

Розрахунок інтенсивності тепловіддачі до киплячих висококонцентрованих цукрових розчинів в утфельних вакуум-апаратах з підсиленою циркуляцією

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

Наведені співвідношення для розрахунку інтенсивності тепловіддачі до киплячих цукрових розчинів в утфельних вакуум-апаратах з підсиленою циркуляцією.

Ключові слова: вакуум-апарати, інтенсивність, тепловіддача, циркуляція

Приведены соотношения для расчета интенсивности теплоотдачи к кипящим сахарным растворам в утфельных вакуум-аппаратах с усиленной циркуляцией.

Ключевые слова: вакуум-аппараты, интенсивность, теплоотдача, циркуляция

Specify correlations for heat emission to a boiling solution of sugar massecuite in vacuum apparatus with reinforced circulation.

Keywords: vacuum apparatus, intensity, heat transfer, circulation.

В утфельних вертикально-трубчатих вакуум-апаратах з природною циркуляцією в залежності від теплового потоку, п'єзометричного рівня (швидкості циркуляції), теплофізичних властивостей утфелів в кип'ятільних трубах встановлюються відповідні режими течії утфеля і пароутфельної суміші.

Слід зазначити, що кип'ятільні труби вакуум-апаратів періодичної дії працюють в режимах, близьких до оптимального, тільки на початку уварювання утфелю при кипінні рідкого сиропу (патоки) і при мінімальному рівні продукту в апараті. На наступних стадіях уварювання утфелю зі зростанням рівня продукту в апараті, а також зі збільшенням його концентрації і в'язкості режим кипіння утфелю все більше відрізняється від оптимального.

Встановлено, що навіть при оптимальних умовах роботи циркуляційного контуру в кип'ятільній трубці вакуум-апарата в наявності є економайзерна ділянка, де відбувається підігрів утфелю до температури кипіння, і довжина якої збільшується зі зростанням концентрації сухих речовин утфелю CP_y і зниженням середнього теплового потоку \bar{q} для всієї труби [1].

Довжина економайзерної ділянки кип'ятільної труби вакуум-апарата визначається за виразом:

$$l_{ek} = \frac{\frac{\partial h'}{\partial h'} [h_{tp} p' g - \Delta p_{on} - \xi_{вх} p' \left(\frac{W_o^2}{2g} \right)] \Delta h'_{on}}{\frac{4\bar{q}_{ek}}{d_{tp} W_o p' g} + \left(\frac{\partial h'}{\partial p'} \right) (p' g) [1 + (32 \cdot W_o \frac{\mu_y}{d_{tp}^2} p \square \cdot g)]} \quad (1)$$

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

$$\Delta P'_{on} = 32 W_o \mu_y h_{tp} / d_{tp}^2 \quad (2)$$

Довжина економайзерної ділянки l_{ek} залежить, в першу чергу, від п'єзометричного рівня h_{tp} , при якому працює кип'ятільна труба, а, отже, від швидкості циркуляції W_o утфелю, яку визначають за виразом:

$$W_o = C (W_o^*)^{0,55} h_{tp}^{1,3} L^{-h} \left(\frac{\mu_{M,он}}{\mu_y f_{нд}} \right), \quad (3)$$

де C – стала величина, що враховує залежність швидкості циркуляції W_o від зміни в'язкості утфелю μ_y ; W_o^* – середня приведена швидкість пари на виході із кип'ятільної труби; L – робоча довжина кип'ятільної труби, м; $f_{он}$, $f_{нд}$ – відповідно, сумарна площа перерізу опускних і підйомних (кип'ятільних) труб вакуум-апарата, м²; μ_M , μ_y – відповідно, коефіцієнти динамічної в'язкості міжкристального розчину і утфелю, Па·с.

На завершальній стадії уварювання утфелю кип'ятільні труби по всій довжині працюють в режи-

мі економайзерної ділянки, і закипання утфелю відбувається вище гріючої (парової) камери апарата, в шарі «набухання».

Природно, що в цьому випадку швидкість циркуляції має надзвичайно низькі значення, що приводить до суттєвого зниження інтенсивності теплообміну. Таким чином, несприятлива гідродинамічна ситуація, яка виникає в періодично діючих вакуум-апаратах на завершальній стадії уварювання утфелю, вимагає підсилення (підвищення) швидкості циркуляції.

Для підвищення швидкості циркуляції в періодично діючих вакуум-апаратах запропоновані і впроваджені два способи: шляхом вдування пари (повітря) під нижню трубну решітку гріючої (парової) камери апарата, а також за допомогою встановлюваного в центральній опускній трубі механічного циркулятора, котрий подібно насосу нагнітає утфель під нижню трубну решітку [2].

Підсилення циркуляції механічним циркулятором досягається внаслідок створення самим циркулятором зовнішнього (додаткового) рушійного тиску. Додатковий тиск, створюваний циркулятором, залежить від геометричних розмірів, форми і частоти обертів циркулятора. Чим більшим є створюваний тиск, тим більше зростає швидкість циркуляції утфелю.

Однак, при цьому підвищується також тиск на вході у кип'ятильні труби і, відповідно, зростає недогрів утфелю до температури кипіння, тобто збільшується довжина економайзерної ділянки кип'ятильних труб вакуум-апарата і зменшується паровміст в них, а отже і рушійний тиск циркуляції Δp .

Інтенсивність тепловіддачі на економайзерній ділянці менша ніж на ділянці, де утфель кипить. Зі збільшенням швидкості циркуляції інтенсивність теплообміну на економайзерній ділянці зростає, проте в меншій степені, ніж зменшується інтенсивність тепловіддачі внаслідок збільшення довжини економайзерної ділянки і зменшення ділянки випаровувальної (кипіння). Збільшуються також гідравлічні опори, оскільки в підтрубному просторі і в опускній трубі утфель здійснює обертовий рух, що в деякій мірі зменшує ефективність цього способу підсилення циркуляції.

Цього недоліку можна уникнути при реалізації гідродинамічного способу підсилення циркуляції, бо при вдуванні пари (повітря) в кип'ятильні труби підвищується паровміст і економайзерна ділянка практично зникає, оскільки кипіння утфелю починається на вході в кип'ятильні труби.

В зв'язку з цим значно збільшується рушійний тиск як на ділянці кипіння, так і в надтрубному шарі «набухання».

Підвищення швидкості циркуляції утфелю при вдуванні пари (повітря) відбувається за рахунок підвищення середнього паровмісту в кип'ятильних трубах апарата. Проте, при цьому буде зростати також і гідравлічний опір, причому в більшій степені, ніж рушійний тиск (напір). Тож збільшення (підвищення) швидкості циркуляції зі зростанням кількості пари (повітря), що вдувається, буде відбуватись до тих пір, доки збільшення рушійного тиску буде випереджати зростання гідравлічного опору рухові пароутфельної суміші в кип'ятильних трубах.

Оскільки внизу (під нижньою трубною решіткою гріючої камери апарата) утфель надходить в кип'ятильну трубу недогрітим до температури кипіння, то частка теплоти пари (повітря), що вдувається, буде витрачатися на його підігрівання. При визначенні довжини економайзерної ділянки в чисельник рівняння (1) вводиться додаткова складова $\pm \Delta h_{вд}$, яка характеризує зміну ентальпії утфелю на вході в кип'ятильну трубу внаслідок вдування пари (повітря). Знак «+» ставиться тоді, коли пара (повітря), що вдувається, має меншу ентальпію, ніж утфель. Величину $\pm \Delta h_{вд}$ можна визначити за виразом:

$$\pm \Delta h_{вд} = G_{вд} (h''_{вд} - h'_{вд}) / W_o f_k \rho', \quad (4)$$

де $G_{вд}$ – витрата пари (повітря), кг/год; $h''_{вд}$ і $h'_{вд}$ – відповідно, ентальпія пари (повітря), що вдувається, і ентальпія утфелю на вході в кип'ятильну трубу, кДж/кг; f_k – сумарна площа перерізу кип'ятильних труб апарата, m^2 .

Якщо чисельник рівняння (1) при додаванні складової Δ перетворюється в нуль, то економайзерна ділянка зникає, і кипіння утфелю буде відбуватись по всій довжині кип'ятильної труби.

Інтенсивність тепловіддачі на економайзерній ділянці кип'ятильної труби нами запропоновано визначати за залежністю:

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

де $Nu_{ек}$, Nu – значення критеріїв Нуссельта, визначених за внутрішнім діаметром кип'ятильної труби, відповідно для конвективного теплообміну і поверхневого кипіння утфелю; $\bar{q}_{ек} = \bar{q} \cdot W_o$ – усереднене значення теплового потоку на економайзерній ділянці кип'ятильної труби; \bar{q} – усереднене значення теплового потоку, Вт/ m^2 , для всієї кип'ятильної труби (економайзерна + випаровувальна ділянка); $C=0,5-0,005$ CP_y ; ρ'' – густина утфельної пари, кг/ m^3 ; r – теплота пароутворення, кДж/кг; Pr_y – число Прандтля для утфеля.

Слід зазначити, що $Nu_{ек}$ для ламінарного режиму руху ($Re < 2300$) визначається за залежністю:

$$Nu_{ек}^{дам} = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr_y^{0,43} (Pr_y/Pr_{cm})^{0,25} Gr^{0,1} \cdot , \quad (6)$$

а для турбулентного режиму руху ($Re < 2300$) – за залежністю:

$$Nu_{ек}^{труб.} = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_y^{0,43} \cdot (Pr_y/Pr_{cm})^{0,25} , \quad (7)$$

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

Інтенсивність тепловіддачі на випаровувальній ділянці кип'ятильної труби визначається за залежністю:

$$(\bar{\alpha}_2)_{вип} = 5,39 \cdot 10^{-4} \lambda_y \cdot (\bar{q}_{вип} / r \rho_y a_y)^{0,6} p^{0,84} / \rho_y^{0,295} \sigma^{0,125} \nu^{0,1} , \quad (8)$$

де $\bar{q}_{вип} = (\bar{q}_{тр} \cdot \bar{q}_{ек} l_{ек}) / l_{вип}$ – середня інтенсивність теплового потоку на випаровувальній ділянці кип'ятильної труби, довжина якої визначається як $l_{вип} = l_{тр} l_{ек}$; $a_y, \rho_y, \sigma_y, \nu_y$ – теплофізичні параметри (властивості) утфелю, які визначаються за відомою методикою [1].

Інтенсивність тепловіддачі до киплячих утфелів для всієї кип'ятильної труби вакуум-апаратів з підсиленою циркуляцією визначається як середньозважена величина:

$$\bar{\alpha}_2 l_{тр} = (\bar{\alpha}_2)_{ек} \cdot l_{ек} + (\bar{\alpha}_2)_{вип} \cdot l_{вип} , \quad (9)$$

$$\bar{\alpha}_2 = [(\bar{\alpha}_2)_{ек} \cdot l_{ек} + (\bar{\alpha}_2)_{вип} \cdot l_{вип}] / l_{тр} \quad (10)$$

Висновки:

1. Інтенсивність тепловіддачі до киплячих утфелів у вертикально-трубчатих вакуум-апаратах з підсиленою циркуляцією утфелю пропонується визначати як середньозважену для всієї кип'ятильної труби апарата.

2. Підсилення циркуляції утфелю дозволяє інтенсифікувати процеси тепломасообміну при уварюванні утфелю і надає можливість використання для вакуум-апаратів як гріючої пари більш низького потенціалу, ніж для вакуум-апаратів з природною циркуляцією, що суттєво підвищує енергоефективність теплотехнологічної схеми цукрового заводу.

Список використаних джерел

1. *Интенсификация процесса уваривания утфелей* / В.Т. Горяжа и др. / - М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981, - 152 с.

2. *Гідродинамічний спосіб підсилення циркуляції в утфельних вакуум-апаратах* / В.І. Павелко, Ю.О. Проценко / - К. : Цукор України, 2013, №6(90), С. 26-29.

3. *Тепловий і гідродинамічний розрахунок вакуум-апаратів* / В.І. Павелко / - К. : Цукор України, 2013, №4(88), С. 29-31.

Рецензент: С.М. Василенко, д.т.н., проф.