

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ БІОРЕАКТОРА БЕЗПЕРЕРВНОЇ І ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ

Б. І. Котов, доктор технічних наук, професор

Ю. І. Панцир, кандидат технічних наук, доцент

І. Д. Герасимчук, кандидат технічних наук, доцент

Подільський державний аграрно-технічний університет

В. О. Грищенко, кандидат технічних наук, старший викладач

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: vlgr@nubip.edu.ua

Анотація. Розглянуто питання підвищення ефективності переробки відходів тваринництва та рослинництва з метою отримання біогазового палива та органічних добрив, що зменшує залежність сільськогосподарських виробництв від енергопостачальних компаній та підвищує екологічний стан навколишнього середовища. Надано аналіз якості процесу виробки біогазу в залежності від стану метанових бактерій, які дуже чутливі до змін температури субстрату.

Для керування тепловими процесами необхідно використовувати системи автоматизації, але для синтезу систем керування необхідно визначити динамічні характеристики об'єкта автоматизації. Для розробки математичної моделі запропоновано використати узагальнену конструктивно-технологічну схему біореактора. Об'єкт моделювання складається з таких елементів які можна представити тепло-аккумулюючими ємностями: корпус, теплообмінна труба, субстрат, теплоносій (в об'ємі теплообмінної труби); теплоємність завантажувального і вивантажувального пристроїв не враховуємо.

Розроблена удосконалена математична модель нестационарних температурних процесів біореактора із системою підігрівання субстрату, яка складається з чотирьох диференціальних рівнянь у частинних похідних і враховує розподіл температури потоків субстрату і теплоносія в напрямку руху. Для ідентифікації параметрів моделі і спрощеного аналітичного дослідження подано спрощені моделі динаміки і отримані аналітичні залежності перехідних процесів в біореакторі.

Ключові слова: біореактор математичні моделі, теплоносій, тепловий баланс, теплообмінник

Актуальність. Збільшення вартості та обмеженість енергоресурсів для сільськогосподарського виробництва обумовлює необхідність переробки і

використання відходів тваринництва з метою отримання біогазового палива, органічних добрив і покращення екологічного стану навколишнього середовища.

Біоконверсія органічних відходів реалізується шляхом анаеробної ферментації в біоенергетичних установках безперервної і періодичної дії.

Залежно від температури процес метанового бродіння може протікати в одному з чотирьох режимів: психрофільному (8–12 °С), мезофільному (28–32 °С), термотолерантному (40 °С) і термофільному (53–58 °С). Враховуючи, що метанові бактерії досить чутливі до різкої зміни температури (різке зниження температури на декілька градусів може призвести до затухання та припинення метаноутворення) температурний режим необхідно підтримувати в межах порівняно вузького інтервалу. Такий режим можна забезпечити тільки застосовуючи автоматизацію керування тепловими процесами.

Для вибору способу керування і синтезу автоматичної системи керування необхідно знати динамічні характеристики об'єкта автоматизації, які можна визначити шляхом математичного моделювання на стадії проектування нової або при експлуатації існуючої біогазової установки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основні положення проблеми отримання і використання біогазу, технологія, машини і обладнання детально висвітлені в монографії [1]. Теплоенергетичні аспекти (теплообмін, гідродинаміка в елементах біогазових установок) вироблення біогазу проаналізовано в роботах [2, 3]. Способи теплозабезпечення біореакторів різних конструкцій, питання моделювання і розрахунку параметрів елементів конструкцій подано в роботах [4, 5]. Питання автоматизації систем біоконверсії, основні задачі і вимоги висвітлено в роботах [2, 6]. В роботі [7] наведено спрощені моделі динаміки біореактора безперервної дії. Переважна більшість проаналізованих публікацій присвячена розрахункам теплових процесів у вигляді статичних характеристик окремих елементів біогазових установок.

Питанням дослідження динамічних характеристик і нестационарних режимів приділено недостатньо уваги.

Мета дослідження – удосконалення математичного опису нестационарних теплових процесів і температурних режимів біореакторів.

Матеріали і методи дослідження. Математичний опис динаміки теплових процесів в біореакторі побудовано на основі аналізу рівнянь теплового балансу, теплообміну і теплопередачі в окремих елементах конструкції за узагальненою схемою, які представлено у вигляді теплоакumuлюючих (теплоінерційних) ємностей.

Результати досліджень і їх обговорення. Незважаючи на велике різноманіття конструкцій біореакторів, усі вони можуть бути представлені узагальненою конструктивно-технологічною схемою (рис. 1). Об'єкт моделювання складається з елементів, які можна представити тепло-акumuлюючими ємностями: корпус, теплообмінна труба, субстрат, теплоносій (в об'ємі теплообмінної труби); теплоємність завантажувального і вивантажувального пристроїв не враховуємо.

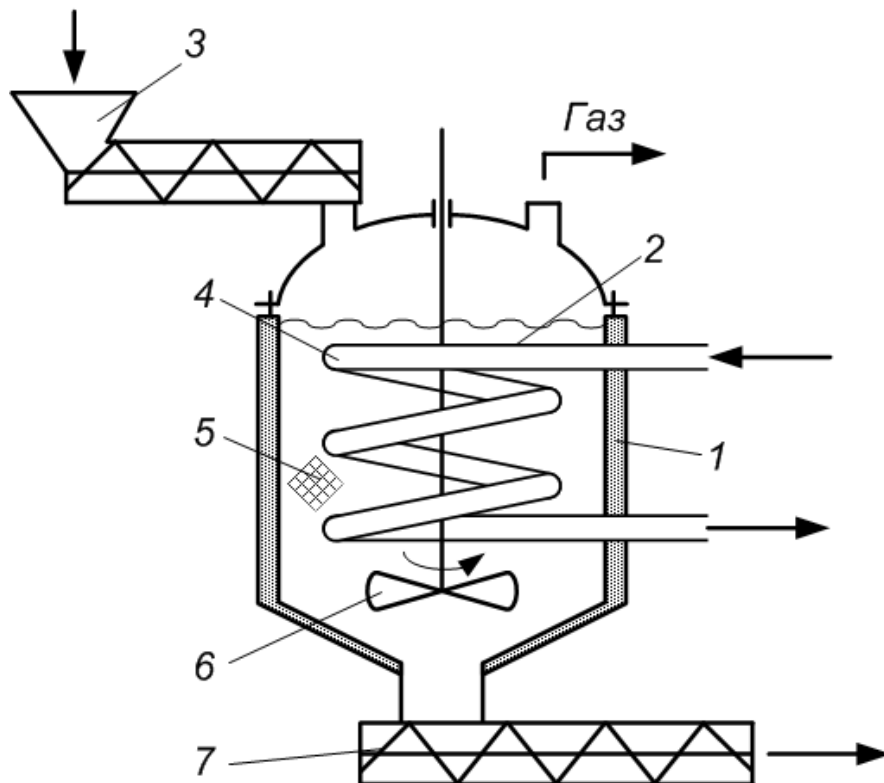


Рис. 1. Конструктивно-технологічна схема біореактора з безперервним циклом бродіння:

- 1 – корпус; 2 – теплообмінна труба; 3 – шнек завантаження субстрату;
- 4 – теплоносій в об'ємі труби; 5 – субстрат; 6 – перемішуючий пристрій;
- 7 – шнек вивантажувача добрив

При виводі диференціальних рівнянь теплових процесів зробимо такі допущення:

– субстрат ефективно переміщується і в поперечному перетині реактора має однакову температуру, а її зміна відбувається тільки в напрямку руху (одномірне температурне поле);

– теплофізичні параметри теплоносія, субстрату і елементів конструкції від температури не залежать і дорівнюють середнім значенням за процес;

– коефіцієнти теплообміну і теплопередачі розраховані для сталого режиму.

Для температурних режимів біореактора використовується розрахункова схема теплових потоків (рис. 2). Біореактор розглядається як система чотирьох теплових ємностей, між якими відбувається теплообмін і які взаємодіють із зовнішнім джерелом теплоти (на схемі не показано), яке характеризується величиною ентальпії теплоносія $J_1 = G_t c_t t_t$, що подається в реактор через теплообмінну поверхню (спірального теплообмінника).

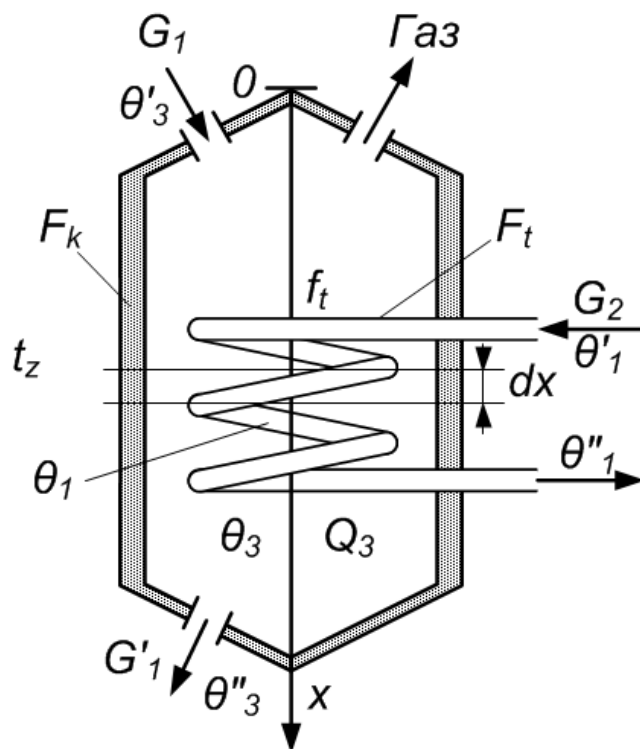


Рис. 2. Розрахункова схема теплових процесів біореактора

Використовуємо такі умовні позначення: $t, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ – температура відповідно, теплоносія, стінки труби, субстрату і стінки корпусу, °С; c_1, c_2, c_3, c_4 – питома теплоємність відповідно, теплоносія, стінки труби, субстрату і стінки корпусу, Дж/(кг·°С); m_1, m_2, m_3, m_4 – маса відповідно, теплоносія, стінки труби, субстрату і стінки корпусу, кг; G_1, G_2 – масові витрати теплоносія і субстрату, кг/с; $\alpha_1^v, \alpha_1^z, \alpha_4^v, \alpha_4^z$ – коефіцієнти теплообміну відповідно, внутрішній і зовнішній змійовика, внутрішній і зовнішній корпусу, Вт/(м²·°С); $f_1^v, f_1^z, F_k^v, F_k^z$ – поверхня відповідно, внутрішня і зовнішня трубки змійовика та корпусу, м²; H – висота шару субстрату, що взаємодіє із теплообмінником, м; q_3 – теплота біовиділень субстрату, Вт/кг; x – поточна координата, м; τ – поточний час, с.

Для елементарного об'єму реактора висотою dx рівняння теплового балансу, що описують зміну температури в елементах біореактора запишемо у вигляді:

$$G_1 c_1 dt = \frac{\alpha_1^v f_1^v}{H} (\theta_2 - t) dx, \quad (1)$$

$$c_2 S_2 \rho_2 dx \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = \frac{\alpha_1^v f_1^v}{H} (t - \theta_2) dx + \frac{\alpha_1^z f_1^z}{H} (\theta_3 - \theta_2) dx, \quad (2)$$

$$-G_2 c_2 d\theta_3 = \frac{\alpha_1^z f_1^z}{H} (\theta_3 - \theta_2) dx + \frac{\alpha_4^v F_k^v}{H} (\theta_3 - \theta_k) dx + q_3 m_3 dx, \quad (3)$$

$$c_4 S_4 \rho_4 dx \frac{\partial \theta_4}{\partial \tau} = \frac{\alpha_4^v F_k^v}{H} (\theta_3 - \theta_4) dx - \frac{\alpha_4^z F_k^z}{H} (\theta_4 - t_z) dx. \quad (4)$$

Розкриваючи повні диференціали dt та $d\theta$ після перетворень матимемо:

$$m_1 c_1 \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_1 c_1 H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_1^v f_1^v (\theta_2 - t), \quad (5)$$

$$m_2 c_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = -\alpha_1^v f_1^v (\theta_2 - t) + \alpha_2^z f_1^z (\theta_3 - \theta_2), \quad (6)$$

$$m_3 c_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + G_3 c_3 H \frac{\partial \theta_3}{\partial x} = \alpha_2^z f_1^z (\theta_2 - \theta_3) + \alpha_3^v F_k^v (\theta_4 - \theta_3) + q_3 m_3, \quad (7)$$

$$m_4 c_4 \frac{\partial \theta_4}{\partial \tau} = \alpha_3^v F_k^v (\theta_3 - \theta_4) - \alpha_4^z F_k^z (\theta_4 - t_z). \quad (8)$$

Система рівнянь описує нестационарний температурний режим біореактора і може бути розв'язана одним із числових методів [8]. Для наближеного визначення динамічних і статичних характеристик біореактора розглянемо окремо функціонування біореактора в стаціонарному і нестационарному режимах.

Стаціонарний режим характеризується тим, що при безперервному підведенні і відведенні потоків біомаси та теплоносія температури біомаси і теплоносіїв в кожній точці об'єму (при одномірному полі, для кожної точки по довжині в напрямку переміщення) в часі не змінюються. Тобто має місце стаціонарний розподіл температури і похідні за часом дорівнюють нулю: $\partial t / \partial \tau = \partial \theta_2 / \partial \tau = \partial \theta_3 / \partial \tau = \partial \theta_4 / \partial \tau = 0$. У цьому випадку зміна температури за координатою може бути описана двома рівняннями у звичайних похідних і двома алгебраїчними рівняннями:

$$G_1 c_1 H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_1 f_1^v (\theta_2 - t), \quad (9)$$

$$G_3 c_3 H \frac{\partial \theta_3}{\partial x} = \alpha_2 f_1^z (\theta_2 - \theta_3) + \alpha_3 F_k^v (\theta_4 - \theta_3) + q_3 m_3, \quad (10)$$

$$\alpha_1 f_1^v (\theta_2 - t) = \alpha_2 f_1^z (\theta_3 - \theta_2), \quad (11)$$

$$\alpha_3 F_k^v (\theta_3 - \theta_4) = \alpha_4 F_k^z (\theta_4 - t_z). \quad (12)$$

Визначивши з рівняння (11) і (12) значення величин θ_2 і θ_4 : $\theta_2 = a_1 \theta_3 + a_2 t$; $\theta_4 = a_3 \theta_3 + a_4 t_z$, і підставивши отримані значення в рівняння (9) і (10) після перетворень матимемо:

$$\begin{cases} T_1 \frac{dt}{dx} + m_1 t = \theta_3 \\ T_2 \frac{d\theta_3}{dx} + m_2 \theta_3 - n_2 = t \end{cases}, \quad (13)$$

$$\text{де } T_1 = \frac{G_1 c_1 H}{\alpha_1 f_1^v a_1}; \quad m_1 = \frac{1 - a_2}{\alpha_1}; \quad T_2 = \frac{G_3 c_3 H}{\alpha_2 f_1^z a_2}; \quad n_2 = \frac{q_3 m_3}{\alpha_2 f_1^z a_2}; \quad m_2 = \frac{\alpha_2 f_1^z (1 - a_1) - \alpha_3 F_k^v (a_3 - 1)}{\alpha_2 f_1^z a_2};$$

$$a_1 = \frac{\alpha_2 f_1^z}{\alpha_1 f_1^v + \alpha_2 f_1^z}; \quad a_2 = \frac{\alpha_1 f_1^v}{\alpha_1 f_1^v + \alpha_2 f_1^z}; \quad a_3 = \frac{\alpha_3 F_k^v}{\alpha_3 F_k^v + \alpha_4 F_k^z}; \quad a_4 = \frac{\alpha_4 F_k^z}{\alpha_3 F_k^v + \alpha_4 F_k^z}.$$

Розв'язуючи систему рівнянь (13) відносно $\theta_3(x)$ і $t(x)$ (тобто зводячи два рівняння до одного), після перетворень отримаємо:

$$A \frac{d^2 \theta_3}{dx^2} + B \frac{d\theta_3}{dx} + C\theta_3 = D_1, \quad (14)$$

$$A \frac{d^2 t}{dx^2} + B \frac{dt}{dx} + Ct = D_2, \quad (15)$$

де $A = T_1 T_2$; $B = m_1 T_2 + m_2 T_1$; $C = m_1 m_2 - 1$; $D_1 = m_1 m_2$; $D_2 = n_2 m_2$.

Розв'язок неоднорідного рівняння другого порядку отримаємо у вигляді суми розв'язків однорідного і частинного рівнянь:

$$t(x) = C_1 e^{\gamma_1 x} + C_2 e^{\gamma_2 x} + \frac{D_2}{C}, \quad (16)$$

де C_1, C_2 – сталі інтегрування; $\gamma_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ – корені характеристичного рівняння.

Сталі інтегрування визначимо з початкових умов: $x = 0$; $t = t_1$; $dt/dx = 0$:

$$C_1 = -\gamma_1 \frac{t_1 C - D_2}{C(\gamma_1 - \gamma_2)}; \quad C_2 = -\gamma_2 \frac{t_1 C - D_2}{C(\gamma_1 - \gamma_2)}. \quad (17)$$

З урахуванням (17) рівняння (16) набуває вигляду:

$$t(x) = \frac{t_1 C - D_2}{C(\gamma_1 - \gamma_2)} (\gamma_1 e^{\gamma_2 x} - \gamma_2 e^{\gamma_1 x}) + \frac{D_2}{C}. \quad (18)$$

Аналогічно розв'язок рівняння (15) за умов $x = 0$; $\theta_3 = \theta_{31}$; $d\theta_3/dx = 0$:

$$\theta_3(x) = \frac{\theta_{31} C - D_1}{C(\gamma_1 - \gamma_2)} (\gamma_1 e^{\gamma_2 x} - \gamma_2 e^{\gamma_1 x}) + \frac{D_1}{C}. \quad (19)$$

Рівняння (18) і (19) описують розподіл температури субстрату і теплоносія за висотою біореактора. Температура субстрату і теплоносія на виході може бути визначена з рівнянь (18) і (19) підстановкою $x = H$.

Для визначення динамічних характеристик біореактора з урахуванням розподіленості температури потоків біосубстрату і теплоносія системі підігріву необхідно з рівнянь (18) і (19) визначити похідні від температури за координатою

(градієнти температури) $\partial t(x)/\partial x$, $\partial \theta(x)/\partial x$ і підставити отримані значення у рівняння (5) і (7). Визначаючи похідну від залежностей (18) і (19):

$$\frac{\partial t(x)}{\partial x} = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (t_1 C - D_1)}{C(\gamma_1 - \gamma_2)} (e^{\gamma_2 x} - e^{\gamma_1 x}) = F_1(x),$$

$$\frac{\partial \theta_3(x)}{\partial x} = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (\theta_{31} C - D_2)}{C(\gamma_1 - \gamma_2)} (e^{\gamma_2 x} - e^{\gamma_1 x}) = F_2(x),$$

і підставляючи отримані значення в рівняння (5), (7) отримаємо систему диференціальних рівнянь у звичайних похідних:

$$m_1 c_1 \frac{dt}{d\tau} = -G_1 c_1 H F_1(x) + \alpha_1 f_1^v \theta_2 - \alpha_1 f_1^v t, \quad (20)$$

$$m_2 c_2 \frac{d\theta_2}{d\tau} = \alpha_1 f_1^v t + \alpha_2 f_1^z \theta_3 - (\alpha_1 f_1^v + \alpha_1 f_1^z) \theta_2, \quad (21)$$

$$m_3 c_3 \frac{d\theta_3}{d\tau} = \alpha_2 f_1^z \theta_2 - G_3 c_3 H F_2(x) + \alpha_3 F_k^v \theta_4 +$$

$$+ q_v m_3 - (\alpha_2 f_1^v + \alpha_3 F_k^v) \theta_3, \quad (22)$$

$$m_4 c_4 \frac{d\theta_4}{d\tau} = \alpha_3 F_k^v \theta_3 - (\alpha_3 F_k^v + \alpha_4 F_k^z) \theta_4 + \alpha_1 F_k^z t_z, \quad (23)$$

які описують нестационарні температурні режими біореактора, як динамічного об'єкту четвертого порядку. Для спрощення аналітичного дослідження та параметричної ідентифікації математичної моделі (за даними натурального експерименту) доцільно знизити порядок рівнянь. Теплову ємність теплообмінної труби додаємо до теплоємності теплоносія ($m_1 c_1 + m_2 c_2$), а теплоємність корпусу до субстрату ($m_3 c_3 + m_4 c_4$), теплообмін між потоками врахуємо коефіцієнтами теплопередачі через стінку труби k_1 і корпусу k_2 :

$$k_1 = \left(\frac{1}{\alpha_1^v} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_1^z} \right)^{-1}, \quad k_2 = \left(\frac{1}{\alpha_3^v} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_3^z} \right)^{-1},$$

де $\delta_2, \delta_3, \lambda_2, \lambda_3$ – товщина стінки труби і корпусу та відповідні коефіцієнти теплопровідності.

Введемо позначення: $T_1' = \frac{m_1 c_1 + m_2 c_2}{k_1 \bar{f}_1}$; $T_2' = \frac{m_3 c_3 + m_4 c_4}{k_1 \bar{f}_1}$; $b_1 = \frac{F_1(x)}{k_1 \bar{f}_1}$;
 $a_2 = \frac{m_3 \bar{F}_k + m_1 \bar{f}_1}{k_1 \bar{f}_1}$; $b_2 = \frac{F_1(x) + q_3 m_3 + k_3 \bar{F}_k t_z}{k_1 \bar{f}_1}$; $\bar{f}_1 = \frac{f_1^v + f_1^z}{2}$; $\bar{F}_k = \frac{F_k^v + F_k^z}{2}$.

З урахуванням зроблених припущень і введених позначень динамічний температурний режим біореактора визначаються системою наступних рівнянь:

$$\begin{cases} T_1' \frac{dt}{d\tau} + t - b_1 = \theta_3 \\ T_2' \frac{d\theta_3}{d\tau} + a_2 \theta_3 - b_2 = t \end{cases} \quad (24)$$

Розв'язок системи рівнянь (24) за початкових умов $\tau = 0$; $t = t_0$; $\theta_3 = \theta_{30}$ (де t_0 , θ_{30} – початкові значення температури теплоносія і субстрату), $dt/d\tau = d\theta_3/d\tau = 0$ отримано аналогічно (13):

$$t(\tau) = \frac{t_0 C_5 - D_3}{C_5 (r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_3}{C_5}, \quad (25)$$

$$\theta_3(\tau) = \frac{\theta_{30} C_5 - D_4}{C_5 (r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_4}{C_5}, \quad (26)$$

де $r_{1,2} = \frac{-B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_5}}{2A_1}$ – корені характеристичного рівняння; $A_1 = T_1' T_2'$;

$$B_1 = T_1' a_2 + T_2'; \quad C_5 = a_2 - 1; \quad D_3 = b_2 + b_1 a_2; \quad D_4 = b_1 + b_1.$$

Температура теплоносія $t_1(\tau)$ на вході в теплообмінник визначається температурою на виході трубопроводу від водогрійного котла який, як правило працює на біогазі, що частково видаляється з біореактора, і її можна визначити з рівняння теплового балансу:

$$G_1 c_1 (t_0 - t_k) = Q_p^n \eta q_t + k_{tp} F_{tp} (0.5(t_1' + t_2') - t_z), \quad (27)$$

де k_{tp}, F_{tp} – коефіцієнт теплопровідності і поверхня трубопроводу; Q_p^n – теплотворна здатність біогазу; q_t – об'ємні витрати біогазу; η – коефіцієнт корисної дії водогрійного котла; t_1', t_2' – температура води на вході і виході трубопроводу.

За отриманими формулами побудовано графічні залежності зміни температури субстрату і теплоносія в часі (оис. 3).

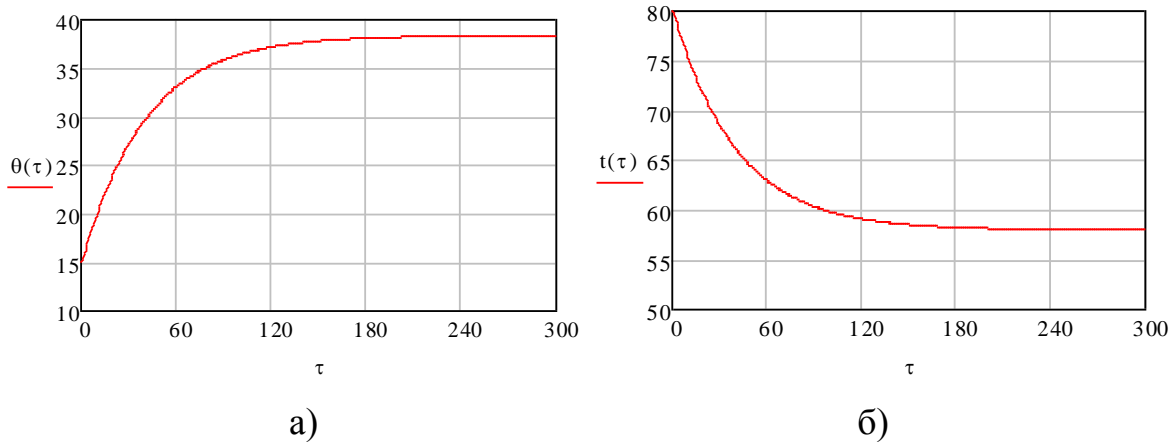


Рис. 3. Зміння в часі температури субстрату (а) і теплоносія (б)

При дослідженні нестационарного температурного режиму біореактора періодичної дії із системи рівнянь (24) виключається складова, що характеризує переміщення матеріалу, тобто $\partial\theta_3/\partial x = 0$ в рівнянні (7) і відповідна функція $F_2(x) = 0$ в рівнянні (22); коефіцієнт b_2 в рівнянні (24) змінює знак і набуває вигляд:

$$b'_2 = \frac{q_3 m_3 + k_3 \overline{F}_k t_z}{k_1 \overline{f}_1}. \quad (28)$$

Висновки і перспективи.

1. Обґрунтовано математичну модель, що описує нестационарні температурні режими в біореакторі із системою обігрівання, яка враховує розподіл параметрів потоків в процесі руху.
2. Отримані аналітичні залежності перехідних теплових процесів можна використовувати для синтезу систем автоматичного регулювання температурних режимів.

Список літератури

1. Біопалива (технологія, машини і обладнання) / В.О. Дубровін, М.О. Корчемний, І.П. Масло та ін. К.: ЦТІ "Енергетика і електрифікація", 2004. 256 с.
2. Ратушняк, Г.С., Джеджула, В.В., Анохіна, К.В. Енергозберігаючі відновлювальні джерела тепlopостачання. Вінниця: ВНТУ, 2010. 170 с.

3. Ткаченко, С.Й., Степанов, Д.В. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки : монографія. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2004. 132 с.
4. Семенов, И.В., Зинченко, М.Г. Оборудование и процессы метанового сбраживания органических отходов : монография. Х. : Підручник НТУ ХПІ, 2012. 271 с.
5. Желих, В.М., Фурдас, Ю.В. Біогазові технології: теорія і практика : монографія. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2015. 164 с.
6. Ратушняк, Г.С., Дзеджула, В.В. Энергоэкономия в системах биоконверсии. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2006. 83 с.
7. Котов, Б.І., Лендел, Т.І., Чирченко, Д.В. Моделирование динамических характеристик биотехнологических установок как объектов автоматического управления температурными режимами / Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України, 2011, Вип. 166. Ч. 3. С.163-169.
8. Остапенко, Ю.А. Идентификация та моделирование технологических объектов управления : підручник. К.: Задруга, 1999. 424.

References

1. Dubrovin, V.O., Korchemnyy, M.O., Maslo, I.P. etc. (2004). Biopalyva (tekhnologiya, mashyny i obladnannya) [Biofuels (technology, machinery and equipment)] Kyiv: TSTI "Power Engineering and Electrification", 256.
2. Ratushnyak, H.S., Dzhedzhula, V.V., Anokhina, K.V. (2010). Enerhozberihayuchi vidnovlyuval'ni dzherela teplopostachannya [Energy-efficient renewable sources of heat supply]. Vinnitsa: VNTU, 170.
3. Tkachenko, S.Y., Stepanov, D.V. (2004). Teploobminni ta hidrodynamichni protsesy v elementakh enerhozabezpechennya biohazovoyi ustanovky : monohrafiya [Heat exchange and hydrodynamic processes in the elements of energy supply of biogas plant: monograph]. Vinnitsa: Universum-Vinnytsya, 132.
4. Semenenko, I.V., Zinchenko, M.G. (2012). Oborudovaniye i protsessy metanovogo sbrazhivaniya organicheskikh otkhodov : monografiya [Equipment and processes for methane digestion of organic waste: monograph]. Kharkov: Pidruchnik NTU KHPI, 271.
5. Zhelykh, V.M., Furdas, Yu.V. (2015). Biohazovi tekhnolohiyi: teoriya i praktyka : monohrafiya [Biogas technologies: theory and practice: monograph]. Lviv: View of Lviv Polytechnic, 164.
6. Ratushnyak, H.S., Dzhedzhula, V.V. (2006) Enerhozberezhennya v systemakh biokonversiyi. Navchal'nyy posibnyk [Energy saving in bioconversion systems. Tutorial]. Vinnitsa: VNTU, 83.
7. Kotov, B. I., Lendyel, T. I., Chyrchenko, D. V. (2011). Modelyuvannya dynamichnykh kharakterystyk biotekhnolohichnykh ustanovok yak ob"yektiv avtomatychnoho keruvannya temperaturnymy rezhymamy [Modeling of dynamic characteristics of biotechnological installations as objects of automatic control of

temperature regimes]. Scientific herald of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 166(3), 163-169.

8. Ostapenko, Yu. A. (1999). *Identyfikatsiya ta modelyuvannya tekhnolohichnykh ob'yektiv keruvannya : pidruchnyk* [Identification and modeling of technological objects of control: a textbook]. Kyiv: Zadruga, 1999. 424.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ БИОРЕАКТОРАХ НЕПРЕРЫВНОГО И ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Б. И. Котов, Ю. И. Панцирь, И. Д. Герасимчук, В. А. Грищенко

Аннотация. *Рассмотрены вопросы повышения эффективности переработки отходов животноводства и растениеводства с целью получения биогазового топлива и органических удобрений, что уменьшает зависимость сельскохозяйственных производств от энергоснабжающих компаний и повышает экологическое состояние окружающей среды. Дан анализ качества процесса выработки биогаза в зависимости от состояния метановых бактерий, которые очень чувствительны к изменениям температуры субстрата.*

Для управления тепловыми процессами необходимо использовать системы автоматизации, но для синтеза систем управления необходимо определить динамические характеристики объекта автоматизации. Для разработки математической модели предложено использовать обобщенную конструктивно-технологическую схему биореактора. Объект моделирования состоит из следующих элементов, которые можно представить тепло-аккумуляторами емкостями: корпус, теплообменная труба, субстрат, теплоноситель (в объеме теплообменной трубы); теплоемкость загрузочного и выгрузного устройств не учитываем.

Разработана усовершенствованная математическая модель нестационарных температурных процессов биореактора с системой подогрева субстрата, которая состоит из четырех дифференциальных уравнений в частных производных и учитывает распределение температуры потоков субстрата и теплоносителя в направлении движения. Для идентификации параметров модели и упрощенного аналитического исследования представлены упрощенные модели динамики и получены аналитические зависимости переходных процессов в биореакторе.

Ключевые слова: *биореактор, математические модели, теплоноситель, тепловой баланс, теплообменник*

MATHEMATICAL MODELING OF NON-STATIONARY HEAT MODE BIOREACTOR CONTINUOUS AND BATCH

B. Kotov, Yu. Pantsyr, I. Gerasimchuk, V. Hryshchenko

Abstract. *The article considers the issues of increasing the efficiency of processing of livestock and crop residues for the purpose of obtaining biogas and organic fertilizers, which reduces the dependence of agricultural production from energy supply companies and enhances the environmental state of the environment. The analysis of the quality of the*

biogas production process is given depending on the state of methane bacteria which is very sensitive to changes in the temperature of the substrate. To control thermal processes, it is necessary to use automation systems, but for the synthesis of control systems, it is necessary to determine the dynamic characteristics of the object of automation. To develop a mathematical model, it is proposed to use a generalized structural and technological scheme of a bioreactor. The object of simulation consists of the following elements which can be represented by heat-accumulation capacities: a housing, a heat exchange tube, a substrate, a heat-carrier (in the volume of a heat-exchange tube); the capacity of the loading and unloading devices is not taken into account. An improved mathematical model of non-stationary temperature processes of a bioreactor from a substrate heating system, which consists of four differential equations in partial derivatives, and takes into account the distribution of the temperature of the flows of substrate and coolant in the direction of motion. To identify model parameters and simplified analytical research, simplified dynamics models are presented and analytical dependences of transient processes in a bioreactor are obtained.

Key words: *bioreactor, mathematical models, coolant, heat balance, heat exchanger*