

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3

Тема заняття: Розрахунок багатокорпусної випарної установки

Питання для повторювання

1. Як визначити витрати води в системі оборотного водопостачання?
2. Як визначити розміри відстійників?
3. За якими параметрами складають балансові схеми?
4. Що таке продувка?

Завдання: Розрахувати прямоточну з природною циркуляцією багатокорпусну випарну установку для концентрування розчину хлористого кальцію.

Вихідні дані для розрахунку

1. Початкова витрата розчину $G_{noc} = 7$ т/г.
2. Початкова (вихідна) концентрація розчину $X_{noc} = 3\%$.
3. Кінцева концентрація розчину $X_{кин} = 40\%$.
4. Розчин в установку надходить підігрітим до температури кипіння $t_{noc} = 100^\circ\text{C}$.
5. Обігрів здійснюється насиченою водяною парою з тиском $P_{z.n} = 0,8$ МПа.
6. Тиск у барометричному конденсаторі $P_{б.к} = 0,01$ МПа.
7. Висота гріючих труб $H_{тр} = 5$ м.
8. Відбір екстрапари не здійснюється.

Подача установки по випарюваній воді

$$W = \frac{7000}{3600} \left(1 - \frac{3}{40} \right) = 6475 \text{ кг/год} = 1,8 \text{ кг/с.}$$

Інформація до розв'язання

Розподіл концентрацій розчину по корпусах установки буде залежати від співвідношення навантажень по випарюваній воді у кожному апараті. На підставі практичних даних можна прийняти масові кількості випарюваної води по корпусах у наступному співвідношенні: $1:2:3 = 1,0:1,1:1,2$.

Тоді масова витрата випарюваної води у першому корпусі

$$W_1 = \frac{6475 \times 1}{3600(1 + 1,1 + 1,2)} = 0,545 \text{ кг/с,}$$

у другому

$$W_2 = \frac{1.1 \times W}{3.3} = 0,599 \text{ кг/с,}$$

у третьому

$$W_3 = \frac{1.2 \times W}{3.3} = 0,654 \text{ кг/с.}$$

Разом $W = 1,779 \text{ кг/с} = 1,8 \text{ кг/с.}$

Потім визначають концентрацію розчину по корпусах, використовуючи рівняння теплового балансу. З першого корпуса в другий перейде розчину:

$$G_1 = C_{\text{поч}} - W_1 = \frac{7000}{3600} - 0,545 = 1,94 - 0,545 = 1,395 \text{ кг/с.}$$

Концентрація розчину

$$X_1 = G_{\text{поч}} X_{\text{поч}} / (G_{\text{поч}} - W_1) = \frac{1,94 \times 3}{1,94 - 0,545} = 4,17\%$$

Із другого корпуса в третій перейде розчину

$$G_2 = G_{\text{поч}} - W_1 - W_2 = 1,94 - 0,545 - 0,599 = 0,796 \text{ кг/с.}$$

Концентрація розчину

$$X_2 = \frac{1,94 \times 3}{0,796} = 7,3\%$$

Із третього корпуса виходить розчину

$$G_{\text{кін}} = G_{\text{поч}} - W = 1,94 - 1,8 = 0,14 \text{ кг/с.}$$

з концентрацією

$$X_{\text{кін}} = \frac{1,94 \times 3}{0,14} = 41,5 \%$$

що відповідає завданню.

Розрахунок перепаду тиску по корпусах

З вихідних даних видно, що загальний перепад тиску в установці дорівнює різниці тисків грючої пари і пари в барометричному конденсаторі:

$$\Delta p = 0,8 - 0,01 = 0,79 \text{ МПа.}$$

Попередньо загальний перепад тисків розподіляємо між корпусами установки нарівно, тобто на кожний корпус можна прийняти

$$\Delta p = 0,79:3 = 0,263 \text{ МПа.}$$

Тоді абсолютні тиски розподіляться по корпусах у такий спосіб:

- у третьому корпусі $P_3 = 0,01 \text{ МПа}$ (задане),
- у другому $P_2 = 0,01 + 0,263 = 0,273 \text{ МПа}$; у першому $P_1 = 0,273 + 0,263 = 0,536 \text{ МПа}$.

Тиск гріючої пари

$$P_{2,p} = 0,536 + 0,263 = 0,799 \approx 0,8 \text{ МПа,}$$

що відповідає завданню.

Знаходимо температури насичених пар води й питомі теплоти паротворення для прийнятих тисків (табл. 1.13).

Таблиця 1.1 - Температури насичених пар води й питомі теплоти паротворення

Температура насиченої пари, С	Питома теплота паротворення
гріюча пара, $t_{1200} = 169,6$;	$r_1 = 2057 \text{ кДж/кг}$;
у першому корпусі $t_{2200} = 153,2$;	$r_2 = 2113 \text{ кДж/кг}$;
у другому $t_{3200} = 121,7$;	$r_3 = 2156 \text{ кДж/кг}$;
у третьому $i = 45,4$;	$r_4 = 2190 \text{ кДж/кг}$.

Розрахунок температурних втрат

Знаходимо температури кипіння розчинів при атмосферному тиску (табл.1.14) і визначаємо температурну депресію по корпусах згідно.

Таблиця 1.2 - Температури кипіння розчинів при атмосферному тиску

Корпус	Концентрація CaCl_2 , %	Температура кипіння, °С	Депресія °С
Перший	4,17	100,8	0,8
Другий	7,46	101,5	1,5
Третій	40,0	120,0	20,0

При спрощеному розрахунку температурну депресію можна не уточнювати. Отже, сумарна температурна депресія

$$\Delta g = 0,8 + 1,5 + 20,0 = 22,3^\circ\text{C.}$$

Потім розраховуємо гідростатичну депресію, що обумовлена різницею тисків у середньому шарі киплячого розчину і на його поверхні. Для цього спочатку знаходимо за довідковим даними щільність розчину хлористого кальцію при температурі 20 °С (табл. 1.15).

Таблиця 1.3 - Щільність розчину хлористого кальцію при температурі 20 °С

Корпус	Концентрація $CaCl_2$, %	Щільність, кг/м ³
Перший	4,17	1014
Другий	7,46	1033
Третій	40,0	1390

При визначенні щільності розчинів по кожному корпусу зневажають зміною її з підвищенням температури від 20°С до температури кипіння через малість коефіцієнта об'ємного розширення.

Далі визначаємо температури вторинних пар по корпусах установки (для цього гідравлічну депресію між корпусами установки приймаємо рівної 1°С):

$$t_{в.н.1} = t_{г.н.2} + \Delta_{гидр} = 153,2 + 1,0 = 154,2 ;$$

$$t_{в.н.2} = t_{г.н.3} + \Delta_{гидр} = 121,7 + 1,0 = 122,7 ;$$

$$t_{в.н.3} = t_{г.н.4} + \Delta_{гидр} = 45,4 + 1,0 = 46,4 .$$

Знаючи температури вторинних пар, знаходимо їхні тиски [3].

Температура вторинних пар, °С: $t_{в.н.1} = 54,2$; $t_{в.н.2} = 122,8$; $t_{в.н.3} = 46,4$,

Тиск, МПа: 0,54; 0,27; 0,011 відповідно.

Розраховуємо тиск у середньому шарі киплячого розчину кожного корпуса випарної установки. При бульбашковому режимі кипіння розчину перенаповнення $\varepsilon = 0,4 \dots 0,6$. Для даного випадку приймемо $\varepsilon = 0,5$.

Тоді тиск у середньому шарі кип'ятільних труб

$$P_{1cp} = P_{в.н.1} + \frac{\rho_1 g H_{тр}}{2} (1 - \varepsilon) =$$

$$= 0,54 + \frac{1014 \times 9.8 \times 5}{2} (1 - 0,5) = 54,0 \times 10^4 + 1,24 \times 10^4 = 55,24 \times 10^4 \text{ Па;}$$

$$P_{2cp} = 0,27 + \frac{1033 \times 9.8 \times 5}{2} (1 - 0,5) = 27,0 \times 10^4 + 1,26 \times 10^4 = 28,26 \times 10^4 \text{ Па;}$$

$$P_{зср.} = 0,011 + \frac{1390 \times 9,8 \times 5}{2} (1 - 0,5) = 1,1 \times 10^4 + 1,7 \times 10^4 = 2,8 \times 10^4 \text{ Па};$$

Цим тискам відповідають наступні температури кипіння і теплоти випарування розчинника.

Таблиця 1.4 - Температури кипіння й теплоти випарування розчинника

Тиск	Температура кипіння	Теплота випару
$P_{1ср} = 0,552 \text{ МПа}$	154,6 °C	2107 кДж/кг
$P_{2ср} = 0,282 \text{ МПа}$	131,5 °C	2180 кДж/кг
$P_{3ср} = 0,028 \text{ МПа}$	66,8 °C	2189 кДж/кг

Гідростатична депресія:

у першому корпусі

$$\Delta_{1r} = t_{1ср} - t_{1ен} = 154,6 - 154,2 = 0,4^\circ\text{C};$$

у другому

$$\Delta_{2r} = t_{2ср} - t_{2ен} = 131,5 - 122,8 = 8,7^\circ\text{C};$$

у третьому

$$\Delta_{3r} = t_{3ср} - t_{3ен} = 130,5 - 121,4 = 9,1^\circ\text{C};$$

Сума гідростатичних депресій

$$\Sigma \Delta_r = \Delta_{1r} + \Delta_{2r} + \Delta_{3r} = 0,4 + 8,7 + 9,1 = 18,2^\circ\text{C}.$$

Втрату різниці температур між корпусами приймаємо 1°C. Отже, сумарні втрати теплоти від гідравлічних депресій

$$\Sigma \Delta_{відп} = 1 \times 3 = 3^\circ\text{C}.$$

Сумарні температурні втрати для установки в цілому

$$\Sigma \Delta t_{ном} = \Sigma \Delta g + \Sigma \Delta r + \Sigma \Delta_{відп} = 22,3 + 18,2 + 3,0 = 43,5^\circ\text{C}.$$

Температури кипіння розчинів по корпусах установки:

у першому корпусі

$$t_{1к} = t_{2r} + \Delta_{1g} + \Delta_{1r} + \Delta_{1відп} = 153,2 + 0,8 + 0,4 + 1,0 = 155,4^\circ\text{C}.$$

у другому

$$t_{2к} = t_{3r} + \Delta_{2g} + \Delta_{2r} + \Delta_{2відп} = 121,7 + 8,7 + 1,0 = 131,4^\circ\text{C}.$$

у третьому

$$t_{3к} = t_{4r} + \Delta t_{3g} + \Delta t_{3r} + \Delta t_{3цидp} = 45,4 + 20,0 + 9,1 + 1,0 = 75,5^{\circ}\text{C}.$$

Розрахунок корисної різниці температур

Загальна різниця температур

$$\Delta t_{\theta} = 169,6 - 45,5 = 124,2^{\circ}\text{C}.$$

Отже, корисна різниця температур всієї установки

$$\Delta t_{\text{кор}} = 124,2 - 43,5 = 80,7^{\circ}\text{C}.$$

Корисні різниці температур:

у першому корпусі

$$\Delta t_{1\text{кор}} = t_{1r} - t_{1до} = 169,6 - 155,4 = 14,2^{\circ}\text{C},$$

у другому

$$\Delta t_{2\text{кор}} = t_{2r} - t_{2до} = 153,2 - 131,4 = 21,8^{\circ}\text{C},$$

у третьому

$$\Delta t_{3\text{кор}} = t_{3r} - t_{3до} = 121,7 - 75,5 = 46,2^{\circ}\text{C}.$$

Загальна корисна різниця температур

$$\Delta t_{\text{кор}} = 14,2 + 21,8 + 46,2 = 81,5^{\circ}\text{C}.$$

Розрахунок теплових навантажень

Теплові навантаження по корпусах визначаємо рішенням рівнянь теплових балансів. Для спрощення теплові баланси складемо без урахування теплових втрат. Тоді витрата теплоти:

у першому корпусі

$$Q_1 = W_1 \times r_2 = 0,545 \times 2113 \times 10^3 = 1151500 \text{ Вт},$$

у другому

$$\begin{aligned} Q_2 &= W_2 \times r_3 - G_1 C_1 (t_{1до} - t_{2к}) = \\ &= 0,599 \times 2156 \times 10^3 - 1,55 \times 4190 \times 0,96 (155,4 - 131,4) = 1197580 \text{ Вт}, \end{aligned}$$

у третьому

$$\begin{aligned} Q_3 &= W_3 \times r_4 - G_2 C_2 (t_{2до} - t_{3к}) = \\ &= 0,654 \times 2190 \times 10^3 - 1,12 \times 4190 \times 0,948 (131,4 - 75,5) = 1343285 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Витрата гріючої пари у першому корпусі

$$G_{e.n.} = 1151500 / (2057 \times 10^3) = 0,56 \text{ кг/с.}$$

Питома витрата пари на випарювання

$$D = 0,56/1,8 = 0,31 \text{ кг/кг.}$$

Розрахунок коефіцієнтів теплопередачі

Коефіцієнти теплопередачі по корпусах, Вт/(м²·К)

$$\alpha_1 \left(\frac{1}{\sigma/\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1},$$

де α_1 – коефіцієнт теплопередачі від пари, що конденсується, до стінки, Вт/(м·К); значення α_1 коливається в межах 3000...17500 Вт/(м·К);

$\Sigma\sigma/\lambda$ – термічний опір стінки і накипу, м²·К/Вт,

$$\Sigma\sigma/\lambda = \frac{0.002}{25.0} + \frac{0.0005}{2.42} = 2,87 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \times \text{К} / \text{Вт},$$

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до рідини, м²·К /Вт.

Для всіх корпусів установки можна прийняти $\alpha_1 = 1000.0$ Вт/(м²·К).

За формулою Стермана:

у першому корпусі

$$\alpha_2^3 = 1,9 P_{e.n.}^{0.4} g^{0.73}$$

$$\alpha_2^3 = 1,9 \times 0,011^{0.4} \times 20000^{0.73} = 393 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{год} \times \text{град}),$$

де P – тиск вторинної пари в установці, МПа;

g – питома теплове навантаження для установок із природною циркуляцією, можна прийняти $g = 20000 \dots 50000$ Вт/м²;

у другому

$$\alpha_2^2 = 11,3 \times 0,27^{0.4} \times 20000^{0.548} = 1400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{год} \times \text{град}),$$

у третьому

$$\alpha_2^1 = 97,7 \times 0,54^{0.4} \times 20000^{0.373} = 2972 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{год} \times \text{град}).$$

Тоді коефіцієнт теплопередачі:

у третьому корпусі

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{10000} + 2.87 \times 10^4 + \frac{1}{393.0}} = 263 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К}),$$

у другому

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{10000} + 2.87 \times 10^4 + \frac{1}{1400}} = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К}),$$

у першому

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{10000} + 2.87 \times 10^4 + \frac{1}{2972}} = 1428 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К}).$$

Розподіл корисної різниці температур

Корисні різниці температур у корпусах установки можна знайти з умови рівності поверхні їхнього нагрівання:

у першому корпусі

$$\Delta t_{кор,j} = \sum_{j=1}^n \Delta t_{кор}^{j=1}$$

$$\Delta t_{кор,j} = 81,5 \frac{1151500/1428}{\frac{1151500}{1428} + \frac{1197580}{1000} + \frac{1343285}{263}} = 9,2^\circ\text{C},$$

де $\Delta t_{кор}$, Q_j , K_j – відповідно корисна різниця температур, теплове навантаження й коефіцієнт теплопередачі для j -го корпуса,

у другому

$$\Delta t_{кор,2} = 81,5 \frac{1195}{7111} = 13,04^\circ\text{C},$$

у третьому

$$\Delta t_{кор,3} = 81,5 \frac{5107}{7111} = 58,53^\circ\text{C},$$

Площа поверхні теплопередачі в першому корпусі

$$F_1 = \frac{1151500}{1428 \times 9.2} = 87,6 \text{ м}^2,$$

у другому

$$F_2 = \frac{1197580}{1000 \times 13.04} = 91,8 \text{ м}^2,$$

у третьому

$$F_3 = \frac{1343285}{263 \times 58.53} = 87,2 \text{ м}^2.$$

За ГОСТ 11987-81 вибираємо випарний апарат з наступними характеристиками:

номінальна площа поверхні теплообміну, м ²	112
діаметр труб, мм	38x2
висота труб, мм	5000
діаметр грійної камери, мм	1000
діаметр циркуляційної труби, мм	600
загальна висота апарата, мм	13000

Розрахунок барометричного конденсатора

Витрата води в конденсаторі

$$G_6 = \frac{0.654 (2583000 - 4.19 \times 10^3 \times 43.4)}{4.19 \times 10^3 (43.4 - 20)} = 16 \text{ кг/с.}$$

Діаметр барометричного конденсатора

$$d_{6.к} = \sqrt{\frac{4 \times 0.654}{0.98 \times 3.14 \times 20}} = 0,2 \text{ м.}$$

По нормалях НИИХИММАШа підбираємо конденсатор діаметром, що дорівнює розрахунковому або найближчому більшому. У цьому випадку можна прийняти $d_{6.к} = 600 \text{ мм}$.

Швидкість води в барометричній трубі

$$v_6 = \frac{4 (16.0 + 0.654)}{1000 \times 3.14 \times 0.3^2} = 0.235 \text{ м/с.}$$

Висота барометричної труби

$$\begin{aligned}
 H_{\delta.m} &= \frac{B}{1000 \times 9.8} + \left(1 + 1.5 + 0.013 \times \frac{H_{\delta.m.}}{0.3} \right) \frac{0.235^2}{2 \times 9.8} + 0.5 = \\
 &= \frac{8.7 \times 10^4}{1000 \times 9.8} + \left(1 + 1.5 + 0.013 \times \frac{H_{\delta.m.}}{0.3} \right) \frac{0.235^2}{2 \times 9.8} + 0.5 = 9.4 \text{ м,}
 \end{aligned}$$

де $B = 8,7 \times 10^4 - 1,1 \times 10^4 = 8,7 \times 10^4$ Па .

