

УДК 519.68

С.А.Шворов, докт.техн.наук, **О.М.Юрченко**, докт.техн.наук, **Д.С.Комарчук**, канд.техн.наук,
П.Г.Охріменко (Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ)

Метод оптимального дозування вхідних субстратів та спеціальних домішок для біогазових установок

Запропоновано метод оптимального планування щодо завантаження вхідних субстратів та спеціальних домішок з метою отримання максимальних об'ємів біогазу. Запропоновані загальні рекурентні співвідношення динамічного програмування та схема обчислювального процесу, які необхідні для знаходження в кожному циклі функціонування біогазової установки (БГУ) оптимального керування завантаженням певної рецептури субстрату в БГУ з метою отримання найбільшого об'єму біогазу при мінімізації витрат.

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

Предложен метод оптимального планирования по загрузке входных субстратов и специальных добавок в биогазовую установку (БГУ) с целью получения максимальных объемов биогаза. Предложены общие рекуррентные соотношения динамического программирования и схема вычислительного процесса, которые необходимы для нахождения в каждом цикле функционирования биогазовой установки оптимального управления по загрузке субстратом БГУ с целью получения наибольшего объема биогаза при ограничениях на стоимостные затраты примесей и временные затраты метанового брожения.

Ключевые слова: метод оптимальной дозировки, технологический комплекс, биогазовая установка, система управления.

Вступ. Серед альтернативних джерел енергії все більшого значення набуває виробництво енергоносіїв із біомаси, що стає одним із найважливіших пріоритетів при вирішенні енергетичних, економічних та екологічних проблем і має глобальну перспективу для подальшого розвитку [1].

Для України загальнодержавним завданням є підвищення виробництва біометану та його введення до газотранспортної системи за "зеленим" тарифом. На вітчизняному ринку такі технології мають велику перспективу, тому що в будь-якій точці України є газові мережі, до яких можна приєднати БГУ. При цьому для отримання біометану планується не тільки використання органічних відходів із ферм, а й вирощування, збір та переробка в біогазових комплексах спеціальних енергетичних культур (ЕК) сільгоспугідь, соломи, стебла тощо. В Україні надлишок соломи та стебел усіх культур становить приблизно 20 млн т [2].

Одним із перспективних напрямків підвищення ефективності функціонування біогазових установок є розробка спеціальної системи оптимального керування завантаженням субстрату в БГУ і створення необхідних умов для отримання максимального об'єму біогазу та органічних

добрих. При часових та вартісних обмеженнях на переробку різних видів субстрату в БГУ виникає необхідність у дослідженні та обґрунтуванні режимів дозування вхідних субстратів і спеціальних домішок для отримання максимальних об'ємів біогазу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що дозування вхідних субстратів і спеціальних домішок для БГУ відбувається на основі особистого досвіду оператора. У даному випадку неоптимальне керування процесом завантаження субстрату в БГУ призводить до нерационального її використання [1, 2]. Перспективним напрямком усунення зазначеного недоліку є розробка та використання системи керування завантаженням БГУ зі спеціальним методом оптимального дозування вхідних субстратів та домішок.

Метою дослідження є розробка методу оптимального дозування вхідних субстратів і спеціальних домішок для отримання максимальних об'ємів біогазу.

Виклад основного матеріалу. Якщо у якості вхідної сировини застосовується солома, то, як відомо, вона важко піддається анаеробному

бродінню, оскільки містить міцний лігніноцелюлозний комплекс. Наприклад, солома пшениці містить високий вміст лігніну, функція якого полягає в забезпеченні структурної опори та захисту від мікробних уражень. Лігнін тісно пов'язаний із целюлозою та геміцелюлозою і робить їх недоступними для мікробної деградації. Таким чином, є відмінність між повним органічним вмістом біомаси, яка теоретично може бути перетворена в біогаз, і кількістю, яка фактично переробляється мікроорганізмами [2]. Тому виникає необхідність у попередній термічній ультразвуковій обробці (розігрів до 70°C) із застосуванням спеціальних хімічних домішок або у використанні хімічної обробки в поєднанні з екструзією, що забезпечує руйнування кристалічної структури целюлози і геміцелюлози та видалення лігніну.

Розглянемо метод перетворення соломи в біогаз із застосуванням хімічних засобів, а саме – перемішування соломи з розчином $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в поєднанні з екструзією.

Технологію виробництва біогазу та органічних біодобрив можна представити у багатокроковій послідовності окремих стадій і робочих операцій. В БГУ охоплюється весь цикл операцій – від прийому оптимальних об'ємів різного виду вхідної сировини (соломи та розчину $\text{Ca}(\text{OH})_2$) і до одержання готової продукції – біогазу та добрив. При цьому передбачається, що процес переробки вхідної сировини являє собою керований N -етапний динамічний процес, який на кожному (n -му) етапі характеризується двома видами параметрів: параметрами керування m_n (об'ємом різного виду вхідної сировини) і параметрами стану $G_n(m_n)$ (об'ємом отриманого біогазу на n -му етапі) [3]. У вигляді обмежень виступає сумарний ресурс часу функціонування БГУ (T) та витрат (C), що виділяється на вхідну сировину.

Кінцевою метою функціонування БГУ (W_N) є отримання максимальних об'ємів біогазу.

Загалом задача оптимального дозування різних видів вхідної сировини може бути подана наступним чином.

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

$$\text{при } T_N \leq T; \quad C_N \leq C, \quad (2)$$

де T_N – використаний час протягом N етапів функціонування БГУ; C_N – витрати на N етапах функціонування БГУ.

Таким чином, необхідно знайти такі об'єми різних видів вхідної сировини m_n на кожному етапі, щоб максимізувати цільову функцію (1) при наступних обмеженнях:

$$\left. \begin{aligned} a) \quad m_n = 0, 1, 2, \dots, \\ б) \quad \sum_{n=1}^N t_n m_n \leq T, \\ в) \quad \sum_{n=1}^N c_n m_n \leq C, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де t_n – час анаеробного бродіння на n -му етапі функціонування БГУ; c_n – вартісні витрати вхідної сировини, що завантажується на n -му етапі.

Для знаходження оптимальних значень m_n скористаємося методом динамічного програмування [4, 5].

Оскільки в задачі є два види ресурсів T та C , тому необхідно ввести два параметри станів ξ_T та ξ_C .

$$\text{Позначимо } \max_{m_1, \dots, m_k} \sum_{n=1}^k G_n(m_n)$$

при умові:

$$\sum_{n=1}^k t_n m_n \leq \xi_T; \quad \sum_{n=1}^k c_n m_n \leq \xi_C; \quad m_n \geq 0, \quad n = 1, \dots, k$$

через $A_k(\xi_T; \xi_C)$.

Після нескладних перетворень приходимо до наступного основного рекурентного співвідношення динамічного програмування:

$$A_k(\xi_T, \xi_C) = \max_{0 \leq m_k \leq \delta_k} [G_k(m_k) + A_{k-1}(\xi_T - t_k m_k; \xi_C - c_k m_k)],$$

$$\text{де } \delta_k = \min \left\{ \left\lfloor \frac{\xi_T}{t_k} \right\rfloor; \left\lfloor \frac{\xi_C}{c_k} \right\rfloor \right\}.$$

Одночасно з $A_k(\xi_T; \xi_C)$ знаходимо оптимальний розв'язок $m_k^o(\xi_T; \xi_C)$. На N -му етапі визначаємо $A_N(T; C)$ та одночасно $m_N^o(T; C)$.

Найбільш вагомою перешкодою у розв'язанні цієї задачі є велика її розмірність. Тому з метою зниження розмірності від задачі (1) перейдемо до задачі з одним обмеженням:

$$\max W_1 = \max_{\{m_n\}} \sum_{n=1}^N G_n(m_n) - \lambda \sum_{n=1}^N c_n m_n \quad (4)$$

при умові: $\sum_{n=1}^N t_n m_n = T; m_n \geq 0,$

де λ – множник Лагранжа [2].

Використання методу Лагранжа дозволяє зменшити розмірність, і тому задача (4) простіша від початкової.

Априорі величина λ невідома, і тому задачу (4) доводиться розв'язувати при декількох довільних значеннях λ . Оптимальний розв'язок задачі (4) буде залежати від λ :

$$m_{n\text{opt}} = m_n^o(\lambda), \quad n = 1, \dots, N.$$

Якщо знайдений розв'язок $m_n^o(\lambda)$ відповідає обмеженню (3в), то він є шуканим розв'язком задачі (1). В іншому випадку значення λ треба коригувати. Зокрема, якщо з'ясується, що $\sum_{n=1}^N c_n m_n^o(\lambda) > C$, то необхідно збільшувати λ .

Для швидкого визначення λ може бути застосований метод послідовних наближень [4]. Якщо для значень λ_1, λ_2 знайдені оптимальні розв'язки $m_1^o(\lambda_1), m_2^o(\lambda_2)$, то на наступному кроці отримуємо λ_3 з формули:

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{h_2 - h_1} (C - h_1) + \lambda_1,$$

де $h_2 = \sum_{n=1}^N c_n m_n^o(\lambda_2); h_1 = \sum_{n=1}^N c_n m_n^o(\lambda_1)$.

Оскільки в задачі (4) розглядається один вид ресурсу C , тому необхідно ввести один параметр стану ξ_C .

Позначимо $\max_{m_1, \dots, m_k} \sum_{n=1}^k G_n(m_n)$

при умові: $\sum_{n=1}^k t_n m_n \leq \xi_T; m_n \geq 0, n = 1, \dots, k$

через $A_k(\xi_C)$.

Тоді основне рекурентне співвідношення динамічного програмування має наступний вигляд:

$$A_k(\xi_C) = \max_{m_k} [G_k(m_k) - \lambda c_k m_k + A_{k-1}(\xi_C - c_k m_k)].$$

Необхідно відзначити, що метод динамічного програмування являє собою направлений послідовний перебір варіантів, що обов'язково приводить до глобального максимуму й оптимального розв'язання задачі (1).

У процесі функціонування БГУ за допомогою вищезазначеного методу для кожного етапу визначаються оптимальні значення m_n^o , тобто знаходяться оптимальні об'єми вхідної сировини, необхідні для досягнення кінцевої мети (W_N).

Для визначення інтенсивності метанового бродіння соломи (у вигляді пелет пшениці) проводилась її обробка розчином $\text{Ca}(\text{OH})_2$ різної концентрації (50 кг CaO /т соломи; 100 кг CaO /т соломи; 150 кг CaO /т соломи) на основі замочування в розчині $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (перед екструзією, під час екструзії та після екструзії). Замочування проводилося протягом 5 хв при температурі $+20^\circ\text{C}$ (таблиця 1) [2].

Таблиця 1

№ з/п	Способи обробки соломи	Коефіцієнт кореляції R	Маса CaO /т соломи	7 доба	14 доба	21 доба	28 доба	35 доба
1	Пелети екструдованої соломи пшениці	0,95070	0	178	186	229	235	245
2	Пелети екструдованої соломи з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ до екструзії	0,85078	50	193	259	293	293	293
3	Пелети екструдованої соломи з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ до екструзії	0,71443	100	255	326	327	327	327
4	Пелети екструдованої соломи з	0,80975	150	246	303	303	303	317

№ з/п	Способи обробки соломи	Коефіцієнт кореляції R	Маса СаО/т соломи	7 доба	14 доба	21 доба	28 доба	35 доба
	Са(ОН) ₂ до екструзії							
5	Пелети екструдованої соломи з Са(ОН) ₂ під час екструзії	0,82375	50	251	355	355	377	377
6	Пелети екструдованої соломи з Са(ОН) ₂ під час екструзії	0,72067	100	291	393	393	395	395
7	Пелети екструдованої соломи з Са(ОН) ₂ під час екструзії	0,92982	150	284	352	360	399	399
8	Пелети екструдованої соломи з Са(ОН) ₂ після екструзії	0,94972	50	235	263	311	330	330
9	Пелети екструдованої соломи з Са(ОН) ₂ після екструзії	0,75039	100	283	337	342	342	342
10	Пелети екструдованої соломи з Са(ОН) ₂ після екструзії	0,84641	150	209	302	315	331	331

Результати досліджень показують, що попередня обробка соломи пшениці розчином різної концентрації Са(ОН)₂ підвищує доступність гідролітичних ферментів до полімерних вуглеводів, що приводить до розщеплення лігніноцелюлози і збільшення виходу біогазу [2]. При цьому максимальний вихід біогазу відбувається при наступному дозуванні розчину Са(ОН)₂: 100 кг СаО/т соломи під час екструзії. Також вихід біогазу збільшується на 20-30% при оптимальному дозуванні спеціальних домішок типу ВТ-10Х8 [6].

Висновки. Таким чином, при використанні розробленого методу оптимального дозування вхідних субстратів і спеціальних домішок для промислових біогазових установок забезпечується максимальний вихід біогазу при обмеженнях на часові та вартісні витрати.

1. *Павліський В.М.* Техніко-економічне обґрунтування вибору технологій та сільськогосподарських культур

для виробництва біооплів / В.М. Павліський, Ю.П. Нагірний, О.В. Павліська [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://elibrary.nubip.edu.ua/5684/1/10nup.pdf>.

2. *Фльонц І.В.* Попередня обробка екструдованої соломи пшениці розчином Са(ОН)₂ з метою підвищення виходу біогазу/ І.В. Фльонц, С.М. Підховна, Н.М. Голяш // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія "Техніка та енергетика АПК". – 2014. – Вип. 194. – Ч. 1. – С. 236–242.

3. *Эдер Б.* Биогазовые установки. Практическое пособие / Эдер Б., Шульц Х. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.zorg-biogas.com>.

4. *Зайченко Ю.П.* Исследование операций: Учеб. Пособие для студентов вузов. – 2-е изд., перераб и доп. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 392 с.

5. *Зайченко Ю.П.* Исследование операций: Сборник задач. – 2-е изд., перераб. и доп. / Зайченко Ю.П., Шумілова С.А. – К.: Вища школа, 1990. – 239 с.

6. *Шворов С.А.* Система керування процесом завантаження біомаси та спеціальних домішок в біореактор для отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив / С.А. Шворов, П.Г. Охріменко, Д.В. Чирченко // Енергетика і автоматика. – 2014. – № 3. – С. 155–161.