового расчета вакуум-аппарата периодического действия и отдельных элементов аппаратов непрерывного действия с наклонными желобчатыми теплоотдающими поверхностями.

Ключевые слова: утфель, вакуум-аппарат, теплообмен, теплоотдача, теплопередача, теплоотдающая поверхность

Методику теплового розрахунку вакуум-апаратів доцільно створювати з роздільним визначенням коефіцієнтів тепловіддачі для економайзерної й випарної ділянок кип'ятильної труби з наступним обчисленням середньої інтенсивності тепловіддачі для всієї труби. Методика теплового розрахунку утфельного циркуляційно-трубчастого вакуум-апарата полягає в наступному.

За заданими вихідними величинами: середній інтенсивності теплового потоку для всієї труби апарата (\bar{q}); розмірами кип'ятильної ($D_{тб}$, $L_{тб}$) і циркуляційної труб контуру; п'езометричному рівні h , при якому працює кип'ятильна труба, і технологічним параметрам цукрового розчину, що кристалізується, обумовлених загальною концентрацією сухих речовин утфеля ($С_{рy}$) і міжкристального розчину ($С_{рм}$), а також масовим вмістом кристалів цукру (KP) і доброякістю розчину ($Дб$), з якого відбувається кристалізація, визначаємо середню приведену швидкість пари на виході з кип'ятильної труби

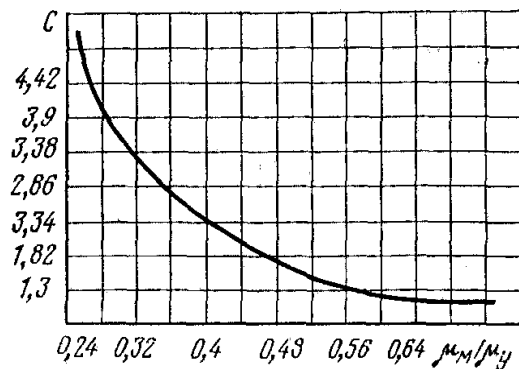


Рис.1. Визначення сталої C у залежності від відношення динамічної в'язкості міжкристального розчину до динамічної в'язкості утфеля [рівнянні (2)]

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

де $F_{m\dot{a}}$ – площа кип'ятильних туб грійочої камери; $f_{m\dot{a}}$ – площа однієї кип'ятильної труби; r – прихована теплота пароутворення (конденсації); ρ'' – густина грійочої пари.

Швидкість циркуляції розчину, що кристалізується в апараті, обчислюється за формулою:

$$W_0 = C(W_0'')^{0,55} h^{1,3} L^{-h} \frac{\mu_i f_{i\dot{i}}}{\mu_{\dot{o}} f_{i\dot{i}}}, \quad (2)$$

де C – стала величина, яка враховує зміну швидкості циркуляції W_0 залежно від зміни μ_m/μ_y і визначається за графіком рис.1; h – п'єзометричний напір; L – довжина шляху циркуляції (довжина кип'ятильної труби); f_{on} , $f_{ni\dot{o}}$ – площа живого перерізу опускних і підйомних труб.

Розрахункова температура утфеля

$$t_y = t_n + \Delta_{\phi x} + \Delta_z, \quad (3)$$

де t_n – температура насиченої пари; $\Delta_{\phi x}$ – фізико-хімічна депресія; Δ_z – гідродинамічна депресія.

Середній тепловий потік на економайзерній ділянці

$$q_{\dot{a}\dot{e}} = \bar{q}W_0^{(0,5-0,005\bar{N}\dot{a}\dot{o})}. \quad (4)$$

Довжина економайзерної ділянки кип'ятильної труби

$$l_{\dot{a}\dot{e}} = \frac{\frac{\partial i'}{\partial p} \left(h\rho'g - \Delta p_{i\dot{i}} - \zeta_{\dot{a}\dot{o}}\rho' \frac{W_0^2}{2g} \right) - \Delta i_{i\dot{i}}}{\frac{4q_{\dot{a}\dot{e}}}{D_{\dot{o}\dot{a}}W_0\rho'g} + \frac{\partial i'}{\partial p} \rho'g \left(1 + \frac{32W_0\mu_{\dot{o}}}{D_{\dot{o}\dot{a}}^2\rho'g} \right)}, \quad (5)$$

де $\Delta i'_{on}$ – підвищення ентальпії в опускній трубі у випадку її обігріву;

$$\Delta p_{on} = 32W_{on}\mu_y h/D_{m\dot{a}}^2 \quad (6)$$

Довжина випарної частини кип'ятильної труби

$$l_{\kappa} = L_{m\dot{a}} - l_{ек}. \quad (7)$$

Інтенсивність теплового потоку на випарній ділянці при заданій середній інтенсивності теплового потоку для всієї кип'ятильної труби

$$\bar{q}L_{\dot{o}\dot{a}} = \bar{q}_{\dot{a}\dot{e}}l_{\dot{a}\dot{e}} + \bar{q}_{\dot{e}}l_{\dot{e}}; \quad (8)$$

$$\bar{q}_{\dot{e}} = \frac{\bar{q}L_{\dot{o}\dot{a}} - \bar{q}_{\dot{a}\dot{e}}l_{\dot{a}\dot{e}}}{l_{\dot{e}}}. \quad (9)$$

Коефіцієнт тепловіддачі на випарній ділянці труби визначається за критеріальних рівнянням, яке у розгорнутому вигляді буде

$$\alpha_2 = 5,39 \cdot 10^{-4} \lambda_{\dot{o}} \left(\frac{q}{r\rho''a_{\dot{o}}} \right)^{0,6} \frac{\delta^{0,84}}{\rho_{\dot{o}}^{0,295} \sigma^{0,125} \nu_{\dot{o}}^{0,1}}. \quad (10)$$

Коефіцієнт тепловіддачі на економайзерній ділянці кип'ятильної труби

$$Nu_{\dot{a}\dot{e}} = 7,1 Nu \left(\frac{q_{y\dot{e}}}{\rho''rW_0} Pr_{\dot{o}}^{0,1} \right)^{0,5}. \quad (11)$$

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

$$Nu_{ек} = 0,15 Re^{0,33} Pr_y^{0,43} \left(\frac{Pr_y}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} Gr^{0,1}, \quad (12)$$

а для турбулентного режиму – по залежності

$$\text{Nu}_{\text{a}\ddot{\text{e}}} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}_{\ddot{\text{o}}}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{\ddot{\text{o}}}}{\text{Pr}_{\text{H}\ddot{\text{o}}}} \right)^{0,25}. \quad (13)$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі від стінки до утфеля для всієї кип'ятильної труби апарата обчислюється як середньозважена величина

$$\bar{\alpha}_2 L_{\ddot{\text{o}}\ddot{\text{a}}} = (\bar{\alpha}_2)_{\text{a}\ddot{\text{e}}} l_{\text{a}\ddot{\text{e}}} + (\bar{\alpha}_2)_{\text{e}} l_{\text{e}}; \quad (14)$$

$$\bar{\alpha}_2 = \frac{(\bar{\alpha}_2)_{\text{a}\ddot{\text{e}}} l_{\text{a}\ddot{\text{e}}} + (\bar{\alpha}_2)_{\text{e}} l_{\text{e}}}{L_{\ddot{\text{o}}\ddot{\text{a}}}}. \quad (15)$$

Методика теплового розрахунку елементів вакуум-апаратів з тепловою сорочкою полягає в наступному. При заданих вихідних величинах: середньої інтенсивності теплового потоку \bar{q} , площі поверхні теплообміну F , технологічних параметрах утфеля й між кристальної розчину $C_{\text{в}y}$, $C_{\text{в}m}$, KP , $Дб$, тиску в апараті p , температурі гріючої пари t_n визначаємо середню температуру кипіння утфеля, що відповідає тиску в апараті,

$$t_y = t_n + \Delta_{\text{ф}x} \quad (16)$$

і наявний температурний перепад

$$\Delta t_{\text{наявн}} = t_n - t_y = \Delta t_1 + \Delta t_{\text{cm}} + \Delta t_2, \quad (17)$$

де $\Delta t_1 = t_n - t_k$ – температурний перепад між парою й поверхнею конденсації; $\Delta t_{\text{cm}} = t_k - t_{\text{cm}}$ – температурний перепад за товщиною стінки; $\Delta t_2 = t_{\text{cm}} - t_y$ – температурний перепад з боку киплячого утфеля.

Коефіцієнти тепловіддачі при конденсації на вертикальній стінці висотою h визначаємо за рівнянням Нуссельта

$$\alpha_1 = 0,943 \left[\frac{\lambda^3 r g (\rho' - \rho'')}{\nu h (t_i - t_e)} \right]^{0,25}, \quad (18)$$

на горизонтальній поверхні [2]

$$\frac{\alpha_1}{\lambda} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho'}} = 0,1494 \sqrt{\frac{g}{\nu} \left(\frac{\sigma}{\rho'} \right)^{3/2} \frac{r}{c \Delta t}}. \quad (19)$$

Температурний перепад між парою й поверхнею конденсації

$$\Delta t_1 = \frac{q}{\alpha_1}. \quad (20)$$

Спад температури по товщині теплопередавальної поверхні

$$\Delta t_{\text{H}\ddot{\text{o}}} = q \frac{\delta}{\lambda} = R_{\text{H}\ddot{\text{o}}} q. \quad (21)$$

Інтенсивність тепловіддачі визначаємо за рівняннями [1]

$$100 > p > 20 \text{ êĬ à, } \alpha_2 = 1,08 \cdot 10^{-3} \frac{\rho_{\ddot{\text{o}}}^{0,2} \lambda_{\ddot{\text{o}}}^{0,53} \delta^{0,7}}{\nu_{\ddot{\text{o}}}^{0,25} \sigma^{0,43}} \left(\frac{q \tilde{n}_{\ddot{\text{o}}}}{r \rho''} \right)^{0,47}; \quad (22)$$

$$100 > p > 20 \text{ êĬ à, } \alpha_2 = 2,32 \cdot 10^{-4} \frac{\lambda_{\ddot{\text{o}}}^{1,7}}{\rho_{\ddot{\text{o}}}^{0,2} \nu_{\ddot{\text{o}}}^{0,3} \tilde{n}_{\ddot{\text{o}}}^{0,7} D_{\ddot{\text{o}}}^{1,3} f^{0,9}} \left(\frac{q}{r \rho'' \sigma} \right)^{0,5}, \quad (23)$$

а при тисках до 20 КПа – за рівнянням

$$\alpha_2 = 2,36 \cdot 10^{-3} \frac{\rho_{\ddot{\text{o}}}^{0,34} \lambda_{\ddot{\text{o}}}^{0,45} \delta^{0,5}}{\nu_{\ddot{\text{o}}}^{0,25} \sigma^{0,29}} \left(\frac{q \tilde{n}_{\ddot{\text{o}}}}{r \rho''} \right)^{0,55}. \quad (24)$$

Загальний коефіцієнт теплопередачі розраховується за рівнянням

$$\hat{E} = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (25)$$

або по номограмах [3] наведених на рис.2, які отримані В.А.Колесніковим

Отримані значення коефіцієнтів теплопередачі по формулі (25), або по номограмах повинні дорівнювати аналогічним знайденим за рівнянням (26)

$$K_p = \frac{q}{\Delta t_p} \quad (26)$$

У випадку значних розбіжностей порівнюваних величин уточнюється значення інтенсивності теплового потоку при нових значеннях і розрахунок повторюється в новому наближенні.

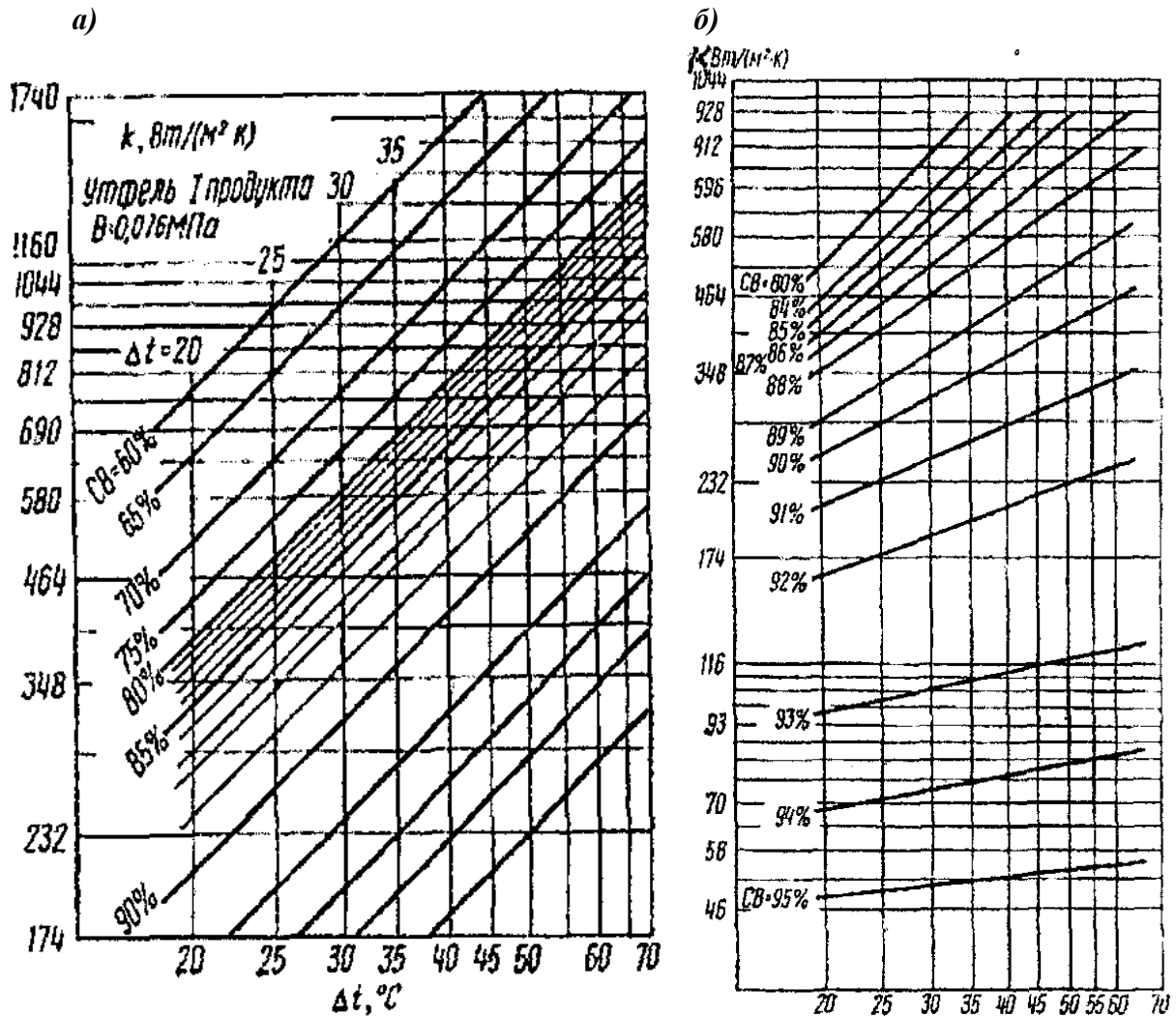


Рис.2. До визначення коефіцієнтів теплопередачі при уварюванні утфелів: а) першої кристалізації; б) другої кристалізації

Методика розрахунку тепловіддавальних похилих жолобчастих елементів вакуум-апаратів безперервної дії. У безперервно-діючому секційному вакуум-апараті з похилими жолобчастими тепловіддавальними поверхнями [1] цикл кристалізації повинен закінчуватися за час проходження уварюваного утфеля біля тепловіддавальної поверхні. Процес уварювання утфеля супроводжується постійно зменшуваним середнім коефіцієнтом теплопередачі. Найбільш різке зниження спостерігається при $KP > 30\%$ і досягає ~ 250 Вт/($m^2 \cdot K$) у кінці варки. Час, який відповідає збільшенню масового вмісту кристалів від 30 до 50...52%, займає біля 1 год. у загальному циклі варки. У процесі уварювання утфелів на

похилих тепловіддавальних поверхнях безперервно-діючого апарата парами з потенціалом нижче на 10...15 °С коефіцієнти тепловіддачі не знижуються менш ~ 600 Вт/(м²·К). З цього випливає доцільність ведення процесу уварювання утфеля с масовим вмістом кристалів понад 30% в секційному апараті з похилими тепловіддавальними поверхнями.

Конструктивно приймаємо час перебування утфеля на кожній секції теплообміну однаковим, а число секцій визначається тільки поверхнею теплообміну, тому що перемішування мас із різним вмістом C_p і KP виключається.

Виходячи із цих передумов, можна виконати розрахунок необхідної тепловіддавальної поверхні безперервно-діючого секційного вакуум-апарата при наступних вихідних даних: температурі нагрівальної пари t_n , тиску в надутфільному просторі p , що відповідає його температурі насичення t_n ; фізико-хімічній депресії $\Delta_{\phi x}$; графіку процесу уварювання утфеля для визначення початкових і кінцевих технологічних параметрів: $C_{вn}$, $C_{вк}$, $Дб_n$, $Дб_k$, KP_n , KP_k ; матеріалу нагрівальної поверхні (товщини δ і теплопровідності λ).

За цих умов знаходимо з графіка варки утфеля, $C_{вn}$ і $C_{вк}$. Визначаємо час варки τ_u і ділимо його на n рівних проміжків $\Delta\tau_i$, для яких знаходимо середню фізико-хімічну депресію $\Delta_{\phi x}$ (гідродинамічною депресією нехтуємо, тому що процес ведеться в тонкому шарі) і вміст $C_{вi}$, розраховуємо значення α_1 , Δt і Δt_{cm} по рівняннях (18)...(21).

Інтенсивність тепловіддачі до киплячого утфуля

$$\alpha_2 = 0,217 \cdot 10^{-3} \left(\frac{q}{r p^n D_o f} \right)^{0,43} \left[\frac{\lambda_o a_o^{0,3} \rho_o^{0,5} (V \delta)^{0,2}}{v_o^{0,4} \sigma^{0,5}} \right]. \quad (27)$$

Потім визначаємо K за рівнянням (25) або по номограмах рис.2 і порівнюємо його з K_p , отриманим за рівнянням (26). Кількість необхідної для випарювання води [2] знаходимо з графіка варки утфеля $\Delta\Sigma W$.

Зміна теплового навантаження, що відповідає кількості випаруваної води

$$\Sigma Q = r \Delta \Sigma W. \quad (28)$$

Користуючись отриманими даними, можна знайти повну площу нагрівальної поверхні секційного безперервно-діючого вакуум-апарата, а також площі окремих секцій теплообміну відповідно до конструктивних вимог і з урахуванням коефіцієнта 1,03, що враховує теплові втрати в навколишнє середовище,

$$F_0 = 1,03 \Sigma Q / \Sigma q \tau_u; \quad (29)$$

$$F_i = 1,03 \Sigma Q / q_i \Delta \tau_i. \quad (30)$$

Кількість утфеля, що надходить на безперервне уварювання,

$$G_y = A \sum \frac{S_{ex} C B_{ex}}{100 C B_{ex}},$$

(31) де A – секундна переробка заводом цукрового буряка, кг/с.

Приймаючи об'ємну секундну продуктивність заводу по звареному утфелю $G_{y,3}$ постійною, висоту H гравітаційно-стікаючого зварюваного шару утфеля не вище 60 мм, задавшись із конструктивних міркувань шириною нагрівальної жолобчастої поверхні B [1], знайдемо ухил кожного теплообмінного елемента за рівнянням

$$i = \frac{G_{o, \phi} \mu_o}{\rho_o (\dot{A} \dot{I})^2 k}, \quad (32)$$

де k – конструктивний коефіцієнт [37], рівний

$$k = \frac{0,167}{1 + 2 \frac{B}{H}} \text{ і } \delta \frac{B}{H} \geq 0,5. \quad (33)$$

Визначивши основні розміри й кут нахилу нагрівальних елементів тепловіддавальної поверхні безперервно-діючого секційного вакуум-апарата, можна здійснити розрахунок на міцність апарата і приступити до компонування самого апарата.

Висновок. На основі теоретичних і наукових досліджень розроблені методичні основи теплового розрахунку вакуум-апаратів періодичної дії циркуляційного типу і з тепловою сорочкою, а також жолобчастих тепловіддавальних поверхонь апаратів безперервної дії.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Интенсификация* процесса уваривания утфелей / В.Т. Горяжа, В.Р. Кулинченко, Ю.Г. Артюхов, Б.Г. Дидушко. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981.– 152 с.
2. *Попов В.Д.* Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы.– М.: Пищевая пром-сть, 1973.– 320 с.
3. *Разладин Ю.С., Разладин С.Ю.* Справочное пособие инженера теплоэнергетика сахарного производства. Пути экономии топлива, утилизации ВЭР. К.: Щек і Хорив, 2006.– 407 с.