

## МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 62.231.3.:621.313.8

**С.А. Шворов,**  
доктор технічних наук, професор,  
**П.Г. Охріменко,**  
**Д.В. Чирченко**

### МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАГРУЗКИ СИРОВИНИ В БІОРЕАКТОР ДЛЯ ОТРИМАННЯ МАКСИМАЛЬНИХ ОБ'ЄМІВ БІОГАЗУ

*Пропонується метод управління технологічним комплексом, за допомогою якого забезпечується у процесі переробки біомаси максимальний вихід біогазу. Запропоновані загальні рекурентні співвідношення динамічного програмування та схема обчислювального процесу, які необхідні для знаходження в кожному циклі функціонування біогазової установки (БГУ) оптимального управління щодо завантаження субстратом БГУ з метою отримання найбільшого об'єму біогазу при обмеженнях на вартісні витрати домішок до субстрату.*

**Ключові слова:** метод оптимального управління, технологічний комплекс, біогазова установка, система управління.

*Предлагается метод управления технологическим комплексом, с помощью которого обеспечивается в процессе переработки биомассы максимальный выход биогаза. Предложены общие рекуррентные соотношения динамического программирования и схема вычислительного процесса, которые необходимы для нахождения в каждом цикле функционирования биогазовой установки (БГУ) оптимального управления относительно загрузки субстратом БГУ с целью получения наибольшего объема биогаза и органических удобрений при ограничениях на стоимостных затрат смесей к субстрату.*

**Ключевые слова:** метод оптимального управления, технологический комплекс, биогазовая установка, система управления.

*Method of the control over a technological complex by means of which the maximum exit of biogas is provided in the course of biomass processing is offered. General recurrent ratios of the dynamic programming and the scheme of computing process which are necessary for the stay in each cycle of functioning of biogas installation of the optimum control concerning loading by BGU substratum for the purpose of receiving the greatest volume of biogas and organic fertilizers at the restrictions on cost expenses of the mixes to a substratum are offered.*

**Keywords:** method of optimum control, technological complex, biogas installation, control system.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності функціонування біогазових установок є розробка спеціальної системи оптимального управління щодо

завантаження субстратом біогазової установки (БГУ) та створення необхідних умов для отримання максимального об'єму біогазу. При вартісних обмеженнях на витрати різних видів вхідного субстрату в БГУ постає необхідність у розробці та використанні системи управління (СУ) БГУ. Ефективність функціонування такої системи значною мірою залежить від якості управління технологічним комплексом переробки різних видів вхідного субстрату (біомаси).

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що управління БГУ відбувається на основі особистого досвіду оператора. У цьому випадку неоптимальне керування процесом завантаження субстрату БГУ призводить до нераціонального її використання [1–3]. Перспективним напрямком усунення зазначеного недоліку є розробка та використання в математичному забезпеченні СУ методу оптимального управління БГУ.

Для забезпечення вискоелективного процесу з переробки біомаси в біогаз запропонована така технологічна лінія (рис. 1) [1]. Технологію виробництва біогазу можна представити у багатокроковій послідовності окремих стадій і робочих операцій. Отриманий біогаз закачується у газотранспортну систему або використовується як сировина для когенераційної установки з виробництва електроенергії та тепла. В БГУ охоплюється весь цикл операцій – від прийому оптимальних об'ємів різного виду вхідної сировини і до одержання готової продукції – біогазу та його похідних.

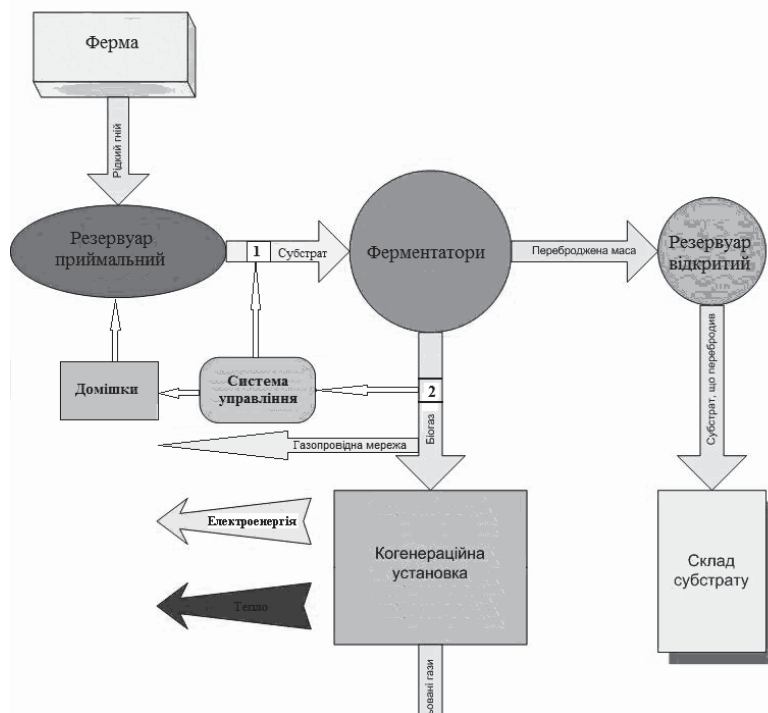


Рис. 1. Схема лінії по переробці біомаси в біогаз

Біомаса з ферм доставляється на комплекс для подрібнення довговолокнутих включень і подається в приймальний резервуар, де відбувається нагрівання біомаси,

її окислювання, змішування та розчинення в ній мінеральних добавок (домішок). При цьому до резервуару додаються оптимальні об'єми різних видів енергетичних культур та спеціальних домішок для підвищення ефективності бродіння. Завантажений субстрат підігрівається за допомогою теплообмінника до температури 25°C і може окислятися до 5 діб [1]. У процесі підігрівання відбувається перемішування субстрату за рахунок роботи мішалки. Подача біомаси у ферментатори відбувається по субстратопроводу за рахунок насоса-дозатора 1, яким керує система управління БГУ.

Період перебування сировини у ферментаторі становить 25–30 діб при фіксованій для мікроорганізмів температурі 37–42°C. У ферментаторах для захисту реактора від підвищеного тиску обов'язково передбачається запобіжний клапан.

Перемішування біомаси в середині реактора здійснюється спеціальними насосами або похилими міксерями, а підігрів відбувається за рахунок циркулювання теплої води в теплообміннику. БГУ може бути укомплектована когенераційною установкою. При цьому витрати теплової і електричної енергії на потреби самої установки складають від 5 до 15 % всієї енергії, яку дає БГУ.

Від газгольдера через очисну колону спеціальним компресором відбувається подача біогазу на когенераційну установку або в газотранспортну систему. Поброджена маса з ферментаторів за допомогою спеціальних насосів подається до відкритого резервуару для подальшого вивозу на поля або на продаж.

Для субстратів із швидким розщепленням, які через це мають схильність до окислення, рекомендується для гідролізу та окислення передбачити окремий резервуар, щоб з нього продукти розкладання дозовано подавати у ферментатор (двоступенева технологія). Перевагою такої технології є створення оптимальних умов життєдіяльності бактерій (в першу чергу, через необхідний рівень рН) і досягнення більшого виробництва біогазу. Крім того, при такій технології не використані гази можна відокремлювати через біофільтр, отримуючи, таким чином, лише газ з високим вмістом метану.

Бактерії для формування своїх клітин вимагають поживних речовин, вітамінів, розчинних сполук азоту, мінеральних речовин і мікроелементів. Ці речовини в потрібній кількості є в рідкому і твердому гної. Достатня їх кількість є також в сні, кукурудзі (свіжій або консервованій), залишках їжі, відходах кухні, нутрощах тварин, барді та молочних продуктах – всі ці продукти можуть бродити в чистому вигляді без додавання інших субстратів. Для кожного виду субстрату або суміші субстратів необхідно за допомогою СУ проводити розрахунок оптимальних співвідношень речовин.

Щоб зробити процес утворення метану стійкішим, доцільно окислення провести за межами основного реактора в окремому реакторі окислення, де буде відбуватися безпосередньо розведення початкової органічної біомаси, підігрів її до температури початку перебігу процесу збродження, а також розчинення оптимальної кількості мінеральних добавок для підвищення якості біологічних органічних добрив.

Для вибору розмірів і конструкції реактора вирішальну роль відіграють такі чинники: оптимальні об'єми різних видів біомаси при заповненні, ступінь бродіння субстрату як функція від концентрації сухих речовин, завантаження робочого простору БГУ, часовий цикл бродіння та інтенсивність перемішування, система виробництва, рівень механізації і автоматизації.

Температура сировини в реакторі повинна підтримуватися на рівні, оптимальному для функціонування відповідних анаеробних бактерій.

Для безперебійного функціонування БГУ необхідна система управління, яка контролює всі параметри і підтримує задану температуру і режим роботи ферментатора та інтенсивність реакції. Робота системи управління базується на інформації, що отримується декількома датчиками: датчиком об'ємів вхідної сировини, датчиком температури сировини в реакторі, датчиками рівня сировини в реакторі та датчиком виходу біогазу. На основі цієї інформації, а також по сигналах таймера блок автоматики вмикає і вимикає систему підігріву та систему перемішування. Крім того, СУ забезпечує оптимальне співвідношення різних видів вхідної сировини (гній, енергетична сировина та спеціальні види домішок) для отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив при заданій вартості вхідної біомаси та домішок.

У загальному випадку постановка задачі побудови СУ зводиться до наступного: необхідно знайти з множини можливих варіантів ( $X$ ) такий варіант побудови СУ ( $x$ ), при якому забезпечується отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив при заданій вартості вхідного субстрату ( $C$ ). При цьому передбачається, що управління БГУ становить керований  $N$ -етапний динамічний процес, який на кожному ( $n$ -му) етапі характеризується двома видами параметрів: параметрами керування  $m_n$  (об'ємом завантаження  $n$ -го виду біомаси та домішок) і параметрами стану  $G_n(m)$  (об'ємом отриманого біогазу та добрив на  $n$ -му етапі функціонування БГУ) [4–6]. У вигляді обмежень виступає вартість вхідного субстрату ( $C$ ).

Кінцевою метою управління БГУ ( $W_N$ ) є отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив.

Загалом задача оптимального управління щодо завантаження БГУ різними видами сировини може бути подана таким чином.

Знайти

$$\max W_N = \sum_{n=1}^N G_n(m_n) \quad (1)$$

при

$$C_N \leq C, \quad (2)$$

де  $C_N$  – сумарні вартісні витрати кожного виду сировини протягом  $N$  етапів функціонування БГУ.

З урахуванням дискретного опису процесу планування витрат різних видів сировини цільова функція ефективності функціонування БГУ ( $W_N$ ) може бути подана сумою

$$W_N = \sum_{n=1}^N G_n(m_n), \quad (3)$$

де  $G_n(m_n)$  – об'єм отриманого біогазу та добрив на  $n$ -му етапі функціонування БГУ;

$m_n$  – об'єм завантаження БГУ  $n$ -м видом сировини;

$N$  – загальна кількість видів сировини.

Таким чином, необхідно знайти такі об'єми різних видів сировини на кожному етапі функціонування БГУ, щоб максимізувати цільову функцію (3) при таких обмеженнях:

$$\left. \begin{array}{l} \text{a) } m_n = 0, 1, 2, \dots, \\ \text{b) } \sum_{n=1}^N c_n m_n \leq C, \end{array} \right\} \quad (4)$$

де  $c_n$  – вартість  $n$ -го виду сировини.

Для знаходження оптимальних значень  $\{m_n\}$  скористуємося методом динамічного програмування [5; 6].

Позначимо

$$\max_{m_1, \dots, m_r} \sum_{n=1}^r G_n(m_n), \quad (5)$$

при умові

$$\sum_{n=1}^r c_n m_n \leq \xi, \quad (6)$$

через  $\Lambda_r(\xi)$ .

Після нескладних перетворень переходимо до наступного рекурентного співвідношення динамічного програмування

$$\Lambda_r(\xi) = \max_{m_r} \{G_r(m_r) + \Lambda_{r-1}(\xi - t_r m_r)\} \quad (r = 1, \dots, N), \quad (7)$$

при умові

$$0 \leq m_r \leq \frac{\xi}{c_r}. \quad (8)$$

Характерним для динамічного програмування є визначений методичний захід, а саме: процес управління БГУ поділяється на  $N$  етапів і здійснюється послідовна оптимізація кожного з них. На кожному  $r$ -му етапі з урахуванням всіх можливих припущень результатів попереднього етапу обчислюється основне рекурентне співвідношення (7) та визначається умовний оптимальний параметр керування  $m_r$  [1–3].

Прийнявши  $\xi = C$  та припустивши у (7)  $r=N$ , отримуємо таке співвідношення

$$\Lambda_N(\xi = C) = \max_{m_N} \{G_N(m_N) + \Lambda_{N-1}(C - c_N m_N)\}, \quad (9)$$

при умові

$$0 \leq m_N \leq \frac{C}{c_N}.$$

Знайшовши з (9) оптимальне значення  $m_{Nopt}$  та припустивши  $\xi_1 = C - c_N m_{Nopt}(N)$ , послідовно, починаючи з  $(N-1)$ -го етапу, знаходяться оптимальні значення решти змінних:  $m_{N-1}, m_{N-2}, \dots, m_1$ . Необхідно зазначити, що метод динамічного програмування – це направлений послідовний перебір варіантів, що обов'язково призводить до глобального максимуму й оптимального вирішення задачі (1).

Оптимальне завантаження різними видами сировини БГУ та перенесення процесу окислення з реактора бродіння в реактор окислення має значні переваги і дозволяє: отримати максимальний вихід біогазу з вищим вмістом метану (близько 70 %); отримати біологічні органічні добрива потрібного складу і якості; забезпечити високу стабільну і безаварійну роботу всієї системи вцілому; підвищити газовіддачу з біосировини рослинного походження (солома, трава, кормові відходи і т. д.) за рахунок розкладання целюлози; простіше здійснювати перехід на іншу сировину; підвищити питомих завантаження всієї лінії.

Таким чином, за допомогою розробленого методу на кожному етапі процесу функціонування БГУ забезпечується формування та відпрацювання оптимального набору органічної сировини з урахуванням обмежень на вартісні витрати. При цьому забезпечується досягнення максимального об'єму біогазу.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Друкований М.Ф. Вибір технологічного комплексу переробки біомаси в біогаз та органічні біологічні добрива / М.Ф. Друкований, О.С. Яремчук, В.В. Брянський // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2011. – № 8. – С. 48–53.
2. Якушко С.І. Установка комплексної переробки органічних відходів за енергозберігаючою технологією / С.І. Якушко, С.М. Яхненко // Вісник "СумДУ". – 2006. – № 12 (96) – С. 8–84.
3. Дурдыбаев С.Д. Утилизация отходов животноводства и птицеводства / С.Д. Дурдыбаев, В.С. Данилкин, В.П. Рязанцев. – М. : Агропромформ, 1989. – 53 с.
4. Растринин Л.А. Обучающие системы / Л.А. Растринин // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1993. – № 2. – С. 153–163.
5. Зайченко Ю.П. Исследование операций : учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд., перераб и доп. / Ю.П. Зайченко. – К. : Высшая школа, 1979. – 392 с.
6. Зайченко Ю.П. Исследование операций : сборник задач. – 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.П. Зайченко, С.А. Шумілова. – К. : Высшая школа, 1990. – 239 с.

Отримано 30.01.2014