

ДИНАМІКА ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ СУБСТРАТУ ТА ПОВІТРЯ В ЗАМКНУТІЙ СИСТЕМІ ВЕНТИЛЯЦІЇ СПОРУД ЗАКРИТОГО ҐРУНТУ

Кепко О.І. Уманський державний аграрний університет.

Після 1991 року, при припиненні державного регулювання цін на сільськогосподарську і промислову продукцію та енергоносії, галузь овочівництва закритого ґрунту опинилась в скрутному становищі. Технології, які були розроблені ще за радянських часів виявились нерентабельними. Нові технології, а відповідно і нові типові проекти споруд закритого ґрунту вітчизняних розробок широкого поширення не здобули. На Українському ринку техніки та технологій закритого ґрунту з'явилися західні компанії, зокрема – голландські.

Аналіз низької рентабельності в галузі показав, що велику частку в собівартості продукції займають витрати на придбання енергоносіїв (50–70%), причому більша частина енергії витрачається на теплові процеси (85–95%) [1]. Зв'язку з інтенсивним вентиляванням теплиць, особливо грибних, і відповідно втрат теплоти з вентиляційним повітрям, постає питання утилізації цієї теплоти.

Поставлене питання може бути вирішено завдяки використанню замкнутої системи вентиляції [3, 5] в основі принципу функціонування якої лежить протилежний спосіб дихання рослин та грибів [2, 6].

Для встановлення взаємозв'язків між температурами субстрату і повітря в грибниці та теплиці і основними параметрами мікроклімату та технічними характеристиками системи споруд „рослинна теплиця – грибниця” при перехідних процесах скористаємося методом математичного моделювання.

Цільова функція та граничні умови викладені в [4].

Для визначення функціональної залежності між температурою повітря в культивацийному приміщенні і теплиці та температурою субстрату у часі складемо систему диференційних рівнянь –

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\Pi}^m C_p \frac{dt_6^m}{d\tau} = -k_{OG}^m S_{OG}^m (t_6^m - t_{36}) + k_{OII}^m S_{OII}^m (t_{OII}^m - t_6^m) + V_{B1.1} \rho_{\Pi} C_p (t_6^{zp} - t_6^m) + \\ \quad + V_{inf} \rho_{\Pi} C_p (t_{36} - t_6^m) \\ m_{\Pi}^{zp} C_p \frac{dt_6^{zp}}{d\tau} = -k_{OG}^{zp} S_{OG}^{zp} (t_6^{zp} - t_{36}) + \alpha_C S_C (t_C - t_6^{zp}) + k_{OII}^{zp} S_{OII}^{zp} (t_{OII}^{zp} - t_6^{zp}) + \\ \quad + V_{B1.1} \rho_{\Pi} C_p (t_6^m - t_6^{zp}) + V_{B1.2} \rho_{\Pi} C_p (t_{36} - t_6^{zp}) + V_{inf} \rho_{\Pi} C_p (t_{36} - t_6^{zp}) \\ m_C C_C \frac{dt_C}{d\tau} = m_C q - \alpha_C S_C (t_C - t_6^{zp}) - r m_{BII}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де t_C – температура субстрату, $^{\circ}\text{C}$; m_C – маса субстрату в грибниці, кг; C_C – питома теплоємність субстрату, Дж/кг $^{\circ}\text{C}$; q – тепловиділення субстрату, Вт/кг; α_C – коефіцієнт тепловіддачі від субстрату до повітря, Вт/м 2 $^{\circ}\text{C}$; S_C – площа поверхні субстрату, яка обдувається повітрям, м 2 ; t_6^m, t_6^{zp} – температура внутрішнього повітря відповідно в теплиці та грибниці, $^{\circ}\text{C}$; t_{36} – температура зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$; r – питома теплота випаровування води, Дж/кг; m_{BII} – інтенсивність випаровування води, кг/с; τ – час, с; m_{Π}^m, m_{Π}^{zp} – маса повітря відповідно в теплиці та грибниці, кг; C_p – питома теплоємність повітря, Дж/кг $^{\circ}\text{C}$; $V_{B1.1}$ – повітрообмін між приміщеннями, м 3 /с; $V_{B1.2}$ – повітрообмін між грибницею і зовнішнім середовищем, м 3 /с; V_{inf} – повітрообмін інфільтрації, м 3 /с; ρ_f – густина повітря, кг/м 3 ; S_{OG}^m, S_{OG}^{zp} – площа поверхні огорожень відповідно теплиці та грибниці, м 2 ; k_{OG}^m, k_{OG}^{zp} – значення коефіцієнта теплопередачі через огороження відповідно теплиці та грибниці, Вт/м 2 $^{\circ}\text{C}$; S_{OII}^m, S_{OII}^{zp} – площа поверхні опалювальних приладів відповідно теплиці та грибниці, м 2 ; k_{OII}^m, k_{OII}^{zp} – коефіцієнт тепловіддачі від опалювальних приладів до повітря відповідно теплиці та грибниці, Вт/м 2 $^{\circ}\text{C}$; t_{OII}^m, t_{OII}^{zp} – температура води в опалювальних приладах, $^{\circ}\text{C}$;

привівши (3.18) до стандартної форми (форми Коші) отримаємо –

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dt_6^m}{d\tau} &= -\frac{k_{OG}^m S_{OG}^m}{m_{II}^m C_p} (t_6^m - t_{36}) + \frac{k_{OII}^m S_{OII}^m}{m_{II}^m C_p} (t_{OII}^m - t_6^m) + \frac{V_{B1.1} \rho_{II}}{m_{II}^m} (t_6^{zp} - t_6^m) + \frac{V_{in\phi} \rho_{II}}{m_{II}^m} (t_{36} - t_6^m) \\ \frac{dt_6^{zp}}{d\tau} &= -\frac{k_{OG}^{zp} S_{OG}^{zp}}{m_{II}^{zp} C_p} (t_6^{zp} - t_{36}) + \frac{\alpha_C S_C}{m_{II}^{zp} C_p} (t_C - t_6^{zp}) + \frac{k_{OII}^{zp} S_{OII}^{zp}}{m_{II}^{zp} C_p} (t_{OII}^{zp} - t_6^{zp}) + \\ &+ \frac{V_{B1.1} \rho_{II}}{m_{II}^{zp}} (t_6^m - t_6^{zp}) + \frac{V_{B1.2} \rho_{II}}{m_{II}^{zp}} (t_{36} - t_6^{zp}) + \frac{V_{in\phi} \rho_{II}}{m_{II}^{zp}} (t_{36} - t_6^{zp}) \\ \frac{dt_C}{d\tau} &= \frac{m_C q - r m_{BII}}{m_C C_C} - \frac{\alpha_C S_C}{m_C C_C} (t_C - t_6^{zp}). \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Увівши додаткові позначення:

$$\begin{aligned} m_{II}^m &= V^m \rho_{II}, & m_{II}^{zp} &= V^{zp} \rho_{II}, & k_{II1}^m &= \frac{V_{B1.1}}{V^m}, & k_{II1}^{zp} &= \frac{V_{B1.1}}{V^{zp}}, \\ k_{II2} &= \frac{V_{B1.2}}{V^{zp}}, & k_{n.in\phi}^m &= \frac{V_{in\phi}}{V^m}, & k_{n.in\phi}^{zp} &= \frac{V_{in\phi}}{V^{zp}}, \end{aligned} \quad (3)$$

значення співвідношення явного тепловиділення субстрату до його теплоємності:

$$Q_C = \frac{q m_C - r m_{BII}}{m_C C_C}, \quad (4)$$

а також значення коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} C &= \frac{\alpha_C S_C}{m_C C_C}, & E &= \frac{\alpha_C S_C}{m_{II}^{zp} C_p}, & D_1 &= \frac{k_{OG}^m S_{OG}^m}{m_{II}^m C_p}, & D_2 &= \frac{k_{OG}^{zp} S_{OG}^{zp}}{m_{II}^{zp} C_p}, \\ F_1 &= \frac{k_{OII}^m S_{OII}^m}{m_{II}^m C_p}, & F_2 &= \frac{k_{OII}^{zp} S_{OII}^{zp}}{m_{II}^{zp} C_p}, & D^{zp} &= D_1 + k_{II2} + k_{n.in\phi}^{zp}, \\ D^{m.zp} &= k_{II1}^{zp}, & D^{zp.m} &= k_{II1}^m, & D^m &= D_2 + k_{n.in\phi}^m, \\ \lambda &= D^{zp} + E + F_1 + D^{m.zp}, & \beta &= D^m + F_2 + D^{zp.m}. \end{aligned} \quad (5)$$

де k_{II1}^m, k_{II1}^{zp} - коефіцієнти повітрообміну між приміщеннями, c^{-1} ;

k_{II2} - коефіцієнт повітрообміну між грибницею і зовнішнім середовищем, c^{-1} ;

$k_{n.in\phi}^m, k_{n.in\phi}^{zp}$ - коефіцієнт повітрообміну інфільтрації відповідно теплиці та грибниці, c^{-1} ;

V^m, V^{zp} - об'єм відповідно теплиці та культиваційного приміщення, м³;

одержимо:

$$\begin{cases} \frac{dt_6^m}{d\tau} = D^m t_{36} + F_2 t_{0П}^m - \beta t_6^m + D^{zp.m} t_6^{zp} \\ \frac{dt_6^{zp}}{d\tau} = D^{zp} t_{36} + E t_C + F_1 t_{0П}^{zp} - \lambda t_6^{zp} + D^{m.zp} t_6^m \\ \frac{dt_C}{d\tau} = Q_C - C t_C + C t_6^{zp}. \end{cases} \quad (6)$$

Визначивши з третього рівняння системи диференціальних рівнянь значення температури повітря в грибниці

$$t_6^{zp} = \frac{1}{C} \frac{dt_C}{d\tau} + t_C - \frac{Q_C}{C} \quad (7)$$

та продиференціювавши його, одержимо:

$$\frac{dt_6^{zp}}{d\tau} = \frac{1}{C} \frac{d^2 t_C}{d\tau^2} + \frac{dt_C}{d\tau}. \quad (8)$$

Підставивши (7) та (8) в друге рівняння системи (6) отримаємо лінійне неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами, що замінює друге та третє рівняння системи:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C} \frac{d^2 t_C}{d\tau^2} + \frac{dt_C}{d\tau} &= D^{zp} t_{36} + E t_C + F_1 t_{0П}^{zp} - \lambda t_6^{zp} + D^{m.zp} t_6^m - \\ &- \frac{1}{\alpha} \frac{dt_C}{d\tau} - \lambda t_C + \frac{\alpha Q_C}{C} + D^{m.zp} t_6^m. \end{aligned} \quad (9)$$

Приведемо отримане рівняння до вигляду:

$$\frac{d^2 t_C}{d\tau^2} = -C \frac{dt_C}{d\tau} + CD^{zp} t_{36} + CE t_C + CF_1 t_{0П}^{zp} - \lambda \frac{dt_C}{d\tau} - C\lambda t_C + \lambda Q_C + CD^{m.zp} t_6^m. \quad (10)$$

Підставивши (7) та (10) в (6), одержимо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dt_{\epsilon}^m}{d\tau} = D^m t_{\text{зв}} + F_2 t_{\text{ОП}}^m - \beta t_{\epsilon}^m + \frac{D^{2p,m}}{C} \frac{dt_C}{d\tau} + D^{2p,m} t_C - \frac{Q_C D^{2p,m}}{C} \\ \frac{d^2 t_C}{d\tau^2} = -C \frac{dt_C}{d\tau} + C D^{2p} t_{\text{зв}} + C E t_C + C F_1 t_{\text{ОП}}^{2p} - \\ - \lambda \frac{dt_C}{d\tau} - C \lambda t_C + \lambda Q_C + C D^{m,2p} t_{\epsilon}^m. \end{array} \right. \quad (11)$$

Визначивши з другого рівняння системи диференціальних рівнянь (11) значення температури повітря в теплиці

$$t_{\epsilon}^m = \frac{1}{CD^{m,2p}} \frac{d^2 t_C}{d\tau^2} + \frac{C + \lambda}{CD^{m,2p}} \frac{dt_C}{d\tau} + \frac{\alpha - E}{D^{m,2p}} t_C - \frac{D^{2p}}{D^{m,2p}} t_{\text{зв}} - \frac{F_1}{D^{m,2p}} t_{\text{ОП}}^{2p} - \frac{\lambda Q_C}{CD^{m,2p}} \quad (12)$$

та продиференціювавши його, одержимо:

$$\frac{dt_{\epsilon}^m}{d\tau} = \frac{1}{CD^{m,2p}} \frac{d^3 t_C}{d\tau^3} + \frac{C + \lambda}{CD^{m,2p}} \frac{d^2 t_C}{d\tau^2} + \frac{\lambda - E}{D^{m,2p}} \frac{dt_C}{d\tau}. \quad (13)$$

Підставивши рівняння (12) та (13) в перше рівняння системи (11), одержимо:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{CD^{m,2p}} \frac{d^3 t_C}{d\tau^3} + \frac{C + \lambda}{CD^{m,2p}} \frac{d^2 t_C}{d\tau^2} + \frac{\lambda - E}{D^{m,2p}} \frac{dt_C}{d\tau} = \\ & = D^m t_{\text{зв}} + F_2 t_{\text{ОП}}^m - \beta \frac{1}{CD^{m,2p}} \frac{d^2 t_C}{d\tau^2} + \frac{C + \lambda}{CD^{m,2p}} \frac{dt_C}{d\tau} + \frac{\lambda - E}{D^{m,2p}} t_C - \\ & - \frac{D^{2p}}{D^{m,2p}} t_{\text{зв}} - \frac{F_1}{D^{m,2p}} t_{\text{ОП}}^{2p} - \frac{\lambda Q_C}{CD^{m,2p}} + \frac{D^{2p,m}}{C} \frac{dt_C}{d\tau} + D^{2p,m} t_C - \frac{Q_C D^{2p,m}}{C}. \end{aligned} \quad (14)$$

Приведемо отримане рівняння до вигляду:

$$\begin{aligned} & \frac{d^3 t_C}{d\tau^3} + (C + \lambda + \beta) \frac{d^2 t_C}{d\tau^2} + [\beta(C + \lambda) + C(\lambda - E) - D^{m,2p} D^{2p,m}] \frac{dt_C}{d\tau} + \\ & + [C\beta(\lambda - E) - CD^{m,2p} D^{2p,m}] t_C = (CD^{m,2p} D^m + C\beta D^{2p}) t_{\text{зв}} + \\ & + CD^{m,2p} F_2 t_{\text{ОП}}^m + C\beta F_1 t_{\text{ОП}}^{2p} + (\lambda\beta - D^{m,2p} D^{2p,m}) Q_C. \end{aligned} \quad (15)$$

З даного рівняння видно, що при постійних температурах води в опалювальних приладах, оскільки вони підтримується окремою системою

регулювання, основним вхідним впливом, який може привести до зміни температури субстрату, є зміна температури зовнішнього повітря, зміна температури повітря яке надходить із теплиці або зміна тепловиділення субстрату. Оскільки швидкість зміни температури зовнішнього повітря, повітря із теплиці та тепловиділення субстрату незначна, будемо вважати, що на короткому відрізку часу вони також є постійними величинами. В цьому випадку диференціальне рівняння зміни температури субстрату буде мати вигляд:

$$\frac{d^3 t_C}{d\tau^3} + a \frac{d^2 t_C}{d\tau^2} + b \frac{dt_C}{d\tau} + ct_C = A, \quad (16)$$

де $a = C + \lambda + \beta$;

$$b = \beta(C + \lambda) + C(\lambda - E) - D^{m.ep} D^{ep.m};$$

$$c = C\beta(\lambda - E) - CD^{m.ep} D^{ep.m}$$

$$A = (CD^{m.ep} D^m + C\beta D^{ep}) t_{3g} + CD^{m.ep} F_2 t_{оп}^m + C\beta F_1 t_{оп}^{ep} + (\lambda\beta - D^{m.ep} D^{ep.m}) Q_C.$$

Очевидно, що при цьому одне з часткових рішень неоднорідного диференціального рівняння третього порядку з постійними коефіцієнтами, яке одночасно є сталим значенням температури субстрату, буде мати вигляд:

$$t_C^{cm} = \frac{A}{c} = \frac{(CD^{m.ep} D^m + C\beta D^{ep}) t_{3g} + CD^{m.ep} F_2 t_{оп}^m + C\beta F_1 t_{оп}^{ep} + (\lambda\beta - D^{m.ep} D^{ep.m}) Q_C}{C\beta(\lambda - E) - CD^{m.ep} D^{ep.m}}. \quad (17)$$

Загальне рішення диференціального рівняння, як сума рішень відповідного однорідного диференціального рівняння та часткового рішення неоднорідного диференціального рівняння матиме вигляд:

$$t_C = C_1 \exp(k_1 \tau) + C_2 \exp(k_2 \tau) + C_3 \exp(k_3 \tau) + t_C^{cm} \quad (18)$$

де k_1, k_2, k_3 – корені характеристичного рівняння виду $k^3 + ak^2 + bk + c = 0$;

C_1, C_2, C_3 – сталі рішення диференціального рівняння.

З третього рівняння системи диференційних рівнянь (3.23) знаходимо:

$$t_e^{zp} = \left(\frac{k_1}{C} + 1\right) C_1 \exp(k_1 \tau) + \left(\frac{k_2}{C} + 1\right) C_2 \exp(k_2 \tau) + \left(\frac{k_3}{C} + 1\right) C_3 \exp(k_3 \tau) + t_e^{zp.cm} \quad (19)$$

де $t_a^{\ddot{a}\ddot{b},\ddot{b}\ddot{a}}$ – сталі значення температури повітря грибниці, °С

$$t_e^{zp.cm} = \frac{A}{c} - \frac{Q_C}{C}. \quad (20)$$

З другого рівняння системи диференційних рівнянь (3.28) знаходимо:

$$t_e^m = S_1 C_1 \exp(k_1 \tau) + S_2 C_2 \exp(k_2 \tau) + S_3 C_3 \exp(k_3 \tau) + t_e^{m.cm} \quad (21)$$

де $t_a^{\dot{a},\dot{b}}$ – сталі значення температури повітря теплиці, °С;

$$t_e^{m.cm} = -\frac{E - \lambda}{D^{m.ep}} \frac{A}{c} - \frac{D^{zp}}{D^{m.ep}} t_{зв}^{zp} - \frac{F_1}{D^{m.ep}} t_{ОП}^{zp} - \frac{\lambda Q_C}{CD^{m.ep}}; \quad (22)$$

$$S_1 = \frac{k_1^2}{CD^{m.ep}} + \frac{C + \lambda}{CD^{m.ep}} k_1 - \frac{E - \lambda}{D^{m.ep}}; \quad S_2 = \frac{k_2^2}{CD^{m.ep}} + \frac{C + \lambda}{CD^{m.ep}} k_2 - \frac{E - \lambda}{D^{m.ep}};$$

$$S_3 = \frac{k_3^2}{CD^{m.ep}} + \frac{C + \lambda}{CD^{m.ep}} k_3 - \frac{E - \lambda}{D^{m.ep}}.$$

Постійні рішення диференційних рівнянь визначаються з тієї умови, що в початковий момент часу температура субстрату та повітря дорівнюють своїм початковим сталим значенням. При наявності вхідних збуджуючих впливів (зміна температури зовнішнього повітря або величини тепловиділень субстрату) встановлюються нові сталі значення температури субстрату та повітря в грибниці та теплиці. Таким чином можна записати:

$$\begin{cases} S_1 C_1 + S_2 C_2 + S_3 C_3 + t_6^{m.cm.k} - t_6^{m.cm.n} = 0 \\ \left(\frac{k_1}{C} + 1\right) C_1 + \left(\frac{k_2}{C} + 1\right) C_2 + \left(\frac{k_3}{C} + 1\right) C_3 + t_6^{zp.cm.k} - t_6^{zp.cm.n} = 0 \\ C_1 + C_2 + C_3 + t_C^{cm.k} - t_C^{cm.n} = 0. \end{cases} \quad (23)$$

де $t_6^{m.cm.n}$, $t_6^{m.cm.k}$ - початкове та кінцеве сталі значення температури повітря в теплиці, °С;

$t_6^{zp.cm.n}$, $t_6^{zp.cm.k}$ - початкове та кінцеве сталі значення температури повітря в грибниці, °С;

$t_C^{cm.n}$, $t_C^{cm.k}$ - початкове та кінцеве сталі значення температури повітря в грибниці, °С.

Висновок. По імітаційній математичній моделі можна зробити висновок, що перехідні процеси мають експоненціальний характер, а система „рослинна теплиця – грибниця” з точки зору автоматичного управління температурою субстрату являє собою трьохмісткосний об’єкт.

Список літератури

1. Гірченко М.Т., Жоров В.І., Шаповалов Л.В., Кепко О.І. Енергозбереження в приміщеннях закритого ґрунту для вирощування овочевої та вітамінної продукції. // Тези доповідей науково-технічної конференції „Енергозберігаючі технології та технічні засоби для виробництва сільськогосподарської продукції”. – Глеваха. ІМЕСГ УААН, – 1993. – С.87–89.
2. Гродзинский Д.М. Биофизика растений. –К.: Наукова думка, 1982. – 256 с,
3. Кепко О.І. Математична модель опалювально–вентиляційної системи замкнутого повітрообміну між окремими приміщеннями в закритому ґрунті // Збірник наукових праць Національного аграрного університету. Том XV. – К., 2003. – С. 413–419.
4. Кепко О.І. Моделювання енергозберігаючих режимів роботи опалювально-вентиляційного обладнання в спорудах закритого ґрунту при вирощуванні білкової продукції. // Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип..83. –Глеваха. ННЦ ІМЕСГ, 2000. – С. 199–202.
5. Патент № 57956 А Україна, МКВ А01G9/24. Спосіб вентиляції споруд закритого ґрунту / Гірченко М.Т., Голуб Г.А., Жоров В.І., Вдовенко С.А.,

Кепко О.І, Шаповалов Л.В. (Україна). – №2002021688; Опубл. 15.07.2003.
Бюл. № 7.

6. Szudyga K. Maszkiewicz J. Uprawa pieczarek. Warszawa. Hortpress sp. z o.o. 1991, –
123 с.

Анотація

Теоретичним шляхом одержані динамічні характеристики в перехідних процесах зміни температури субстрату та повітря в грибниці і теплиці в замкнутій системі вентиляції споруд закритого ґрунту.

Аннотация

Теоретическим путём получены динамические характеристики в переходных процессах изменения температуры субстрату и воздуха в грибнице и теплице в замкнутой системе вентиляции сооружений закрытого грунта.

Annotation

Theoretical analysis led to some data of dynamic characteristics in the transitional processes of temperature changes of the substrate and air in the mycelium and hothouse in the closed system of ventilation of protected ground constructions.