

# Моделювання перехідних процесів на випарній установці з апаратами Роберта

**В.П. Петренко**, кандидат технічних наук, кафедра теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій.

*Надано результати моделювання проходження температурних та концентраційних хвиль по корпусах випарної установки, як відгук на ступеневу зміну парового навантаження на останній корпус ВУ. Отримано відповідні розрахункові залежності, надано графічну інтерпретацію результатів.*

*Ключові слова: випарна установка, перехідні процеси, концентрування, функції відгуку.*

*Представлены результаты моделирования прохождения температурных и концентрационных волн по корпусам выпарной установки, как отклик на внезапное изменение паровой нагрузки на последний корпус ВУ. Получены соответствующие расчетные соотношения, представлена графическая интерпретация результатов.*

*Ключевые слова: выпарная установка, переходные процессы, концентрирования, функции отклика.*

*The results of the temperature and concentration waves modeling of their passage along the stages of a multi effect evaporation station. This passage has been obtained as a result of an abrupt step vice change of steam load on the last stage of the evaporation station. The resultant calculation equations have been derived, graphical interpretation of the results is presented.*

*Keywords: evaporated setting, transients, concentrations, functions of review*

Нерівномірність споживання пари вакуум-апаратами та коливання витрати і концентрації соку на випарну установку (ВУ) спричиняють періодичні коливання концентрації сиропу, регулювання якої, а, відповідно, і продуктивності ВУ здійснюють виходом пари на конденсатор та зміною тиску пари на головний корпус. При цьому, з відкриттям парової засувки на конденсатор теплове навантаження, що отримав останній корпус, передається на всі попередні через механізм зміни температурного напору, розповсюдження якого від корпусу до корпусу відбувається з певною швидкістю. У свою чергу, в результаті отриманого навантаження, у зворотному напрямку рухається повільніша за температурну реакцію хвиля зміни концентрації.

Для оцінки швидкості протікання перехідних теплових процесів достатньо записати рівняння теплового балансу та теплопередачі для конкретного випарного апарата в диференціальній формі.

Відомо, що при ступеневому навантаженні температура кипіння розчину не змінюється миттєво, оскільки має місце теплова ємність, яка при нехтуванні маловпливовими факторами залежить лише від маси соку в апараті та його теплоємності.

Розглянемо температурну реакцію 5 корпусу ВУ на зміну навантаження, як результат відкриття засувки на конденсатор. Якщо прийняти, що в перехідний період коефіцієнт теплопередачі  $K$  змінюється мало, залежність температури вторинної пари від часу можна виразити балансовим рівнянням:

$$\Delta Q_5 d\tau = -(\Sigma M_5 C_5) t d + K_5 F_5 [t_{5o} - t_5(\tau)] d\tau, \quad (1)$$

де  $(\Sigma M_5 C_5) = M_{5c} C_{5c} + M_{5m} C_m$ ;  $M_{5c}$  – маса соку в випарному апараті;  $M_{5m}$  – маса металу апарата;  $C_{5c}$  – теплоємність соку в випарному апараті;  $C_m$  – середньозважена теплоємність металу труб та корпусу випарного апарата.  $t_{5o}$  – температура вторинної пари п'ятого корпусу до нанесення збурення;  $t_5(\tau)$  – поточна температура вторинної пари;  $t$  – час;  $\Delta Q_5$  – теплова потужність потоку пари з п'ятого корпусу на конденсатор в результаті відкриття засувки.

Знак  $(-)$  в першому члені правої частини рівняння означає падіння температури кипіння з часом. Розв'язком (1) за умови  $\tau = 0$ ;  $t_5 = t_{5o}$  буде:

$$t_5(\tau) = t_{5o} - \frac{\Delta Q_5}{K_5 F_5} [1 - \exp(-B_5 \tau)] = t_{5o} - \delta t_{5m} [1 - \exp(-B_5 \tau)], \quad (2)$$

де  $\delta t_{5m} = \frac{\Delta Q_5}{K_5 F_5}$  – максимальна зміна температурного напору п'ятого корпусу ВУ при  $\tau = \infty$ ,  $B_5 = \frac{K_5 F_5}{\Sigma M_5 C_5}$  – параметр теплової інерційності для п'ятого корпусу ВУ.

Рівняння (1) та його розв'язок (2) справедливі лише в разі незмінності температурного режиму на головних корпусах ВУ. Величина  $[t_{50} - t_5(\tau)]$  є частиною зміни температурного напору на п'ятому корпусі  $[t_4(\tau) - t_5(\tau)]$ , як реакція лише на додаткове навантаження  $\Delta Q_5$ . Але в результаті руху теплової хвилі температури пари головних корпусів ВУ, а саме  $t_4(\tau), t_3(\tau), t_2(\tau), t_1(\tau)$ , також змінюються. Тому більш коректним рівняння (1) слід записати у вигляді залежності зміни температурного напору в часі, тобто  $\delta t_5(\tau) = t_{50} - t_5(\tau)$ . В такій формі рівняння (1) запишеться як:

$$\Delta Q_5 d\tau = (\Sigma M_5 C_5) d(\delta t_5(\tau)) + K_5 F_5 \delta t_5(\tau) d\tau \quad (3)$$

Знак (+) в першому члені правої частини рівняння означає зростання зміни температурного напору з часом. Розв'язок (3) за умови  $\tau = 0; \delta t_5(\tau) = 0$ , має вигляд:

$$\delta t_5(\tau) = \frac{\Delta Q_5}{K_5 F_5} [1 - \exp(-B_5 \tau)] = \delta t_{5m} [1 - \exp(-B_5 \tau)] \quad (4)$$

Випарні апарати головної частини ВУ також отримують додаткове навантаження, але не миттєво, а поступово, пропорційно степеню зміни температурного напору на п'ятому корпусі ВУ. Тому четвертий корпус навантажений по закону:

$$\Delta Q_4(\tau) = \Delta Q_5 \frac{\delta t_5(\tau)}{\delta t_{5m}} = \Delta Q_5 [1 - \exp(-B_5 \tau)] \quad (5)$$

Підставивши (5) в (3), та змінивши індекси, отримаємо залежність зміни температурного напору для четвертого корпусу:

$$\Delta Q_5 (1 - e^{-B_5 \tau}) d\tau = (\Sigma M_4 C_4) d(\delta t_4(\tau)) + K_4 F_4 \delta t_4(\tau) d\tau \quad (6)$$

Розв'язком (6) за умови  $\tau = 0; \delta t_4(\tau) = 0$  буде:

$$\delta t_4(\tau) = \delta t_{4m} \left[ 1 + \left( \frac{B_4}{B_5 - B_4} \right) \exp(-B_5 \tau) - \left( \frac{B_4}{B_5 - B_4} \right) \exp(-B_4 \tau) \right] \quad (7)$$

де  $B_4 = \frac{K_4 F_4}{\Sigma M_4 C_4}$  - параметр теплової інерційності для четвертого корпусу;  $\delta t_{4m} = \frac{\Delta Q_5}{K_4 F_4}$  - максимальна зміна температурного напору четвертого корпусу ВУ при  $\tau = \infty$ .

Відповідно для третього корпусу:

$$\Delta Q_3(\tau) = \Delta Q_5 \frac{\delta t_4(\tau)}{\delta t_{4m}} = \Delta Q_5 \left[ 1 + \left( \frac{B_4}{B_5 - B_4} \right) \exp(-B_5 \tau) - \left( \frac{B_4}{B_5 - B_4} \right) \exp(-B_4 \tau) \right] \quad (8)$$

$$\Delta Q_3(\tau) d\tau = K_3 F_3 [\delta t_3(\tau)] d\tau + (\Sigma M_3 C_3) d(\delta t_3(\tau)) \quad (9)$$

Розв'язком (9) за умови  $\tau = 0; \delta t_3(\tau) = 0$  буде:

$$\delta t_3(\tau) = \delta t_{3m} [1 - A_5 \exp(-B_5 \tau) + A_4 \exp(-B_4 \tau) - (1 - A_5 + A_4) \exp(-B_3 \tau)] \quad (10)$$

де  $A_5 = \left( \frac{B_3}{B_5 - B_3} \right) \left( \frac{B_4}{B_5 - B_4} \right)$ ;  $A_4 = \left( \frac{B_3}{B_4 - B_3} \right) \left( \frac{B_5}{B_5 - B_4} \right)$ ;  $B_3 = \frac{K_3 F_3}{\Sigma M_3 C_3}$  - параметр теплової інерційності для третього корпусу;  $\delta t_{3m} = \frac{\Delta Q_5}{K_3 F_3}$  - максимальна зміна температурного напору третього корпусу ВУ при  $\tau = \infty$ .

Відповідно для другого корпусу ВУ:

$$\Delta Q_2(\tau) = \Delta Q_5 \frac{\delta t_3(\tau)}{\delta t_{3m}} = \Delta Q_5 [1 - A_5 \exp(-B_5 \tau) + A_4 \exp(-B_4 \tau) - (1 - A_5 + A_4) \exp(-B_3 \tau)] \quad (11)$$

$$\Delta Q_2(\tau) d\tau = K_2 F_2 (\delta t_2(\tau)) d\tau + \Sigma M_2 C_2 d(\delta t_2(\tau)) \quad (12)$$

Розв'язком (12) за умови  $\tau = 0; \delta t_2(\tau) = 0$  буде:

$$\delta t_2(\tau) = \delta t_{2m} \left[ 1 + \left( \frac{B_2 A_5}{B_5 - B_2} \right) \exp(-B_5 \tau) - \left( \frac{B_2 A_4}{B_4 - B_2} \right) \exp(-B_4 \tau) + \left( \frac{B_2}{B_3 - B_2} \right) (1 - A_5 + A_4) \exp(-B_3 \tau) - A_5 \exp(-B_2 \tau) \right] \quad (13)$$

де  $A_3 = \left[ 1 + \left( \frac{B_2 A_3}{B_3 - B_2} \right) - \left( \frac{B_2 A_4}{B_4 - B_2} \right) + \left( \frac{B_2}{B_3 - B_2} \right) (1 - A_3 + A_4) \right]$ ;  $B_2 = \frac{K_2 F_2}{\Sigma M_2 C_2}$  - параметр теплової інерційності для другого корпусу;  $\delta t_{2m} = \frac{\Delta Q_5}{K_2 F_2}$  - максимальна зміна температурного напору другого корпусу ВУ при  $\tau = \infty$ .

Відповідно для першого корпусу ВУ:

$$\Delta Q_1(\tau) = \Delta Q_5 \frac{\delta t_1(\tau)}{\delta t_{1m}} = \Delta Q_5 \left[ 1 + \left( \frac{B_2 A_3}{B_3 - B_2} \right) e^{-B_2 \tau} - \left( \frac{B_2 A_4}{B_4 - B_2} \right) e^{-B_2 \tau} + \left( \frac{B_2}{B_3 - B_2} \right) (1 - A_3 + A_4) e^{-B_2 \tau} - A_3 e^{-B_2 \tau} \right] \quad (14)$$

$$\Delta Q_1(\tau) d\tau = K_1 F_1 (\delta t_1(\tau)) d\tau + \Sigma M_1 C_1 d(\delta t_1(\tau)) \quad (15)$$

Розв'язком (15) за умови  $\tau = 0$ ;  $\delta t_1(\tau) = 0$  буде:

$$\delta t_1(\tau) = \delta t_{1m} \left[ \frac{1 - A_2 A_3 e^{-B_2 \tau} + A_1 A_4 e^{-B_2 \tau} - A_0 (1 - A_3 + A_4) e^{-B_2 \tau} + \frac{B_1 A_3}{B_2 - B_1} e^{-B_2 \tau}}{- \left( 1 - A_2 A_3 + A_1 A_4 - A_0 + A_0 A_3 - A_0 A_4 + \frac{B_1 A_3}{B_2 - B_1} \right) e^{-B_2 \tau}} \right] \quad (16)$$

де  $A_0 = \frac{B_1 B_2}{(B_3 - B_2)(B_3 - B_1)}$ ;  $A_1 = \frac{B_1 B_2}{(B_4 - B_2)(B_4 - B_1)}$ ;  $A_2 = \frac{B_1 B_2}{(B_5 - B_2)(B_5 - B_1)}$ ;  $B_1 = \frac{K_1 F_1}{\Sigma M_1 C_1}$  - параметр теплової інерційності для першого корпусу;  $\delta t_{1m} = \frac{\Delta Q_5}{K_1 F_1}$  - максимальна зміна температурного напору першого корпусу ВУ при  $\tau = \infty$ .

Поточні температури вторинної пари для корпусів ВУ при відкриванні засувки на конденсатор виражаються співвідношеннями:

$$t_c(\tau) = t_{c_0} - \delta t_c(\tau) - \delta t_1(\tau) - \delta t_2(\tau) - \delta t_3(\tau) - \delta t_4(\tau) - \delta t_5(\tau) \quad (17)$$

$$t_4(\tau) = t_{4_0} - \delta t_4(\tau) - \delta t_3(\tau) - \delta t_2(\tau) - \delta t_1(\tau) \quad (18)$$

$$t_3(\tau) = t_{3_0} - \delta t_3(\tau) - \delta t_2(\tau) - \delta t_1(\tau) \quad (19)$$

$$t_2(\tau) = t_{2_0} - \delta t_2(\tau) - \delta t_1(\tau) \quad (20)$$

$$t_1(\tau) = t_{1_0} - \delta t_1(\tau) \quad (21)$$

де  $t_{1_0}, t_{2_0}, t_{3_0}, t_{4_0}, t_{5_0}$  - температури вторинної пари з відповідних корпусів ВУ до початку нанесення збурення.

В разі закривання засувки на конденсатор температури вторинної пари корпусів ВУ підвищуються, а їх розрахунок здійснюється за співвідношеннями (17–21), в яких величини  $\delta t_i(\tau)$  необхідно підставляти зі знаком (+).

Графіки зміни температурного режиму п'ятикорпусної випарної установки, навантаженої виходом пари на конденсатор, розрахованого за співвідношеннями (17–21) для заводу потужністю 3000 тонн з випарними апаратами системи Роберта, поверхнею теплообміну відповідно 2360, 3000, 2120, 1500, 1000 м<sup>2</sup> і масою рідини в апаратах відповідно 13, 15, 13, 11, 9 тонн наведені на рис. 1, 2. Графіки відповідають ступеневій зміні витрати пари з п'ятого корпусу на конденсатор у кількості 0,63% до маси буряків, що еквівалентно тепловій потужності в 500 кВт.

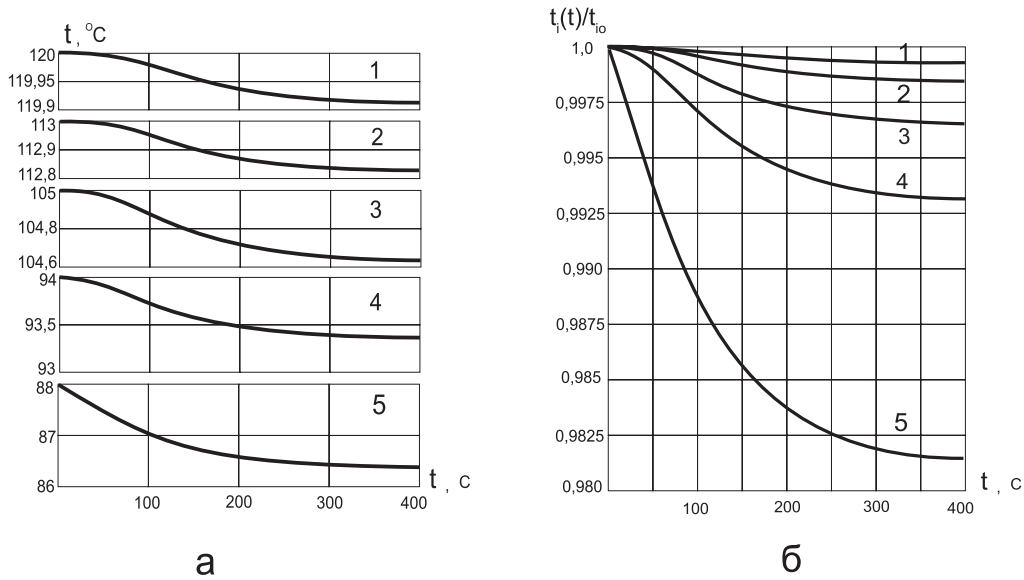
Зі зростанням теплового навантаження відбувається і наростання концентрації розчину по корпусам ВУ. Усталений, за час перехідного періоду, температурний режим через деякий час почне знову повільно змінюватись з причини залежності інтенсивності тепловіддачі при кипінні від концентрації розчину.

В апараті з інтенсивною циркуляцією концентрація розчину вирівнюється по всьому об'єму, тому закономірності зміни вихідної концентрації наближені до моделі ідеального змішування. Як видно з рис. 1 час релаксації температурного напору  $t_m$  складає 5–7 хвилин, і за цей час швидкість наростання парового навантаження по корпусам ВУ буде пропорційною темпу наростання температурного напору відповідно до співвідношень (5, 8, 11, 14).

Залежність вихідної концентрації розчину з випарного апарата циркуляційного типу при зміні навантаження в загальному випадку можна виразити рівнянням:

$$M_i \frac{dC_i(\tau)}{d\tau} = G_{(i-1)}(\tau) C_{(i-1)}(\tau) - (G_{(i-1)}(\tau) - W_i - \Delta E_i(\tau)) C_i(\tau) \quad (22)$$

де  $M_i$  - маса розчину в апараті;  $G_{i-1}(\tau)$  - витрата розчину з попереднього на поточний випарний апарат;  $C_i(\tau)$  - поточна вихідна концентрація розчину з апарата;  $C_{i-1}(\tau)$  - поточна концентрація розчи-



**Рис. 1.** Графіки зміни температур вторинної пари корпусів ВУ при ступеневій зміні витрати пари на конденсатор. а – залежність  $t_i(\tau)$ , б – залежність  $t_i(\tau)/t_{i0}$ . Криві 1, 2, 3, 4, 5 – відповідають номеру корпусу випарної установки.

ну на вході у випарний апарат;  $W_i$  – стаціонарне парове навантаження до нанесення збурення;  $\Delta E_i(\tau)$  – змінне додаткове парове навантаження.

В результаті відкриття парової засувки на конденсатор навантаження з певною затримкою отримують всі корпуси ВУ, тому наростання концентрації відбувається як рахунок власне паровідбору з конкретного корпусу, так і в результаті надходження зміненої витрати та концентрації розчину з головних корпусів ВУ.

Враховуючи складність перехідних функцій (5, 8, 11, 14), та той факт, що вирівнювання температурного напору відбувається значно швидше ніж концентрації, в період  $t < t_m$  можна скористатися спрощеними апроксимаціями. В конкретному випадку величина  $\Delta E_i(\tau)$  в діапазоні усталеного режиму ( $\tau \geq \tau_m$ ) має постійне значення,  $\Delta E$ , а в області розвитку температурного режиму ( $\tau \leq \tau_m$ ) – задається апроксимацією виду  $\Delta E\left(\frac{\tau}{\tau_m}\right)$ .

Відповідно до прийнятих апроксимацій рівняння (22) для першого корпусу ВУ набуває вигляду:

$$M_1 \frac{dC_1(\tau)}{d\tau} = G_{01}C_{01} - \left( G_{01} - W_1 - \Delta E_5 \left( \frac{\tau}{\tau_{m1}} \right)^3 \right) C_1(\tau), \text{ при } \tau \leq \tau_m, \quad (23)$$

$$M_1 \frac{dC_1(\tau)}{d\tau} = G_{01}C_{01} - (G_{01} - W_1 - \Delta E_5) C_1(\tau), \text{ для } \tau \geq \tau_m, \quad (24)$$

де  $G_{01}, C_{01}$  – витрата та концентрація соку, що поступає на головний корпус ВУ, відповідно.

Розв’язок (23) за умови  $\tau = 0, C_1(0) = \frac{C_{01}G_{01}}{G_{01} - W_1}$ , для періоду  $\tau \leq \tau_m$  надаємо степеневим рядом:

$$C_1(\tau) = a_0 + \sum_1^n a_i \tau^i. \quad (25)$$

Коефіцієнти ряду (25):  $a_0 = \frac{C_{01}G_{01}}{G_{01} - W_1}, a_1 = b_1 C_{01} - m_1 a_1, a_2 = -\frac{m_1 a_1}{2}, a_3 = -\frac{m_1 a_2}{3};$   
 $a_4 = -\frac{m_1 a_3}{4} + \frac{a_0 n_1}{4\tau_m^3}; a_i = -\frac{m_1 a_{i-1}}{i} + \frac{a_{i-2} n_1}{i\tau_m^3}.$

де  $b_1 = \frac{G_{01}}{M_1}, m_1 = \frac{G_{01} - W_1}{M_1}, n_1 = \frac{\Delta E_5}{M_5}, \tau_m$  – період релаксації температурного напору.

Розв’язок (24) для періоду  $\tau \geq \tau_m$  за умови  $\tau = \tau_m, C_1(\tau_m) = a_0 + \sum_1^n a_i \tau_m^i$  має вигляд:

$$C_1(\tau) = \frac{C_{01}b_1}{m_1 - n_1} + \left( C_1(\tau_m) - \frac{C_{01}b_1}{m_1 - n_1} \right) \exp((m_1 - n_1)(\tau_m - \tau)). \quad (26)$$

Для другого корпусу рівняння (22) запишеться як:

$$M_2 \frac{dC_2(\tau)}{d\tau} = G_1 C_1(\tau) - \left( G_1 - W_2 - \Delta E_5 \left( \frac{\tau}{\tau_{m1}} \right)^3 \right) C_2(\tau), \text{ при } \tau \leq \tau_m, \quad (27)$$

$$M_2 \frac{dC_2(\tau)}{d\tau} = G_1 C_1(\tau) - (G_1 - W_2 - \Delta E_5) C_2(\tau), \text{ для } \tau \geq \tau_m, \quad (28)$$

де  $G_1 = G_{01} - W_1 - \Delta E_5$ .

Аналогічно розв'язки рівнянь (27) та (28):

$$C_2(\tau) = s_0 + \sum_1^n s_i \tau^i, \text{ для } \tau \leq \tau_m. \quad (29)$$

Коефіцієнти ряду (27):  $s_0 = \frac{G_{01} C_{01}}{G_{01} - W_1 - W_2}$ ;  $s_1 = b_2 a_0 - m_1 s_0$ ;  $s_2 = \frac{b_2 a_1}{2} - \frac{m_2 s_1}{2}$ ;  $s_3 = \frac{b_2 a_2}{3} - \frac{m_2 s_2}{3}$ ;

14

$$s_4 = \frac{b_2 a_3}{4} - \frac{m_2 s_3}{4} + \frac{n_2 s_0}{4\tau_m^3}, s_i = -\frac{b_2 a_{i-1}}{i} - \frac{m_2 s_{i-1}}{i} + \frac{n_2 s_{i-4}}{i\tau_m^3},$$

де  $b_2 = \frac{G_2}{M_2} m_2 = \frac{G_1 - W_2}{M_2} n_2 = \frac{\Delta E_5}{M_2}$ .

Для періоду  $\tau \geq \tau_m$  при умові  $\tau = \tau_m$ ,  $C_2(\tau_m) = s_0 + \sum_1^n s_i \tau_m^i$ :

$$C_2(\tau) = N_0 + N_1 \exp[(m_1 - n_1)(\tau_m - \tau)] + N_2 \exp[(m_2 - n_2)(\tau_m - \tau)], \quad (30)$$

де  $N_0 = \frac{C_{01} b_1 b_2}{(m_2 - n_2)(m_1 - n_1)}$ ;  $N_1 = \frac{1}{(m_2 - n_2) - (m_1 - n_1)} \left( C_1(\tau_m) b_2 - \frac{C_{01} b_1 b_2}{m_1 - n_1} \right)$ ;  $N_2 = C_2(\tau_m) - N_1 - N_2$ .

Аналогічно формується та розв'язується задача зміни в часі концентрації розчину для третього, четвертого та п'ятого корпусів ВУ.

Для третього корпусу для періоду  $\tau \leq \tau_m$ :

$$C_3(\tau) = \omega_0 + \sum_1^n \omega_i \tau^i. \quad (31)$$

Коефіцієнти ряду (31):  $\omega_0 = \frac{G_{01} C_{01}}{G_{01} - W_1 - W_2 - W_3}$ ;  $\omega_1 = b_3 s_0 - m_3 \omega_0$ ;  $\omega_2 = \frac{b_3 s_1}{2} - \frac{m_3 \omega_1}{2}$ ;

$$\omega_3 = \frac{b_3 s_2}{3} - \frac{m_3 \omega_2}{3}, \omega_4 = \frac{b_3 s_3}{4} - \frac{m_3 \omega_3}{4} + \frac{n_3 \omega_0}{4\tau_m^3}, \omega_i = -\frac{b_3 s_{i-1}}{i} - \frac{m_3 \omega_{i-1}}{i} + \frac{n_3 \omega_{i-4}}{i\tau_m^3},$$

де  $b_3 = \frac{G_2}{M_3}$ ;  $m_3 = \frac{G_2 - W_3}{M_3}$ ;  $n_3 = \frac{\Delta E_5}{M_3}$ ;  $G_2 = G_{01} - W_1 - W_2 - 2\Delta E_5$ .

Для третього корпусу для періоду  $\tau \geq \tau_m$ :

$$C_3(\tau) = \frac{b_3 N_0}{(m_3 - n_3)} + \frac{b_3 N_1}{((m_3 - n_3)(m_1 - n_1))} \exp[(m_1 - n_1)(\tau_m - \tau)] + \frac{b_3 N_2}{(m_3 - n_3) - (m_1 - n_1)} \exp[(m_2 - n_2)(\tau_m - \tau)] + N_3 \exp[(m_3 - n_3)(\tau_m - \tau)] \quad (32)$$

де  $C_3(\tau_m) = \omega_0 + \sum_1^n \omega_i \tau_m^i$ ;  $N_3 = C_3(\tau_m) - \frac{b_3 N_0}{(m_3 - n_3)} + \frac{b_3 N_1}{((m_3 - n_3)(m_1 - n_1))} + \frac{b_3 N_2}{(m_3 - n_3) - (m_1 - n_1)}$ .

Для четвертого корпусу для періоду  $\tau \leq \tau_m$ :

$$C_4(\tau) = p_0 + \sum_1^n p_i \tau^i. \quad (33)$$

Коефіцієнти ряду (33):  $p_0 = \frac{G_{01} C_{01}}{G_{01} - W_1 - W_2 - W_3 - W_4}$ ;  $p_1 = b_4 \omega_0 - m_4 p_0$ ;  $p_2 = \frac{b_4 \omega_1}{2} - \frac{m_4 p_1}{2}$ ;

$$p_3 = \frac{b_4 \omega_2}{3} - \frac{m_4 p_2}{3}, p_4 = \frac{b_4 \omega_3}{4} - \frac{m_4 p_3}{4} + \frac{n_4 p_0}{4\tau_m^3}, p_i = -\frac{b_4 \omega_{i-1}}{i} - \frac{m_4 p_{i-1}}{i} + \frac{n_4 p_{i-4}}{i\tau_m^3},$$

де  $b_4 = \frac{G_3}{M_4}$ ;  $m_4 = \frac{G_3 - W_4}{M_4}$ ;  $n_4 = \frac{\Delta E_5}{M_4}$ ;  $G_3 = G_{01} - W_1 - W_2 - W_3 - 3\Delta E_5$ .

Для четвертого корпусу для періоду  $\tau \geq \tau_m$ :

$$C_4(\tau) = H_0 + H_1 \exp[(m_1 - n_1)(\tau_m - \tau)] + H_2 \exp[(m_2 - n_2)(\tau_m - \tau)] + H_3 \exp[(m_3 - n_3)(\tau_m - \tau)] + [C_4(\tau_m) - N_4] \exp[(m_4 - n_4)(\tau_m - \tau)] \quad (34)$$

де  $H_0 = \frac{b_3 b_4 N_0}{(m_3 - n_3)(m_4 - n_4)}$ ;  $H_1 = \frac{b_3 b_4 N_1}{((m_4 - n_4) - (m_1 - n_1))(m_3 - n_3) - (m_1 - n_1)}$ ;

$H_2 = \frac{b_3 b_4 N_2}{[(m_4 - n_4) - (m_2 - n_2)](m_3 - n_3) - (m_2 - n_2)}$ ;  $H_3 = \frac{b_4 N_3}{(m_4 - n_4) - (m_3 - n_3)}$ ;

$H_4 = \frac{b_3 b_4 N_3}{(m_1 - n_1)(m_4 - n_4)} + \frac{b_3 b_4 N_1}{[(m_4 - n_4) - (m_1 - n_1)](m_3 - n_3) - (m_1 - n_1)} + \frac{b_3 b_4 N_2}{[(m_4 - n_4) - (m_2 - n_2)](m_3 - n_3) - (m_2 - n_2)} + \frac{b_4 N_3}{(m_4 - n_4) - (m_3 - n_3)}$

Для п'ятого корпусу для періоду  $\tau \leq \tau_m$ :

$$C_5(\tau) = h_0 + \sum_{i=1}^n h_i \tau^i \quad (35)$$

Коефіцієнти ряду (35):  $h_0 = \frac{G_{01} C_{01}}{G_{01} - W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - W_5}$ ;  $h_1 = b_5 p_0 - (m_5 - n_5) h_0$ ;

$h_2 = \frac{b_5 p_1}{2} - \frac{(m_5 - n_5) h_1}{2}$ ;  $h_i = -\frac{b_5 p_{i-1}}{i} - \frac{(m_5 - n_5) h_{i-1}}{i}$ ;

де  $b_5 = \frac{G_4}{M_5}$ ;  $m_5 = \frac{G_4 - W_5}{M_5}$ ;  $n_5 = \frac{\Delta E_5}{M_5}$ ;  $G_4 = G_0 - W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - 4\Delta E_5$ .

Для п'ятого корпусу для періоду  $\tau \geq \tau_m$ :

$$C_5(\tau) = \frac{b_5 H_0}{(m_5 - n_5)} + \frac{b_5 H_1}{[(m_5 - n_5) - (m_1 - n_1)]} \exp[(m_1 - n_1)(\tau_m - \tau)] + \frac{b_5 H_2}{[(m_5 - n_5) - (m_2 - n_2)]} \exp[(m_2 - n_2)(\tau_m - \tau)] + \frac{b_5 H_3}{[(m_5 - n_5) - (m_3 - n_3)]} \exp[(m_3 - n_3)(\tau_m - \tau)] + \frac{b_5 H_4}{[(m_5 - n_5) - (m_4 - n_4)]} \exp[(m_4 - n_4)(\tau_m - \tau)] + [C_5(\tau_m) - N_5] \exp[(m_5 - n_5)(\tau_m - \tau)] \quad (36)$$

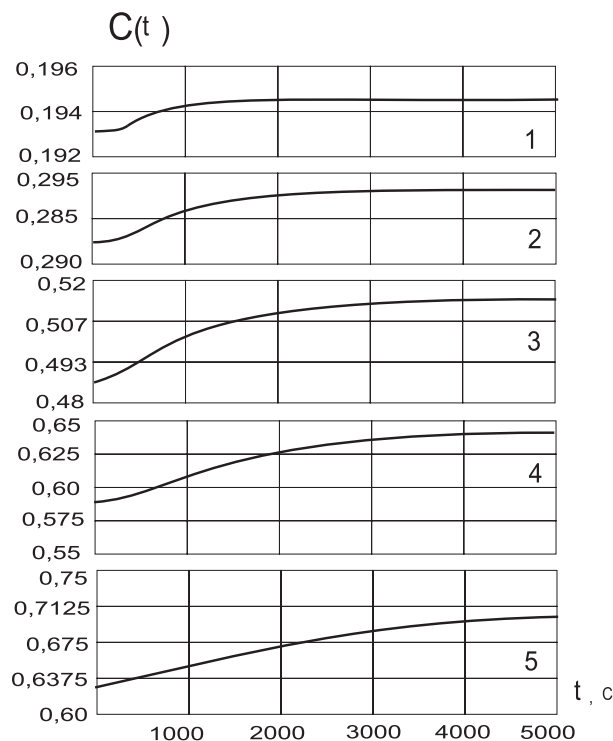


Рис. 2. Графіки зміни концентрації розчину по корпусам ВУ при ступеневій зміні витрати пари на конденсатор. Криві 1, 2, 3, 4, 5 відповідають номеру корпусу випарної установки.

$$\text{де } H_4 = C_4(\tau_m) - N_4; C_5(\tau_m) = h_0 + \sum_1^n h_i \tau_m^i$$

$$N_4 = \frac{b_2 H_0}{(m_2 - a_2)} + \frac{b_2 H_1}{((m_2 - a_2) - (m_1 - a_1))} + \frac{b_2 H_2}{(m_2 - a_2) - (m_1 - a_1)} + \frac{b_2 H_3}{(m_2 - a_2) - (m_1 - a_1)} + \frac{b_2 H_4}{(m_2 - a_2) - (m_1 - a_1)}$$

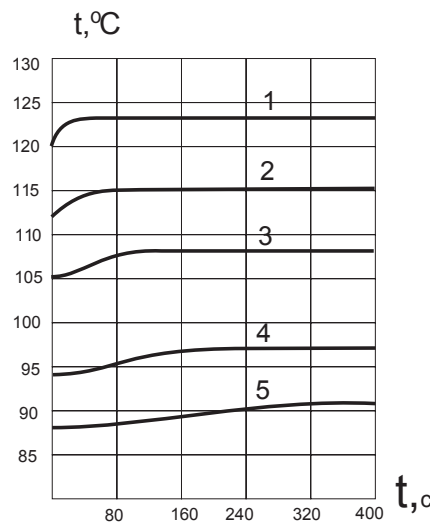
Графіки зміни концентрації розчину по корпусам п'ятикорпусної випарної установки, навантаженої виходом пари на конденсатор, розрахованих за співвідношеннями (25–36) наведені на **рис. 2**. Як і в прикладі з температурним режимом, розрахунки концентрацій виконані для заводу потужністю 3000 тонн з випарними апаратами системи Роберта, поверхнею відповідно 2360, 3000, 2120, 1500, 1000 м<sup>2</sup> і масою рідини в апаратах відповідно 13, 15, 13, 11, 9 тонн. Ступенева зміна витрати пари на конденсатор відповідає тепловій потужності в 500 кВт.

Відповідним способом можуть бути отримані функції відгуку на зміну витрати та концентрацію соку на вході у випарну установку, та температуру нагрівної пари на перший корпус ВУ, а також зміну парового навантаження на довільний корпус ВУ.

Приклад вирівнювання температурного режиму при збільшенні температури нагрівної пари на 1 корпус ВУ на 3 °С наведено на **рис. 3**. (розрахункові формули не наводяться).

В [1] були наведені результати моделювання концентраційного поля по корпусам ВУ, як відгук на характерну криву пароспоживання вакуум-апаратами першої кристалізації при споживанні пари з 3 корпусу ВУ. Разом з функціями відгуку, що отримані в даній роботі, маємо базу для аналізу роботи випарної установки в перехідних режимах.

Реальні криві дещо відрізняються від наведених, оскільки, по-перше, коефіцієнт теплопередачі при зміні концентрації розчину по корпусам ВУ не залишається постійним, а, по-друге, в результаті зміни температурного режиму відбувається незначний перерозподіл паровідборів по корпусам ВУ, що не вра-



**Рис. 3.** Графіки зміни температур вторинної пари корпусів ВУ при ступеневій зміні температури нагрівної пари на 1 корпус ВУ на 3 °С. Криві 1, 2, 3, 4, 5 – відповідають номеру корпусу випарної установки. (Маси соку в апаратах та поверхні теплообміну випарних апаратів аналогічні попереднім прикладам).

ховано при моделюванні. Але в цілому отримані співвідношення дають якісну і кількісну оцінку перехідним процесам, що протікають на випарних установках при ступеневих збуреннях.

**Висновки:**

1. Час релаксації температурного напору при нанесенні миттєвого збурення по паровому навантаженню для апаратів Роберта складає 50–100 с. і визначається параметром теплової інерційності випарного апарата  $\nu = \frac{KF}{\Sigma MC}$ . Результуючий час зміни температурного режиму всієї випарної установки з апаратами Роберта, як результат розповсюдження теплової хвилі, не перевищує 400 с для п'ятикорпусної корпусної ВУ.

2. Час релаксації концентрації при нанесенні миттєвого збурення по паровому навантаженню для апаратів Роберта складає 10 – 40 хв. і обернено пропорційний відношенню витрати соку на апарат до маси соку в апараті  $\frac{G}{M}$ . Результуючий час зміни концентраційного поля для всієї випарної установки з апаратами Роберта, як результат розповсюдження концентраційної хвилі, не перевищує 1,5 год. для п'ятикорпусної корпусної ВУ.

**Список використаних джерел:**

1. В.П. Петренко, М.О. Прядко, В.О. Бойко. Моделювання впливу нерівномірності споживання пари вакуум-апаратами на роботу випарної установки. Цукор України, 2011, №12, С. 24 – 30.