

Практичне заняття. Розрахунок кристалізаторів

Мета заняття: опанувати навички розрахунку кристалізаторів для вилучення компонентів виробних стічних вод

Розрахунок вакуум-випарного кристалізатора у виробництві сульфату калію

Початкові дані. Продуктивність установки за кристалічним продуктом $G_k = 3500$ кг/год; середній розмір продукційних кристалів $d_k = 1,6$ мм; в циркуляційний цикл припустимо винесення зерен розміром $d_b = 0,3$ мм; температура кристалізації $t_k = 50$ °С; початковий розчин концентрацією $x_{np} = 20,0$ % мас. подається в установку з температурою $t_n = 90$ °С.

Обґрунтування вибору конструкції кристалізатора. Сульфат калію K_2SO_4 – безколірна кристалічна речовина, що використовується як калійне добриво, а також для отримання галуни та ін. Сульфат калію належить до неорганічних сполук з низьким температурним коефіцієнтом розчинності, тому доцільно застосувати вакуум-випарний класифікуючий кристалізатор.

Фізико-хімічні властивості солі, що кристалізується. За даними табл. А.1 маємо: молярна маса $M_c = 174,3$ кг/кмоль; густина $\rho_k = 2660$ кг/м³; питома теплоємність $c_k = 784$ Дж/(кг·К); питома теплота кристалізації $q = 51,5$ кДж/кг; коефіцієнт форми $\psi = 1$.

Фізико-хімічні властивості системи

За даними табл. А.2 розчинність сульфату калію дорівнює при 20 °С $x_{20} = 10,9$ г/100 г $H_2O = 9,8$ % мас. = 0,62 моль/кг H_2O ; при 50 °С $x_{50} = 16,6$ г/100 г $H_2O = 14,2$ % мас. = 0,95 моль/кг H_2O ; при 60 °С $x_{60} = 18,2$ г/100 г $H_2O = 15,4$ % мас. = 1,04 моль/кг H_2O .

Густина маточного розчину K_2SO_4 , насиченого при 50 °С, та початкового розчину при 90 °С визначаємо за рівнянням (10)

$$\rho_{mp} = 1008 + 8,37 \cdot 14,2 - 0,45 \cdot 50 = 1104 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{np} = 1008 + 8,37 \cdot 20 - 0,45 \cdot 90 = 1135 \text{ кг/м}^3.$$

В'язкість насиченого розчину сульфату калію при 50 °С розраховуємо за формулою (12)

$$\mu_p = 10^{\lg 0,549 + 0,07878 - 24,045 / (50 + 273) + 0,0962 \cdot 0,95} = 0,685 \text{ мПа}\cdot\text{с}.$$

Питома теплоємність маточного розчину сульфату калію, насиченого при 50 °С, та початкового розчину при 90 °С визначаємо за рівнянням (13)

$$c_{mp} = 4190 \cdot (1 - 0,142) = 3595 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$c_{np} = 4190 \cdot (1 - 0,2) = 3352 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Коефіцієнт молекулярної дифузії сульфату калію у воді беремо за даними табл. А.5 $D_x = 8,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$.

Параметри властивостей пересиченого розчину

Розраховуємо фактор розчинності сульфату калію:

$$\text{при } 20 \text{ °С } a_{20} = (18,2 - 16,6) / (10 \cdot 10,9) = 0,0147;$$

$$\text{при } 50 \text{ °С } a_{50} = (18,2 - 16,6) / (10 \cdot 16,6) = 0,0096.$$

При $a_{50} > 0,008$ стала k дорівнює

$$k = 0,855 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-0,0163 \cdot 50) = 0,38 \cdot 10^{-3}.$$

Граничне пересичення розчину сульфату калію при 50 °С визначаємо за формулою (22)

$$\Delta x_{cp}^* = \frac{0,00038 \cdot 174,3 \cdot 16,6}{1 + 4,5 \cdot (1 - \exp(-12,5 \cdot 0,0147))} = 0,62 \frac{\text{г}}{100 \text{ г H}_2\text{O}} = 6,8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Вибір циркуляційного насоса і визначення матеріальних потоків. За практичними даними роботи кристалізаційних установок для отримання сульфату калію пересичення розчину на вході в псевдозріджений шар кристалів беремо $\Delta x_{ex} = 3,2 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Розрахункову об'ємну подачу циркуляційного насоса визначаємо за рівнянням (47)

$$V_{ци} = 3500 / 3,2 = 1093,75 \text{ м}^3/\text{год}.$$

За даними табл. А.7 вибираємо вертикальний осьовий насос типу ОХ 2-34 з такими параметрами: подача $V_0 = 1000 \text{ м}^3/\text{год} = 0,278 \text{ м}^3/\text{с}$, напір $H_0 = 4,5 \text{ м}$, частота обертання $n_0 = 985 \text{ об}/\text{хв}$, потужність двигуна $N_0 = 36 \text{ кВт}$.

Тоді фактичне пересичення розчину на вході в псевдозріджений шар кристалів становить

$$\Delta x_{ex} = G_k / V_{ци} = 3500 / 1000 = 3,5 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Масова витрата циркулюючого розчину дорівнює

$$G_{cp} = V_{ци} \cdot \rho_{mp} = 1000 \cdot 1104 = 1,104 \cdot 10^6 \text{ кг/год.}$$

Об'ємна витрата суспензії, що відбирається (див. рівняння (49))

$$V_{ec} = \frac{3500}{2660 \cdot (1 - 0,7)} = 4,38 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Для відбору кристалічної суспензії із солезбірника вибираємо насос ежекторного типу з подачею $V_{ec} = 4,5 \text{ м}^3/\text{год}$, що працює за рахунок подачі маточного розчину.

Розрахуємо фактичну порізність кристалічної суспензії, що відводиться з кристалізатора та об'ємну витрату маточного розчину, що відбирається з кристалічною суспензією

$$\varepsilon_{ec} = 1 - \frac{3500}{2660 \cdot 4,5} = 0,708, \quad V_{вмп} = V_{ec} \cdot \varepsilon_{ec} = 4,5 \cdot 0,708 = 3,19 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Об'ємну витрату маточного розчину, що повертається із кристалозгущувача в солезбірник, визначимо за рівнянням (50)

$$V_{вр} = \frac{3500}{2660} \cdot \frac{0,708 - 0,5}{(1 - 0,708) \cdot (1 - 0,5)} = 1,87 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Об'ємна та масова витрата маточного розчину, що відводиться на центрифугу разом з кристалами

$$V_{мрц} = V_{вмп} - V_{вр} = 3,19 - 1,87 = 1,32 \text{ м}^3/\text{год};$$

$$G_{мрц} = V_{мрц} \cdot \rho_{mp} = 1,32 \cdot 1104 = 1457 \text{ кг/год.}$$

Якщо в залежність (35) підставити значення масової витрати маточного розчину, що відводиться з ущільненою суспензією

$$G_{mp} = \frac{G_k \cdot \rho_p \cdot \varepsilon_{yc}}{\rho_k \cdot (1 - \varepsilon_{yc})},$$

то одержимо рівняння для визначення масової витрати початкового розчину

$$G_{np} = \frac{G_k}{x_{np}} \cdot \left[k_m + \frac{x_{mp} \cdot \rho_p \cdot \varepsilon_{yc}}{\rho_k \cdot (1 - \varepsilon_{yc})} \right]. \quad (112)$$

У зв'язку з тим, що для відведення суспензії потрібен маточний розчин, візьмемо коефіцієнт надлишку розчину 1,25 і тоді на установку потрібно подавати початкового розчину

$$G_{np} = \frac{1,25 \cdot 3500}{0,2} \cdot \left[1 + \frac{0,142 \cdot 1104 \cdot 0,5}{2660 \cdot (1 - 0,5)} \right] = 23164 \text{ кг/год.}$$

Тоді об'ємна витрата початкового розчину дорівнює

$$V_{np} = G_{np} / \rho_{np} = 23164 / 1135 = 20,4 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Визначимо масову витрату випарюваної води для забезпечення заданої продуктивності установки щодо кристалічного продукту, використовуючи рівняння (36):

$$W = \frac{G_{\kappa} \cdot (k_{\kappa} - x_{\kappa}) - G_{np} \cdot (x_{np} - x_{\kappa})}{x_{\kappa}} =$$

$$= \frac{3500 \cdot (1 - 0,142) - 23164 \cdot (0,2 - 0,142)}{0,142} = 11686 \text{ кг/год.}$$

Фактичну масову витрату маточного розчину, що відводиться, розрахуємо за допомогою рівняння (34)

$$G_{mp} = G_{np} - G_{\kappa} - W = 23164 - 3500 - 11686 = 7978 \text{ кг/год.}$$

Тоді об'ємна витрата маточного розчину дорівнює

$$V_{mp} = 7978 / 1104 = 7,2 \text{ м}^3/\text{год.}$$

У кристалізаторі буде підтримуватися постійний рівень розчину тому, що фактична витрата маточного розчину, яка відводиться, V_{mp} більша, ніж витрата маточного розчину, що відводиться разом з кристалами V_{mrc} . Разом з маточним розчином повинна відводитися не тільки кристалічна суспензія, але ж і домішки, що містяться в початковому розчині. Маточний розчин, що відводиться, повертається в ємкість початкового розчину.

Теплові розрахунки

Візьмемо тиск у вакуум-випарнику $0,12 \text{ кгс/см}^2$, якому відповідають такі параметри сокової пари: температура $t_{cn} = 49 \text{ }^\circ\text{C}$; густина $\rho_{cn} = 0,0794 \text{ кг/м}^3$; питома ентальпія $H_{cn} = 2588 \text{ кДж/кг}$.

Теплове навантаження трубчастого підігрівача розрахуємо за рівнянням (43), прийнявши теплові втрати у розмірі 5 %,

$$Q_n = 1,05 \cdot \left[G_{mp} \cdot c_{mp} \cdot t_{mp} + G_{\kappa} \cdot (c_{\kappa} \cdot t_{mp} - q) + W \cdot H_{cn} - G_{np} \cdot c_{np} \cdot t_{np} \right] =$$

$$= 1,05 \cdot [7978 \cdot 3,595 \cdot 50 + 3500 \cdot (0,784 \cdot 50 - 51,5) +$$

$$+ 11686 \cdot 2588 - 23164 \cdot 3,352 \cdot 90] / 3600 = 7188 \text{ кВт.}$$

Як гарячий теплоносії в підігрівачі використовуємо насичену водяну пару під тиском $1,033 \text{ кг/см}^2$, температуру конденсату, що відводиться, беремо $t_{\text{конд}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Тоді масову витрату гріючої пари знаходимо за допомогою рівняння (44)

$$G_{\text{zn}} = \frac{Q_n}{(H_{\text{zn}} - c_{\text{конд}} \cdot t_{\text{конд}})} = \frac{7188 \cdot 3600}{(2679 - 4,19 \cdot 100)} = 11450 \text{ кг/год.}$$

Співвідношення масових витрат гріючої та сокової пари

$$g_{\text{zn}} = G_{\text{zn}} / W = 11450 / 11686 = 0,98.$$

Різниця температур між теплоносіями в підігрівачі дорівнює

$$\Delta t_n = t_{\text{конд}} - t_{\text{мп}} = 100 - 50 = 50 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Взявши коефіцієнт теплопередачі $K_m = 700 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, необхідну площину поверхні трубчастого підігрівача розрахуємо за рівнянням (52)

$$F_n = 7188000 / (700 \cdot 50) = 205 \text{ м}^2.$$

Взявши швидкість руху розчину в трубках теплообмінника $u_p = 1,2 \text{ м/с}$, знайдемо площину перетину трубного простору

$$S_{\text{мп}} = V_{\text{ци}} / u_p = 0,278 / 1,2 = 0,232 \text{ м}^2.$$

Прийнявши трубки діаметром $\varnothing 38 \times 3 \text{ мм}$, знайдемо їх число

$$n_{\text{мп}} = S_{\text{мп}} / (0,785 \cdot d_{\text{вн}}^2) = 0,232 / (0,785 \cdot 0,032^2) = 288 \text{ труб.}$$

Для одноходових теплообмінників найближче стандартне число труб $n_{\text{мп}} = 361$ при розміщенні їх по вершинах правильних шестикутників у корпусі діаметром 1000 мм .

Довжина трубчатки теплообмінника дорівнює

$$L_{\text{мп}} = F_n / (\pi \cdot d_{\text{вн}} \cdot n_{\text{мп}}) = 205 / (3,14 \cdot 0,032 \cdot 361) = 5,6 \text{ м.}$$

Прийнявши довжину труб $L_{\text{мп}} = 6 \text{ м}$, розрахуємо фактичну поверхню теплопередачі підігрівача

$$F_n = \pi \cdot d_{\text{вн}} \cdot L_{\text{мп}} \cdot n_{\text{мп}} = 3,14 \cdot 0,032 \cdot 6 \cdot 361 = 218 \text{ м}^2.$$

Параметри продукційної монофракції кристалів та діаметр нижньої циліндричної секції кристаловирощувача

Число Архімеда для продукційних кристалів дорівнює

$$Ar_{\kappa} = (1,6 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 9,81 \cdot 1104 \cdot (2660 - 1104) / (0,68 \cdot 10^{-3})^2 = 147105.$$

Оптимальну порізність псевдозрідженого шару продукційної

монофракції кристалів розрахуємо за рівнянням (65)

$$\varepsilon_{omm} = 1 - 0,1923 \cdot 147105^{0,06} = 0,607.$$

Число Рейнольдса для продукційних кристалів визначаємо за допомогою рівняння (56), при цьому отримуємо

$$Re_k = 0,335 \cdot 147105^{0,63} \cdot 0,607^{5,2/147105^{0,06}} = 169,5.$$

Розрахункова швидкість розчину в нижньому циліндрі

$$u_k = \frac{Re_k \cdot \mu_p}{d_k \cdot \rho_p} = \frac{169,5 \cdot 0,685 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1104} = 0,066 \text{ м/с.}$$

Визначаємо діаметр центральної труби за рівнянням (98), взявши швидкість розчину в ній $u_p = 1 \text{ м/с}$,

$$d_{um} = \sqrt{0,278 / (0,785 \cdot 1)} = 0,59 \text{ м.}$$

Діаметр нижнього циліндра розрахуємо за формулою (85)

$$D_n = \sqrt{0,278 / (0,785 \cdot 0,066) + 0,59^2} = 2,39 \text{ м.}$$

Візьмемо $D_n = 2,4 \text{ м}$, тоді фактична швидкість розчину

$$u_n = \frac{V_{um}}{0,785 \cdot (D_n^2 - d_{um}^2)} = \frac{0,278}{0,785 \cdot (2,4^2 - 0,59^2)} = 0,065 \text{ м/с.}$$

Фактичне число Рейнольдса для продукційних кристалів

$$Re_1 = 0,065 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1104 / 0,685 \cdot 10^{-3} = 168,7.$$

Фактичну порізність псевдозрідженого шару продукційної монофракції кристалів розрахуємо за рівнянням (57)

$$\varepsilon_1 = (1,234 \cdot 168,7^{0,1923} / 147105^{0,12})^{147105^{0,06}} = 0,623.$$

Швидкість розчину та діаметр верхньої циліндричної секції

Число Архімеда для кристалів, що виносяться, дорівнює

$$Ar_6 = (0,3 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 9,81 \cdot 1104 \cdot (2660 - 1104) / (0,685 \cdot 10^{-3})^2 = 970.$$

Число Рейнольдса для кристалів, що виносяться, визначаємо за допомогою рівняння (56), при цьому отримуємо

$$Re_6 = 0,105 \cdot 970^{0,78} = 22,4.$$

Розрахункова швидкість розчину у верхньому циліндрі

$$u_6 = \frac{Re_6 \cdot \mu_p}{d_6 \cdot \rho_p} = \frac{22,4 \cdot 0,685 \cdot 10^{-3}}{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1104} = 0,046 \text{ м/с.}$$

Діаметр верхнього циліндра розрахуємо за формулою

$$D_e = \sqrt{0,278 / (0,785 \cdot 0,046) + 0,59^2} = 2,82 \text{ м.}$$

Візьмемо $D_e = 2,8$ м, тоді фактична швидкість розчину

$$u_e = \frac{V_{ум}}{0,785 \cdot (D_e^2 - d_{ум}^2)} = \frac{0,278}{0,785 \cdot (2,8^2 - 0,59^2)} = 0,047 \text{ м/с.}$$

Підставивши у формулу (56) значення критеріїв Ar і Re та розв'язавши отримане рівняння відносно d_e , одержимо

$$d_e = \left(\frac{u_e \cdot \rho_p^{0,22} \cdot \mu_p^{0,56}}{0,105 \cdot g^{0,78} \cdot (\rho_k - \rho_p)^{0,78}} \right)^{1/1,34} =$$

$$= \left(\frac{0,047 \cdot 1104^{0,22} \cdot (0,685 \cdot 10^{-3})^{0,56}}{0,105 \cdot 9,81^{0,78} \cdot (2660 - 1104)^{0,78}} \right)^{1/1,34} = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,3 \text{ мм.}$$

Масові частки приросту речовини в окремих монофракціях псевдозрідженого шару кристалів. Взявши модуль дисперсності $m_o = \sqrt[10]{10} = 1,259$, розіб'ємо діапазон діаметрів кристалів, що ви-тають у кристаловирощувачі, на окремі монофракції, при цьому середній діаметр i -ї монофракції d_i розрахуємо за формулою (3), а масову частку приросту речовини m_i визначимо за рівнянням (76). Результати цих розрахунків наведені в табл. 5.

Параметри псевдозрідженого шару окремих монофракцій

Середнє пересичення розчину розрахуємо за формулою (67)

$$\Delta x_{cp} = 0,317 \cdot 3,5 = 1,11 \text{ кг/м}^3 = 1,005 \text{ г/кг.}$$

Визначаємо комплекс постійних для даної системи параметрів фізико-хімічних властивостей (див. рівняння (73))

$$E = \left[(8,5 \cdot 10^{-10})^2 \cdot (2660 - 1104)^2 \cdot 1104 \right]^{0,33} / (0,685 \cdot 10^{-3}) = 1,944.$$

Параметри псевдозрідженого шару 1-ї монофракції:

– об'ємний коефіцієнт масовіддачі (формула (73)):

$$\beta_{v1} = \frac{12,73 \cdot 1,944 \cdot 0,623^{\frac{2,6}{147105^{0,06}}} \cdot (1 - 0,623)}{147105^{0,35}} = 7,93 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{о.р.с.}};$$

– об'єм псевдозрідженого шару (формула (82)):

$$V_1 = 3500 \cdot 0,286 / (3600 \cdot 7,93 \cdot 10^{-2} \cdot 1,005) = 3,49 \text{ м}^3;$$

– висота псевдозрідженого шару (формула (87)):

$$H_1 = 3,49 / \left[0,785 \cdot (2,4^2 - 0,59^2) \right] = 0,821 \text{ м};$$

– маса кристалів:

$$M_1 = V_1 \cdot (1 - \varepsilon_1) \cdot \rho_\kappa = 3,49 \cdot (1 - 0,623) \cdot 2660 = 3500 \text{ кг};$$

– порізність на верхній границі (формула (58)):

$$\varepsilon_{\theta 1} = \left[0,623 \cdot (1,6/1,43)^{0,171 \cdot 147105^{0,06}} \right]^{(1,43/1,6)^{0,18}} = 0,653.$$

Таблиця 5 – Середні діаметри та масові частки приросту речовини в окремих монофракціях псевдозрідженого шару кристалів

i	$d_{hi} - d_{ei}$, мм	d_i , мм	m_i
1*	1,60 – 1,43	$d_1 = \sqrt{1,60 \cdot 1,43} = 1,51$	$m_1 = \frac{1,60^3 - 1,43^3}{1,60^3} = 0,286$
2	1,43 – 1,13	$d_2 = \sqrt{1,43 \cdot 1,13} = 1,27$	$m_2 = \frac{1,43^3 - 1,13^3}{1,60^3} = 0,362$
3	1,13 – 0,90	$d_3 = \sqrt{1,13 \cdot 0,90} = 1,01$	$m_3 = \frac{1,13^3 - 0,90^3}{1,60^3} = 0,174$
4	0,90 – 0,71	$d_4 = \sqrt{0,90 \cdot 0,71} = 0,80$	$m_4 = \frac{0,90^3 - 0,71^3}{1,60^3} = 0,091$
5	0,71 – 0,57	$d_5 = \sqrt{0,71 \cdot 0,57} = 0,64$	$m_5 = \frac{0,71^3 - 0,57^3}{1,60^3} = 0,042$
6	0,57 – 0,45	$d_6 = \sqrt{0,57 \cdot 0,45} = 0,51$	$m_6 = \frac{0,57^3 - 0,45^3}{1,60^3} = 0,023$
7	0,45 – 0,36	$d_7 = \sqrt{0,45 \cdot 0,36} = 0,40$	$m_7 = \frac{0,45^3 - 0,36^3}{1,60^3} = 0,011$
8	0,36 – 0,30	$d_8 = \sqrt{0,36 \cdot 0,30} = 0,33$	$m_8 = \frac{0,36^3 - 0,30^3}{1,60^3} = 0,005$

Примітка. * – $d_{\epsilon_1} = 1,6/\sqrt[20]{10} = 1,43$ мм (половину продукційної монофракції кристалів розмістимо в нижньому циліндрі, а іншу половину – в конічній секції кристаловирощувача)

Взявши кут розкриття конуса $\alpha = 20^\circ$, параметри псевдозрідженого шару в конічній секції визначаємо методом послідовних наближень.

Параметри псевдозрідженого шару 2-ї монофракції:

– число Архімеда:

$$Ar_{n2} = (0,00143)^3 \cdot 9,81 \cdot 1104 \cdot (2660 - 1104) / (0,68 \cdot 10^{-3})^2 = 105021;$$

$$Ar_2 = (0,00127)^3 \cdot 9,81 \cdot 1104 \cdot (2660 - 1104) / (0,685 \cdot 10^{-3})^2 = 73566.$$

Перше наближення ($D_{n2} = D_n$, $\epsilon_2' = \epsilon_{n2} = \epsilon_{\epsilon_1}$):

– об'ємний коефіцієнт масовіддачі (формула (73))

$$\beta_{v2} = \frac{12,73 \cdot 1,944 \cdot 0,653^{\frac{2,6}{73566^{0,06}}} \cdot (1 - 0,653)}{73566^{0,35}} = 9,66 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{о.р.с.}};$$

– об'єм псевдозрідженого шару (формула (82))

$$V_2 = 3500 \cdot 0,362 / (3600 \cdot 9,66 \cdot 10^{-2} \cdot 1,005) = 3,63 \text{ м}^3;$$

– висота розміщення середнього перетину з урахуванням об'єму, що займає центральна труба, (формула (91))

$$h_2 = \frac{\sqrt{(D_{n2}^2 - d_{um}^2)^2 + 5,1 \cdot V_2 \cdot D_{n2} \cdot \text{tg}(\alpha/2) - (D_{n2}^2 - d_{um}^2)}}{4 \cdot D_{n2} \cdot \text{tg}(\alpha/2)} =$$

$$= \frac{\sqrt{(2,4^2 - 0,59^2)^2 + 5,1 \cdot 3,63 \cdot 2,4 \cdot \text{tg}10^\circ - (2,4^2 - 0,59^2)}}{4 \cdot 2,4 \cdot \text{tg}10^\circ} = 0,402 \text{ м};$$

– порізність псевдозрідженого шару (формула (92))

$$\epsilon_2'' = \left\{ 0,653 \cdot \left[\frac{(1,43/1,27)^{0,171}}{\left(1 + \frac{2 \cdot 0,402 \cdot \text{tg}10^\circ}{2,4}\right)^{0,3846}} \right]^{105021^{0,06}} \right\}^{(1,27/1,43)^{0,18}} = 0,656.$$

Перевіряємо виконання умови (93)

$$|\varepsilon'_2 - \varepsilon''_2| = |0,653 - 0,656| = 0,003 < 0,01.$$

Висота псевдозрідженого шару (формула (90))

$$H_2 = \frac{\sqrt{(2,4^2 - 0,59^2)^2 + 10,2 \cdot 3,6 \cdot 2,4 \cdot \text{tg}10^\circ} - (2,4^2 - 0,59^2)}{4 \cdot 2,4 \cdot \text{tg}10^\circ} = 0,76 \text{ м};$$

– маса кристалів

$$M_2 = 3,63 \cdot (1 - 0,656) \cdot 2660 = 3322 \text{ кг};$$

– порізність на верхній границі (формула (94))

$$\varepsilon_{\varepsilon_2} = \left\{ 0,653 \cdot \left[\frac{(1,43/1,13)^{0,171}}{\left(1 + \frac{2 \cdot 0,764 \cdot \text{tg}10^\circ}{2,4} \right)^{0,3846}} \right]^{105021^{0,06}} \right\}^{(1,13/1,43)^{0,18}} = 0,664;$$

– діаметр апарата на верхній границі (формула (89))

$$D_{\varepsilon_2} = 2,4 + 2 \cdot 0,764 \cdot \text{tg}10^\circ = 2,67 \text{ м}.$$

Аналогічно розраховуємо параметри псевдозрідженого шару інших монофракцій кристалів. Результати цих розрахунків зведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Параметри окремих монофракцій псевдозрідженого шару кристалів сульфату калію

Найменування параметра	Номер монофракції <i>i</i>						
	1	2	3	4	5	6	7
Середній діаметр кристалів d_i , мм	1,6	1,27	1,01	0,8	0,64	0,51	0,4
Масова частка приросту речовини m_i	0,286	0,362	0,174	0,091	0,042	0,023	0,011
Число Архімеда Ar_i	147105	73566	37002	18388	9415	4764	2298
Порізність шару ε_i	0,623	0,656	0,685	0,736	0,792	0,853	0,917
Коефіцієнт масовіддачі $\beta_{vi} \cdot 10^2$, кг/(м ³ ·с·о.р.с.)	7,93	9,66	11,64	13,51	14,74	14,63	11,88

Об'єм шару $V_i, \text{ м}^3$	3,49	3,63	1,44	0,65	0,27	0,15	0,09
Висота шару $H_i, \text{ м}$	0,821	0,764	0,259	0,112	0,047	0,026	0,015
Маса кристалів $M_i, \text{ кг}$	3500	3322	1207	456	149	59	20

Сумарні параметри псевдозрідженого шару кристалів і кристаловирощувача вакуум-випарного кристалізатора:

– висота конічної секції (формула (96))

$$H_{kc} = (2,8 - 2,4) / (2 \cdot \text{tg} 10^\circ) = 1,134 \text{ м};$$

– повний геометричний об'єм конічної секції (формула (97))

$$V_{kc} = 0,262 \cdot 1,134 \cdot (2,4^2 + 2,4 \cdot 2,8 + 2,8^2) - \\ - 0,785 \cdot 1,134 \cdot 0,59^2 = 5,73 \text{ м}^3;$$

– повний розрахунковий об'єм псевдозрідженого шару кристалів у кристаловирощувачі (формула (83))

$$V_{nu} = 3,49 + 3,63 + 1,44 + 0,65 + 0,27 + 0,15 + 0,09 = 9,72 \text{ м}^3;$$

– повна висота псевдозрідженого шару кристалів

$$H_{nu} = 0,821 + 0,764 + 0,259 + 0,112 + \\ + 0,047 + 0,026 + 0,015 = 2,044 \text{ м};$$

– маса кристалів у псевдозрідженому шарі (формула (80))

$$M_{nu} = 3500 + 3322 + 1207 + 456 + 149 + 59 + 20 = 8713 \text{ кг};$$

– середній час перебування кристалів у апараті (формула (81))

$$\tau = 8713 / 3500 = 2,5 \text{ год.}$$

Конструктивні розрахунки кристаловирощувача:

– діаметр нижньої частини конічного розтруба (формула (99))

$$d_{km} = \sqrt{2 \cdot 0,59^2} = 0,83 \text{ м};$$

– висота конічного розтруба (формула (100))

$$h_{km} = (0,83 - 0,59) / (2 \cdot \text{tg} 9^\circ) = 0,76 \text{ м};$$

– відстань між низом труби і дном апарата

$$h_c = 0,3 \cdot 0,83 = 0,25 \text{ м};$$

– висота зони розчину над псевдозрідженим шаром кристалів до патрубку відведення розчину на циркуляційний насос

$$h_p = 0,3 \cdot 2,8 = 0,84 \text{ м};$$

- висота верхньої циліндричної секції $H_g = 0,5 \cdot 2,8 = 1,4$ м;
- висота сферичного днища $h_d = 0,5 \cdot 2,4 + 0,05 = 1,25$ м;
- висота сферичної кришки $h_{кр} = 0,5 \cdot 2,8 + 0,05 = 1,45$ м;
- загальна висота кристаловирошувача (формула (102))

$$H_{an} = 2,04 + 0,84 + 1,25 + 1,45 = 5,58 \text{ м.}$$

Конструктивні розрахунки вакуум-випарника

Об'ємну витрату сокової пари визначаємо за рівнянням (106)

$$V_{cn} = 11686/0,0794 = 147179 \text{ м}^3/\text{год} = 40,88 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Робочу швидкість пари в поперечному перерізі вакуум-випарника беремо $u_{cn} = 7,7$ м/с. При цьому необхідно застосувати додатковий винесений краплеуловлювач для забезпечення необхідної чистоти вторинної пари.

Діаметр вакуум-випарника розраховуємо за рівнянням (108)

$$D_{вин} = \sqrt{40,88/(0,785 \cdot 7,7)} = 2,6 \text{ м.}$$

Допустиме напруження парового простору (формула (110))

$$A_m = 1000 \cdot 0,85 \cdot 0,4 = 340 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{год}).$$

Об'єм парового простору визначаємо за формулою (109)

$$V_{mn} = 11686/340 = 34,37 \text{ м}^3.$$

Висота парового простору за формулою (111) дорівнює

$$H_{mn} = 34,37 / (0,785 \cdot 2,6^2) = 6,5 \text{ м.}$$

Ескіз кристаловирошувача разом з вакуум-випарником поданий на рис. 22.

Вибір оптимальних розмірів кристаловирошувача

Задачею оптимізаційного проектування класифікуючого кристалізатора є вибір із безлічі альтернатив такої, що найкращим чином забезпечує отримання заданих значень окремих показників якості або узагальненого критерію якості. Наприклад, оцінка і вибір кращого технічного рішення при проектуванні апарата може здійснюватися за сукупністю таких показників якості: вартості виготовлення та експлуатації, надійності, ремонтпридатності, ефективності контактних пристроїв, металоємності, питомої витрати енергії, води, пари [2].

Вибір показників якості повинен проводитися з дотриманням умови узгодження вимог до апарата як з боку замовників, так і з боку виготовників.

Програмний пакет CRYSTALL дозволяє не тільки скоротити час на розрахунки, але і швидко оцінити декілька варіантів кристаловирощувачів, щоб вибрати з них оптимальний.

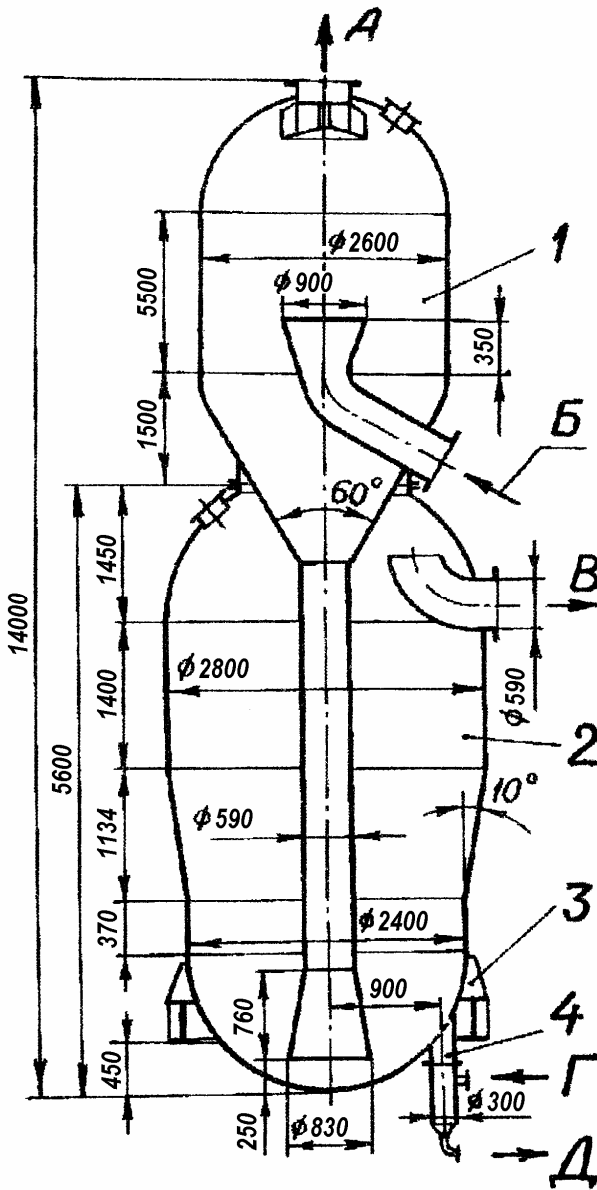


Рисунок 1 – Вакуум-випарний класифікуючий кристалізатор для отримання сульфату калію: А – відведення сокової пари; Б – введення пересиченого розчину; В – відведення розчину на циркуляцію; Г – повернення маточного розчину з кристалогущувача; Д – відведення кристалічної суспензії; 1 – випарник; 2 – кристаловирощувач; 3 – опора; 4 – солезбірник