

Тема 14. Випарні установки.

1. Основи розрахунку випарювання розчинів.
2. Вибір граничного числа корпусів установки.
3. Температурний режим роботи випарної установки.
4. Загальна і корисна різниця температур.
5. Розрахунок барометричного конденсатора.

1. Просте випарювання (однократна випарка) економічно доцільне на установках невеликої продуктивності (до $75 \text{ м}^3/\text{доб}$). Крім того, просте випарювання на установках періодичної дії виправдується при випарюванні розчинів, що відрізняються високою депресією.

Багаторазове випарювання, при якому використовується як гріюча пара, так і вторинна, значно заощаджує теплоту. Такий процес можливий або при використанні гріючої пари високого тиску, або при застосуванні вакууму.

Сутність багаторазового випарювання полягає в тому, що вторинна пара попереднього апарата використовується як гріюча пара у наступному апараті.

2. Витрата пари при багаторазовому випарюванні зменшується з додаванням числа корпусів в установці, але лише до деякої межі [2]. Зі збільшенням числа корпусів збільшуються і температурні втрати: чим більше корпусів в установці, тим більші втрати. Температура гріючої пари повинна бути хоча б на $6...7^\circ\text{C}$ вище точки кипіння розчину в даному корпусі.

Температурні втрати складаються з наступних втрат:

I. Втрати від зростання температури кипіння розчину з підвищенням його концентрації до насичення. Різниця між температурами кипіння розчину T_v , і розчинника T_a називається температурною депресією Δg , $^\circ\text{C}$ або K :

$$\Delta g = T_v - T_a,$$

Температурну депресію неконцентрованих розчинів і недисоційованих речовин можна розрахувати по рівнянню ебуліоскопії:

$$\Delta g = (R T_{\text{кип}}^2 / r) X,$$

де R — універсальна газова постійна, $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K})$;

$T_{\text{кип}}$ – температура кипіння розчинника, К;

r – молярна теплота випару розчинника, кДж/кмоль;

X – концентрація розчиненої речовини, кДж/кмоль.

Для концентрованих розчинів температурна депресія

$$\Delta g = (R T_{\text{кип}}^2 / r) (X / (1 - Bc)),$$

де B – константа, визначена експериментальним шляхом.

Зазвичай, температурну депресію не обчислюють, а знаходять по відповідних таблицях, складених на підставі експериментальних даних.

2. Втрати від підвищення температури кипіння розчину через гідростатичний тиск розчину в апараті. Температура кипіння розчину по висоті апарата неоднакова через зміну тиску. Тому, говорячи про температуру кипіння розчину в апараті, мають на увазі температуру кипіння середнього шару в гріючих трубах.

Гідростатичний тиск у середини гріючої труби прийнятий для розрахунку

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{в.п.}} + (\rho g H_{\text{тр}} / 2) (1 - \varepsilon),$$

де $P_{\text{в.п.}}$ – тиск вторинної пари в апараті, МПа;

ρ – щільність киплячого розчину, кг/м³;

$H_{\text{тр}}$ – висота кип'ятильних труб в апараті, м;

ε – паронаповнення (об'ємна частка пари в киплячому розчині), м³/м³.

3. Втрати від зниження тиску вторинної пари через гідравлічні опори в паропроводах між апаратами. У середньому ці втрати становлять 0,5...1,5°С на кожний корпус установки (гідравлічна депресія).

Температурні втрати у випарній установці обмежують можливе число її корпусів. Найбільший вплив при цьому вносить температурна депресія розчину.

3. Температурний режим роботи випарної установки

Температурний режим роботи однокорпусної випарної установки полягає у визначенні і розрахунку теплових втрат через температурну і

гідростатичну депресією, знаходженні корисної різниці температур і поверхні нагрівання.

Температурна депресія, що виражає підвищення температури кипіння розчину в порівнянні з температурою кипіння чистого розчинника (води) при тій же тиску

$$\Delta g = t_{к.р.} - t_{\theta},$$

де $t_{к.р.}$, t_{θ} — температура кипіння відповідно розчину і води, °С.

Температуру кипіння розчинів можна розраховувати різними способами.

Якщо відомі дві температури (t_1 , t_2) якого-небудь розчину при відповідних тисках (P_1 , P_2) можна використувати рівняння

$$\frac{\ln P_{A_1} - \lg P_{A_2}}{\ln P_{B_1} - \lg P_{B_2}} = K_n,$$

де P_{A_1} , P_{B_1} — тиск насиченої пари двох рідин при температурі t_1 , МПа;

P_{A_2} , P_{B_2} — тиск насиченої пари двох рідин при температурі t_2 , МПа;

K_n — постійна.

Температуру кипіння розчину можна знайти також за правилом Дюринга:

$$\frac{t_{p_1} - t_{p_2}}{\theta_{p_1} - \theta_{p_2}} = K_n,$$

де t_{δ_1} , t_{δ_2} - температура кипіння розчину при тисках відповідно P_1 і P_2 ;

θ_{δ_1} , θ_{δ_2} - температура кипіння води або іншої еталонної рідини.

Як вказувалося, температура кипіння розчину у випарному апараті змінюється по висоті гріючих труб. Середня температура кипіння визначається на середині висоти гріючих труб з урахуванням гідростатичного тиску.

Гідростатична депресія залежить від висоти рівня розчину, яка визначається по водомірному склу, і від щільності розчину. Оптимальна висота рівня розчину при випарюванні, м:

$$H_{opt} = [0,26 + 0,0014(\rho_p - \rho_v)] H_{mp},$$

де ρ_p , ρ_v – щільність розчину кінцевої концентрації і води при температурах кипіння відповідно, кг/м³;

H_{mp} – робоча висота труби, м.

При відсутності даних про температури кипіння розчину й води можна прийняти

$$(\rho_p - \rho_v) t_{кип} \approx (\rho_p - \rho_v) t = 20^\circ\text{C},$$

Гідростатична депресія

$$\Delta r = t_{cp} - t_{em},$$

де t_{cp} – температура кипіння води при тиску

$$P_{cp} = P_{en} + \frac{\rho g H}{2} (1 - \varepsilon),$$

t_{em} – температура вторинної пари в сепараторі апарата.

Температура вторинної пари в сепараторі визначається як температура кипіння води при її тиску, рівному тиску в апараті:

$$t_{em} = t_{em.б} + \Delta_{гидр},$$

де $t_{em.б}$ – температура вторинної пари в барометричному конденсаторі, °С;

$\Delta_{гидр}$ – гідравлічна депресія, приймається $\Delta_{гидр} = 0,5 \dots 1,5$ °С або К.

Середня температура кипіння розчину

$$t_{cp} = t_{кон} + \Delta r = t_{em.б} + \sum \Delta_{nim},$$

де $\sum \Delta_{nim}$ – сума температурних втрат,

$$\sum \Delta_{nim} = \Delta g + \Delta r + \Delta_{гидр}$$

4. Загальна і корисна різниця температур

Різниця між температурами гріючої пари першого корпусу установки й водяної пари в барометричному конденсаторі $t_{em.б}$, називається загальною різницею температур Δt_o :

$$\Delta t_o = t_{\text{г.п.}} - t_{\text{в.б.}}$$

Різниця між температурою гріючої пари і температурою кипіння розчину в одному апараті називається корисною різницею температур, °С або К:

$$\Delta t_{\text{кор}} = t_{\text{г.п.}} - t_{\text{к}} = \Delta t_o + \sum \Delta t_{\text{п.м.}}$$

Для визначення площі поверхні нагрівання випарного апарата корисну різницю температур $\Delta t_{\text{кор}}$ виражають через середню рушійну силу. Тоді площа поверхні нагрівання апарата, м²:

$$F = Q / (K \Delta t_{\text{кор}}),$$

де K – коефіцієнт теплопередачі.

Розподіл корисної різниці температур між окремими корпусами визначають при розрахунку:

- на мінімальну загальну площу поверхні всіх корпусів –

$$\Delta t_3 = \frac{\Delta t_{\text{г.п.}} \times \sqrt{\frac{Q}{K}}_i}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{Q}{K}}_i}$$

де Δt_i – корисна різниця температур i -ого корпусу, °С;

- на рівну площу поверхні корпусів – пропорційно відношенню

$$\Delta t_3 = \frac{\Delta t_{\text{г.п.}} \times Q / K_i}{\sum_{i=1}^n Q / K_i}$$

5. Розрахунок барометричного конденсатора

Для створення вакууму у випарних установках зазвичай застосовуються конденсатори змішання з барометричною трубою.

Витрата води на конденсаторі визначається з рівняння теплового балансу конденсатора, кг/с:

$$G_{\text{в}} = \frac{W(i_{\text{в.п.}} - t_{\text{в.п.}})}{C(t_{\text{в.п.}} - t_{\text{в.п.}})},$$

де W – витрата вторинної пари (випареної води) в останньому корпусі випарної установки, кг/с;

$i_{вт}$ – питома ентальпія вторинної пари в барометричному конденсаторі, Дж/кг;

$t_{в.поч}, t_{в.кін}$ – початкова і кінцева температура відповідно охолоджувальної води та суміші води і конденсату, °С.

Різниця температур між парою і рідиною на виході з конденсатора повинна бути 3...5°С. Тому кінцева температура води на виході з конденсатора приймається на 3...5°С нижче температури конденсації пари:

$$t_{кін} = t_{б.к.} - (3...5),$$

де $t_{б.к.}$ – температура пари в барометричному конденсаторі, °С.

Діаметр труби барометричного конденсатора визначається з рівняння витрати, м:

$$d_{б.к.} = \sqrt{\frac{4W}{\rho_n \pi v}},$$

де ρ_n – щільність пари, кг/м³;

v – швидкість руху пари, м/с, при залишковому тиску в конденсаторі приблизно 10⁴ Па можна прийняти $v = 15...25$ м/с.

Швидкість води в барометричній трубі, м/с:

$$v_в. = \frac{4(G_в + W)}{\rho_в \pi d_{б.к.}^2},$$

де $\rho_в$ – щільність води, кг/м³.

Висота барометричної труби, м:

$$H_{б.м.} = \frac{B}{\rho_в g} + (1 + \sum \xi + \lambda_{тр} \frac{H_{б.м.}}{d_{б.м.}}) \frac{v_в^2}{2g} + 0,5,$$

де B – вакуум у барометричному конденсаторі, Па;

$$B = P_{атм.} - P_{б.к.} = 9,8 \times 10^4 - P_{б.к.},$$

$P_{б.к.}$ – тиск у барометричному конденсаторі, Па;

$\sum \xi$ – коефіцієнт місцевих опорів на вході і виході із труби, можна прийняти $\sum \xi = 1,5$;

$\lambda_{тр}$ – коефіцієнт тертя.

Коефіцієнт тертя залежить від режиму течії води в барометричній трубці, що характеризується числом Рейнольдса

$$Re = v_{\text{ср}} d_{\text{б.т.}} \rho_{\text{в}} / \mu_{\text{в}},$$

де $\mu_{\text{в}}$ – динамічна в'язкість води, мПа·с.

Обчисливши число Рейнольдса, можна знайти коефіцієнт тертя по таблицях [3].

Приклад розрахунку однокорпусної випарної установки

Задача. Визначити витрату гріючої пари і площу поверхні нагрівання однокорпусної установки для концентрування розчину їдкого натру.

Вихідні дані для розрахунку

1. Витрата розчину $G = 2500$ кг/ч.
2. Початкова (вихідна) концентрація розчину $X_{\text{поч}} = 5\%$.
3. Кінцева концентрація розчину $X_{\text{кін}} = 40\%$.
4. Тиск гріючої пари $P_{\text{г.п}} = 0,6$ МПа.
5. Тиск вторинної пари $p_{\text{вт}} = 0,015$ МПа.
6. Розчин надходить в установку підігрітим до температури 100 °С.

Подача установки по випарюваній воді

$$W = G (1 - (X_{\text{поч}} / X_{\text{кін}})) = \frac{2500}{3800} \times \left(1 - \frac{5}{40}\right) = 0,6 \text{ кг/с.}$$

Перевіряємо кінцеву концентрацію випареного розчину:

$$X_{\text{кон}} = G X_{\text{поч}} / (G - W) = \frac{2500 \times 0.05}{2500 - 2160} = 0,36 = 36\%$$

Надалі розрахунок можна виконувати на 1 кг розчину, що надходить на випарювання:

$$w = W / C = \frac{2160}{2500} = 0,86 \text{ кг.}$$

Питома теплоємність розчину при початковій концентрації

$$C = (C_{\text{сух}} X_{\text{ноч}} + (100 - X_{\text{ноч}})) / 100 = \frac{4.13 \times 5 + (100 - 5)}{100} = 1.15 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

де $C_{\text{сух}}$ – питома теплоємність речовини в чистому виді, кДж/(кг·К),

$$C_{\text{сух}} = 4.13 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Температурну депресію знаходять по довідкових матеріалах [2],
 $\Delta_+ = 28^\circ\text{C}$.

Гідростатичну і гідравлічну депресію можна прийняти

$$\Delta r + \Delta_{\text{гидр}} = 2^\circ\text{C}.$$

Тоді сумарна депресія

$$\Sigma\Delta = \Delta_+ + \Delta r + \Delta_{\text{гидр}} = 28.0 + 2.0 = 30^\circ\text{C}.$$

Температура кипіння розчину

$$t_{\text{кр}} = 54 + 30 = 84^\circ\text{C}.$$

По таблицях водяної пари необхідно знайти ентальпії гріючої і вторинної пари:

$$P_{\text{г.н}} = 0.6 \text{ МПа}; \quad i_{\text{г.н}} = 2765 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$P_{\text{в.т}} = 0.15 \text{ МПа}; \quad i_{\text{в.т}} = 2489 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Коефіцієнти випару і самовипару:

$$\alpha_i = \frac{i_{\text{г.н}} - t_n}{i_{\text{вт.}} - t_{\text{к.р}}} = \frac{2765 - 158.0}{2489 - 180.0} = 1.12;$$

$$\beta = \frac{i_0 - t_{\text{к.р}}}{i_{\text{вт.}} - t_{\text{к.р}}} = \frac{101 - 180.0}{2489 - 180.0} = 0.034,$$

де t_0 – температура кипіння розчину на вході в апарат, $^\circ\text{C}$.

Питома витрата гріючої пари

$$d_{\text{г.н}} = \frac{\omega - C\beta}{\alpha_i} = \frac{0.86 - 1.15 \times 0.034}{1.12} = 0.82 \text{ кг}/\text{кг}.$$

Загальна витрата пари

$$D = d G_{\text{нач}} = 0.82 \times 2500 = 2052 \text{ кг}/\text{г}.$$

Теплова подача апарата

$$Q = D (i_{z,n} - t_n) = 2052 (2765 - 158) = 5349564 \text{ кДж/г.}$$

Температурний напір

$$\Delta t = 158,0 - 80,0 = 78^\circ\text{C}.$$

При розрахунку приймають коефіцієнт теплопередачі в I год $K=1530 \text{ кДж/(м}^2\cdot\text{К)}$.

Площа поверхні нагрівання установки

$$F = \frac{Q}{k \times \Delta t} = \frac{5349564}{1530 \times 78} = 44,9 \text{ м}^2.$$

За ГОСТ II 987-8I вибираємо випарний апарат з наступними характеристиками:

Питання для повторювання

1. Для чого проводиться випарювання розчинів?
2. Як вибрати кількість корпусів установки?
3. Як вибирається температурний режим роботи випарної установки?
4. В яких межах слід приймати загальну і корисну різницю температур?
5. Для чого застосовується барометричний конденсатор?