

УДК 628.385

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ ТВАРИННИЦЬКИХ ВІДХОДІВ

*А. І. Чміль, доктор технічних наук, професор*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*e-mail: a.chmil@ukr.net*

**Анотація.** Анаеробне зброджування гною в біоенергетичних установках передбачає використання цілого комплексу інженерно-технічних споруд (біореактор, газгольдер, система термостабілізації тощо), а також вимагає значних енергетичних і матеріальних витрат. У зв'язку з цим актуальним є завдання оптимального управління цими спорудами на основі математичного моделювання та використання енергії ресурсозберігаючих технологій.

Запропонований алгоритм реалізовано в адаптивній системі управління анаеробним зброджуванням тваринницьких відходів, за допомогою якої регулюються підведення теплоти та матеріальний потік на вході в метантенк.

На першому етапі побудови моделі здійснюється збір, попередня обробка інформації та оцінка значущості параметрів БЕУ. На другому етапі проводяться дослідження статичних характеристик кінетики на лабораторній установці без обмеження росту мікроорганізмів за оптимальних умов протікання процесу. На цьому етапі з розгляду виключаються параметри, що несуттєво впливають на процес.

На третьому етапі досліджуються макрокінетичні закономірності процесу на пілотній установці, за умов, наближених до промислових, визначаються структура і параметри моделі, на основі яких вибирається вид функціональної залежності даних параметрів від режимно-конструктивних параметрів БЕУ.

На четвертому етапі формується повна математична модель БЕУ, уточнюються значення параметрів і працездатність моделі.

Практичне застосування запропонованих методів і алгоритмів для вирішення завдань оптимального управління анаеробним зброджуванням тваринницьких відходів комплексу з відгодівлі великої рогатої худоби у двоступеневих пілотних біоенергетичних установках показало їх ефективність і працездатність.

**Ключові слова:** анаеробне зброджування, енерговитрати, тваринницькі відходи

**Актуальність.** Процеси, що протікають у метантенку, відрізняються

суттєвою не стаціонарністю, оскільки в біосинтезі першочергову роль відіграють мікроорганізми, які зазнають швидких і повільних важко контрольованих еволюцій. Це робить об'єкт мало відтворюваним, а отже, складним для математичного описання і управління. Особливо складно управляти біоенергетичними установками (БЕУ) за умов невизначеності інформації, яка виникає за рахунок стохастичних змін технологічних параметрів під дією збурюючих дій (величини кінетичних констант хімічних реакцій, коефіцієнтів тепло- і масопередачі, постійної часу, часу запізнення) та наявності невизначеностей у застосованих математичних моделях (зниження порядку моделі, нехтування деякими фізико-хімічними явищами, лінеаризація нелінійностей моделі тощо). Єдиним надійним методом за цих умов може бути системний підхід, згідно з яким весь комплекс явищ, що здійснюються в біореакторі, розбивають на ряд взаємозв'язаних "елементарних" процесів і математичну модель зображують у вигляді ієрархічної структури, кожний рівень якої описується сукупністю певних явищ. Такий метод дозволяє відібрати лише суттєві з множини взаємодіючих факторів і виключає неузгоджені локальні варіанти.

Оскільки системний метод пропонує лише "логіку пошуку", але не має готових, універсальних рішень, то для кожної конкретної проблеми необхідно визначити мету оптимізації, межі системи та її структуру, критерії оцінки рішень, математичну модель, що відображає зв'язок між метою, альтернативами, всіма зовнішніми факторами і потребами в ресурсах, а також дослідити модель, розбивши її на підсистеми.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вітчизняними і зарубіжними вченими [1,2,3] досягнуті великі успіхи в іммобілізації мікроорганізмів на різних носіях, розробленні і мають практичне застосування так звані анаеробні реактори другого покоління, які дозволяють значно підвищити концентрацію мікроорганізмів у реакторі і забезпечують ефективне очищення стоків у дуже

широкому діапазоні концентрацій (БПК<sub>5</sub> 0,3-100 г/л). При цьому час обробки становить від 4 до 48 год.

**Мета дослідження** – обґрунтування моделі оптимізації процесу метанового зброджування тваринницьких відходів.

**Матеріали та методика дослідження.** На першому етапі побудови моделі здійснюється збір, попередня обробка інформації та оцінка значущості параметрів БЕУ. Всі параметри відповідно до характеру і міри їх участі в технологічному процесі розділені (рис. 1) на вхідні  $x(t)$  (концентрація біогенних речовин у субстраті  $x_1(t)$ , температура субстрату  $x_2(t)$ , рН живильного субстрату  $x_3(t)$ ), збурюючі  $\eta(t)$  (температура зовнішнього середовища  $x'_{k+1}(t)$ , вміст інгібуючих речовин  $x'_{k+2}(t)$ ), режимні  $\omega(t)$  (температура  $x''_{k+1}(t)$ , рН середовища в біореакторах  $x''_{n+2}(t)$ , час утримання біомаси  $x''_{n+3}(t)$ ) та вихідні  $y(t)$  (концентрація мікроорганізмів  $y_1(t)$ , продуктивність за біогазом  $y_2(t)$ , ступінь мінералізації органічної речовини  $x_2(t)$ ).

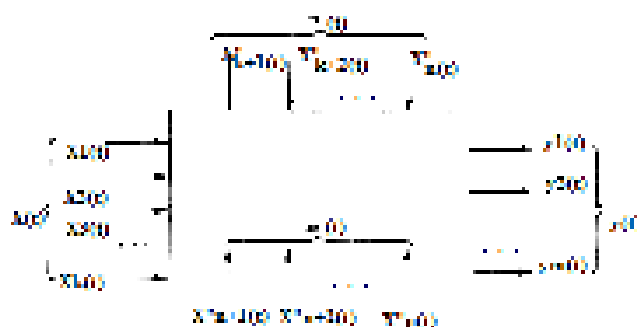


Рис. 1. Схема потоків енергії і речовини в БЕУ

На другому етапі проводяться дослідження статичних характеристик кінетики на лабораторній установці без обмеження росту мікроорганізмів за оптимальних умов протікання процесу. На цьому етапі з розгляду виключаються параметри, що несуттєво впливають на процес.

На третьому етапі досліджуються макрокінетичні закономірності процесу на пілотній установці, за умов, наближених до промислових, визначаються структура і параметри моделі, на основі яких вибирається вид функціональної

залежності даних параметрів від режимно-конструктивних параметрів БЕУ.

На четвертому етапі формується повна математична модель БЕУ, уточнюються значення параметрів і працездатність моделі.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Вважаючи метантенк апаратом ідеального перемішування, математична модель безперервного процесу анаеробного зброджування записується так:

$$\mu = \frac{\mu_{max}S}{k+S}, \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = \mu \cdot x - \frac{Q}{V}x, \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V}(S_0 - S) - \frac{\mu x}{Y_g}, \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q}{V}(T_0 - T) + G, \quad (4)$$

$$P = QY_g\mu x, \quad (5)$$

де  $\mu, \mu_{max}$  - відповідно питома і максимальна питома швидкість росту мікроорганізмів, діб;  $S_0, S$ - концентрація мікроорганізмів у вхідному і вихідному потоках, мг ХПК·л<sup>-1</sup>; k- константа насичення, мг л<sup>-1</sup>; T<sub>0</sub>, T - температура вхідного потоку і зброджуваного субстрату, °С; Q - швидкість потоку на вході в біореактор, м<sup>3</sup>-добу<sup>-1</sup>; V - об'єм біореактора, м<sup>3</sup>; G - питома швидкість внесення теплоти, °С / добу; P - продуктивність за біогазом, м<sup>3</sup>; Y<sub>g</sub> - коефіцієнт виходу біогазу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> добу<sup>-1</sup>.

У загальному вигляді критерій оптимізації при управлінні БЕУ є функцією входів, виходів, часу і може бути записаний так:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} \Phi(x, \eta, \omega, Y) dt, \quad (6)$$

де I - критерій оптимізації; Φ - векторна функція; X - вектор вхідних параметрів; η - вектор збурюючих параметрів; ω- вектор режимних параметрів; Y - вектор вихідних параметрів; t- час.

Критерієм оптимізації для розглянутої системи обробки і утилізації відходів можуть бути:

- 1) максимальна продуктивність процесу за виходом біогазу

$$I_1 = \int_{t_0}^{t_1} P_G dt; \quad (7)$$

- 2) максимальна продуктивність процесу за виходом метану

$$I_2 = \int_{t_0}^{t_1} P_m dt; \quad (8)$$

- 3) максимальна продуктивність за виходом активного мулу

$$I_3 = \int_{t_0}^{t_1} P_{am} dt; \quad (9)$$

- 4) максимальне значення коефіцієнта енергетичної ефективності

$$I_4 = \int_{t_0}^{t_1} \frac{P_G - P_m}{P_m} dt; \quad (10)$$

- 5) максимальний прибуток від БЕУ

$$I_5 = \int_{t_0}^{t_1} (\sum_{i=1}^N C_i P_i - \sum_{j=1}^M C_j X_j) dt, \quad (11)$$

де  $P_G, P_m, P_{am}$  - об'єм продукції відповідно: біогазу, метану, активного мулу;  $E_{\text{енергія}}$ , - енерговміст продукції;  $E_{\text{витрати}}$  - сумарні витрати на виробництво продукції;  $C_i$  - ціна продукції;  $C_j$  - вартість  $j$ -го ресурсу;  $X_j$  - об'єм  $j$ -го ресурсу.

У всіх вищенаведених критеріях найбільш узагальнюючим є прибуток, який відображає практично всі грані діяльності виробництва. Тобто завдання управління БЕУ може формулюватися як максимізація прибутку при обмеженнях на якість продукції та питомі витрати енергоресурсів, матеріалів і сировини:

$$\Pi \rightarrow \max; A \in A^*; B \in B^*; K_i \leq K_i^*; i = 1, m, \quad (12)$$

де  $A, A^*$  - якісний склад біогазу фактичний і заданий;  $B, B^*$  - якісний склад ефлюента на виході з БЕУ фактичний і заданий;  $K_i, K_i^*$  - питомі витрати енергоресурсів і матеріалів фактичні і задані.

Враховуючи, що прибуток пропорційний об'єму випущеної продукції за критерій управління БЕУ може бути прийнята продуктивність біореактора при обмеженнях на концентрацію мікроорганізмів, вологість субстрату та питомі витрати енергоресурсів:

$$P(\omega, \eta) \rightarrow \max; x \geq x^*; \omega \in \Omega_\omega; \eta \in \Omega_\eta; A = (pH, T) \in \Omega_A \quad (13)$$

Тоді завдання управління БЕУ можна сформулювати так: визначити такі

управлінські дії з області допустимих значень, які б забезпечили максимум критерію оптимізації (13) при заданих початкових умовах процесу, а також виконання обмежень на вологість субстрату та питомі витрати енергоресурсів.

У символічній формі теорії множин задача може бути формалізована у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \max\{P[\eta(t), \omega(t)] \mid F[d\omega/dt, \omega(t), u(t), K, \theta(t), t] = 0; \\ \omega(t) \in \Omega_{\omega}; u(t) \in \Omega_u; \theta(t) \in \Omega_{\theta}\} \end{aligned} \quad (14)$$

де  $F$  - вектор залежностей математичної моделі БЕУ;  $\omega(t)$  - вектор стану БЕУ;  $u(t)$  - вектор управлінської дії;  $K$  - вектор параметрів моделі;  $\theta(t)$  - вектор невизначених параметрів.

Таким чином, ми переходимо до завдання з декількома управлінськими діями. Швидкість подачі живильного субстрату, внесення теплоти, концентрація органічних речовин у субстраті, початкові умови процесу, а також режимні параметри (рН, температура субстрату) є саме тими компонентами вектора  $u$ , змінюючи які можна впливати на величину цільової функції (14).

За наявності такої великої кількості управлінських параметрів, а також дії складних зв'язків між режимними параметрами процесу пошук і реалізація оптимальних рішень при управлінні БЕУ можливі лише з використанням ЕОМ.

Рішення завдання управління БЕУ доцільно здійснювати, розбивши процес на дві частини: кусково-стаціонарну, для якої справедливий вираз  $F[d\omega/dt, \omega(t), u(t), K, \theta(t), t] = 0$  і нерівність  $\gamma(t) \geq \gamma_{\text{крит}}$ , а також нестаціонарну, для якої  $t > T_{\text{заг}} \wedge \gamma(t) < \gamma_{\text{крит}}$  де  $\gamma$  - вміст метаноутворюючого штаму мікроорганізмів,  $T_{\text{заг}}$  - загальна тривалість реалізації процесу.

Блок-схему алгоритму оптимального управління БЕУ наведено на рис. 2. Робота алгоритму в кусково-стаціонарній частині розпочинається з введення вихідних даних: вектора передісторії процесу  $\omega(t_0)$  вектора оптимальних значень режимних параметрів БЕУ  $\omega^*$ , а також навчальної таблиці  $T_{\text{навч}}$ , що складається з  $n$  стовпчиків і  $m$  рядочків, заповнених поточними значеннями

вимірювань параметрів, і яка розбита на  $l$  класів від рядка.

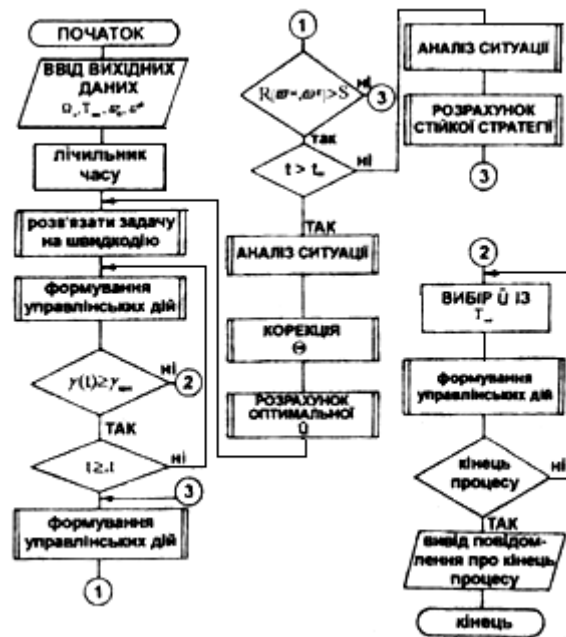


Рис. 2. Блок-схема алгоритму оптимального управління БЕУ

Потім у блоці "Розв'язок задачі на швидкодію" визначаються управлінські дії  $u \in \Omega_u$ , що мінімізують час переходу процесу із стану  $\omega(t_k + \Delta t)$  у стан  $\omega^*$ , розрахований на підготовчому етапі процесу. Після закінчення переходу блок "Формування управлінських дій" здійснює програму управління для усталеного режиму процесу за раніше розрахованим вектором оптимального управління.

Для перевірки умови переходу процесу з кусково-стаціонарної частини в нестаціонарну в алгоритм введено блок перевірки умови " $y(t) \geq y_{\text{крит}}$ ".

У ході процесу здійснюється порівняння розрахованих за моделлю  $\omega^{st}(t)$  та фактичних значень стану процесу  $\omega^{uv}(t)$  і перевіряється умова

$$R(t) = \sum_{i=1}^{N'} |\omega_i^{st}(t) - \omega_i^{uv}(t)| > S. \quad (15)$$

При досягненні часу заданого порога  $t > t_i$  запускається блок "Аналіз ситуації", введений з метою покращення збіжності алгоритму ідентифікації процесу за рахунок обмеження або звуження діапазону пошуку параметрів моделі БЕУ.

На основі аналізу ситуації та отриманих діапазонів можливої зміни корегуючих параметрів моделі БЕУ в блоці "Корекція 9" відбувається розрахунок параметрів моделі процесу  $u$ .

Розрахунок оптимальних управлінських дій для усталеного режиму в стаціонарній області процесу здійснюється блоком "Розрахунок оптимального  $u$ ". Потім запускається блок "Розв'язок задачі на швидкодію" і цикл поновлюється.

Запропонований алгоритм реалізовано в адаптивній системі управління анаеробним зброджуванням тваринницьких відходів, за допомогою якої регулюються підведення теплоти та матеріальний потік на вході в метантенк.

Система управління об'єднує процеси управління та ідентифікації і включає два етапи. На підготовчому етапі здійснюються накопичення експериментальних даних і попередня обробка інформації, а також накопичується необхідний об'єм біомаси мікроорганізмів з метою переходу до безперервного культивування. Після накопичення необхідного обсягу експериментальних даних включається ідентифікатор і синтезується модель об'єкта. В результаті визначаються початкові значення моделі, матриця та оцінка дисперсій. З надходженням наступного спостереження система управління переходить у нормальний режим функціонування, і уточнена модель об'єкта використовується для вироблення управлінських дій.

**Висновки і перспективи.** Практичне застосування запропонованих методів і алгоритмів для вирішення завдань оптимального управління анаеробним зброджуванням тваринницьких відходів комплексу з відгодівлі великої рогатої худоби у двоступеневих пілотних біоенергетичних установках показало їх ефективність і працездатність.

#### **Список літератури**

1. Новітні технології біоенергоконверсії / Я. Б. Блюм, Г. Г. Гелетука [та ін.]. – К.: Аграр Медіа Груп, 2010. – 326 с.



2. Чміль А. І. Енергетична ефективність і екологічна безпека замкнених еколого-біотехнічних систем в тваринництві / А.І. Чміль: монографія. – К.: ЦК «Компринт», 2015. – 163 с.

3. Чміль А. І. Дослідження енергетичної досконалості біотехнічних систем у тваринництві // Науковий вісник НУБіП України. – 2015. – Вип. 209, ч.2. – С. 58-63.

### References

1. Blium, Ya. B., Heletukha, H. H. [et al.] (2010). Novitni tekhnolohii bioenerhokonversii [ The latest technologies of bioenergeon conversion]. Kyiv: Ahrar Media Hrup, 326.

2. Chmil. A. I. (2015). Enerhetychna efektyvnist i ekolohichna bezpeka zamknutykh ekoloho-biotekhnichnykh system v tvarynnytstvi [Energy efficiency and ecological safety of closed ecological and biotechnical systems in animal husbandry].. Kyiv: «Komprynt», 163.

3. Chmil, A. I. (2015). Doslidzhennia enerhetychnoi doskonalosti biotekhnichnykh system u tvarynnytstvi [Research of energy perfection of biotechnical systems in animal husbandry]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy, 209 (2), 58-63.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АНАЭРОБНОГО СБРАЖИВАНИЯ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ОТХОДОВ

*А. И. Чміль*

**Аннотация.** Анаэробное сбраживание навоза в биоэнергетических установках предусматривает использование целого комплекса инженерно-технических сооружений (биореактор, газгольдер, система термостабилизации и т.д.), а также требует значительных энергетических и материальных потерь. В связи с этим актуальной есть задача оптимального управления этими сооружениями на основе математического моделирования и использования энергии ресурсосберегающих технологий.

Предложенный алгоритм реализован в адаптивной системе управления анаэробным сбраживанием животноводческих отходов, с помощью которой регулируется подвод теплоты и материальный поток на входе в метантенк.

На первом этапе построения модели осуществляется сбор, предварительная обработка информации и оценка значимости параметров БЭУ. На втором этапе проводятся исследования статических характеристик кинетики на лабораторной установке без ограничения роста микроорганизмов при оптимальных условиях протекания процесса. На этом этапе с рассмотрения исключаются параметры, что не существенно влияют на процесс.

На третьем этапе исследуются макрокинетические закономерности процесса на пилотной установке, при условиях, приближенных к промышленным, определяется структура и параметры модели, на основе которых выбирается вид функциональной зависимости данных параметров от

режимно-конструктивных параметров БЭУ.

На четвертом этапе формуется полная математическая модель БЭУ, уточняются значения параметров и работоспособность модели.

Практическое использование предложенных методов и алгоритмов для решения задач оптимального управления анаэробным сбраживанием животноводческих отходов комплекса по откорму крупного рогатого скота в двухступенчатых пилотных биоэнергетических установках показало их эффективность и работоспособность.

**Ключевые слова:** анаэробное сбраживание, энергопотери, животноводческие отходы

## OPTIMIZATION OF THE ANAEROBIC DRAGHAGE PROCESS ANIMAL WASTE

*A. Chmil*

**Abstract.** *Anaerobic fermentation of manure in bioenergy installations involves the use of a complex of engineering and technical facilities (bioreactor, gas gauge, thermal stabilization system, etc.), and also requires significant energy and material costs. In this connection, the task of optimal management of these facilities is relevant on the basis of mathematical modeling and energy use of resource-saving technologies.*

*The proposed algorithm is implemented in the adaptive control system for anaerobic digestion of livestock wastes, which regulates the supply of heat and the material flow at the entrance to the methane tank.*

*At the first stage of the model construction, the collection, pre-processing of information and evaluation of the significance of the parameters of the bioenergetic plants is carried out. At the second stage, the study of static characteristics of kinetics at a laboratory plant without limiting the growth of microorganisms under the optimal conditions for the process of the process is conducted. At this stage, the parameters that insignificantly influence the process are excluded.*

*In the third stage, the macro-kinetic regularities of the process at the pilot plant, in conditions close to the industrial one, are examined, the structure and parameters of the model are determined, on the basis of which the type of functional dependence of these parameters is chosen from the mode-constructive parameters of the bioenergetic plants.*

*At the fourth stage a complete mathematical model of the bioenergetic plants is formed, the parameters of the model and the efficiency of the model are specified.*

*The practical application of the proposed methods and algorithms for solving the problems of optimal management of anaerobic digestion of livestock waste from fattening cattle in two-stage pilot bioenergetic plants showed their efficiency and efficiency.*

**Key words:** *anaerobic digestion, energy consumption, livestock wastes*