

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ
В БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ**

В умовах подорожчання енергоносіїв та погіршення екологічної ситуації значна увага приділяється альтернативним джерелам енергозабезпечення [1,2,3]. Анаеробне перероблення органічних відходів дозволяє отримати біогаз та зменшити техногенне навантаження на біосферу. Для виробництва біогазу використовують різні за конструктивними особливостями біогазові установки (БГУ). Показником ефективної роботи БГУ є продуктивність, вихід біогазу з одиниці об'єму біомаси, тривалість робочого циклу та енергетичні затрати по забезпеченню термостабілізації біоконверсії. Ці показники в основному визначають собівартість виробництва біогазу [4]. Тривалість робочого циклу БГУ для забезпечення максимального виходу біогазу з одиниці об'єму біомаси визначається за умови

$$t_{\text{р.ц.}} = f(t_3, t_{\text{п.ф.}}, t_{\text{ф}}, t_{\text{в}}) \rightarrow t_{\text{min}}, \quad (1)$$

де t_3 – час завантаження біомаси в БГУ; $t_{\text{п.ф.}}$ – час підготовки біомаси до активної фази ферментації; $t_{\text{ф}}$ – час активної ферментації біомаси; $t_{\text{в}}$ – тривалість вивантаження відпрацьованої біомаси із БГУ.

Суттєва частина тривалості робочого циклу БГУ (80–90%) становить період активної ферментації біомаси, що визначається режимом анаеробного бродіння, кількісним та якісним вмістом в субстраті органічної речовини, енергетичними затратами по забезпеченню термостабілізації процесу анаеробного бродіння [5]. Основними напрямками оптимізації періоду активної ферментації біомаси є інтенсифікація та термостабілізація технологічного процесу виробництва біогазу.

Анаеробний процес, який проходить в БГУ, споживає певну кількість енергії: теплової енергії – для підтримання термостабільності в реакторі та попереднього нагріву субстрату до температури зброджування; механічної енергії – для здійснення перемішування середовища в ємкостях і переміщення матеріальних потоків субстрату [4]. Експлуатація БГУ вимагає забезпечення стабільного температурного режиму за

різних умов навколишнього середовища. Коливання температур субстрату всередині БГУ не повинно перевищувати сприятливих для метанової ферментації бактерій меж. В зв'язку з цим доцільним є дослідження тепломасообмінних процесів в БГУ при різних режимах: кріофільному, мезофільному та термофільному [6], результати яких будуть підґрунтям для оптимізації параметрів технологічного процесу ферментації біомаси.

Метою даного дослідження є розроблення математичної моделі масообмінних процесів і теплового балансу технологічного процесу біоконверсії в БГУ.

Технологія метанового бродіння в БГУ вимагає дотримання меж температурних режимів, термостабілізації процесу, інтенсифікації теплообміну між нагрівником і субстратом. Схему тепломасообмінних процесів в біогазовій установці наведено на рис. 1.

Рівняння масообмінних процесів в БГУ описується формулою:

$$m_{\text{СУБ}} = m'_{\text{СУБ}} - m_{\text{Г}}, \quad (2)$$

де $m_{\text{СУБ}}$ – маса субстрату, який завантажується в БГУ, кг; $m'_{\text{СУБ}}$ – маса субстрату після перероблення його в біогазовій установці, кг; $m_{\text{Г}}$ – маса газу, який утворився із субстрату внаслідок анаеробного бродіння, кг.

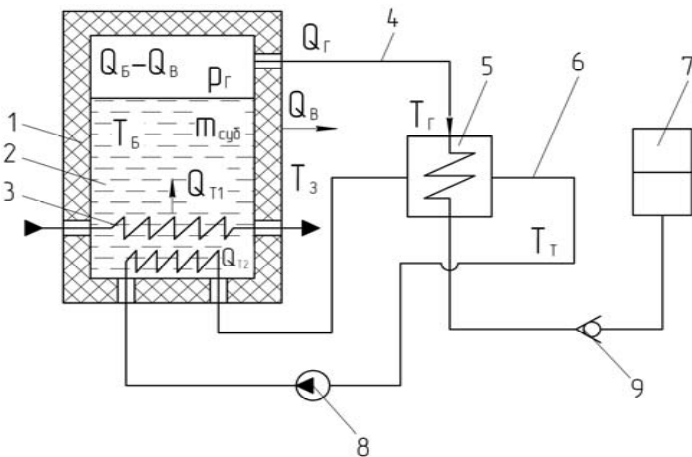


Рис. 1. Схема до моделювання тепломасообмінних процесів:

- 1 – теплоізоляційний корпус; 2 – субстрат; 3 – нагрівник; 4 – газопровід; 5 – утилізаційний теплообмінник; 6 – магістраль рециркуляції вторинного теплоносія;
- 7 – резервуар накопичення біогазу; 8 – нагнітач теплоносія; 9 – запобіжний клапан.

Враховуючи питому вагу складових інгредієнтів в БГУ, рівняння (2) матиме вигляд:

$$V_T \rho_T + V_P \rho_P = \rho_T \frac{dV_T}{dt} + \rho_P \frac{dV_P}{dt} + V_G \rho_G, \quad (3)$$

де V_T – об'єм твердої фази субстрату на вході в БГУ, м³; V_P – об'єм рідкої фази субстрату на вході в біогазову установку, м³; V_G – об'єм газу, який утворюється внаслідок анаеробного бродіння субстрату, м³; ρ_T – густина твердої фази субстрату, кг/м³; ρ_P – густина рідкої фази субстрату, кг/м³; ρ_G – густина біогазової суміші, кг/м³.

Вирази $\rho_T \frac{dV_T}{dt}$ та $\rho_C \frac{dV_C}{dt}$ характеризують зміну мас твердої та рідкої речовини субстрату після її перероблення в БГУ.

Тепловий режим в біогазовій установці значною мірою залежить від теплоізоляційних властивостей зовнішніх огорожень БГУ, додаткової енергії, яка надходить в біогазову установку для забезпечення термостабілізації, а також від режиму анаеробного бродіння, для підтримання якого повинен дотримуватись тепловий баланс втрат та надходжень теплоти.

Рівняння теплового балансу біогазової установки описується залежністю

$$(Q_B - Q_V) = \alpha_T F_B (T_B - T_3) + m_B c_m \cdot \frac{d}{dt} (T_B - T_3) + Q_T - Q_G, \quad (4)$$

де Q_B – теплота, що надходить до внутрішнього середовища БГУ, Дж/с; Q_V – теплота, що відводиться від внутрішнього середовища біогазової установки, Дж/с; $(Q_B - Q_V)$ – теплота, що передається внутрішнім середовищем БГУ для забезпечення робочого процесу, Дж/с; α_T – загальний коефіцієнт теплопередачі через корпус та теплозахисні конструкції БГУ, Дж/м²/с/°C; F_B – площа зовнішньої поверхні корпусу біогазової установки, м²; T_B – температура внутрішнього середовища БГУ, °C; T_3 – температура зовнішнього середовища навколо біогазової установки, °C; $\alpha_T F_B (T_B - T_3)$ – вираз, який характеризує втрати теплоти біогазової установки у зовнішнє середовище; m_B – маса субстрату, біогазової суміші та повітря в БГУ, кг; c_m – приведена питома масова

теплоємність субстрату, біогазової суміші та повітря в БГУ, Дж/кг/°С; $m_B c_m \cdot \frac{d}{dt}(T_B - T_3) = m_B c_m \cdot \frac{d}{dt} \Delta T$ – вираз, який описує зміну теплоти, що акумулюється в середовищі біогазової установки; ΔT – поточна різниця температур під час анаеробного бродіння; $Q_T = Q_{T1} + Q_{T2}$ – додаткова загальна теплота, яка надходить в установку для термостабілізації субстрату (де Q_{T1} і Q_{T2} – теплота, що поступає, відповідно, від основного нагрівача та від утилізаційного теплообмінника 5), Дж; Q_G – теплота біогазової суміші, що відводиться з біогазової установки, Дж/кг/°С.

На інтенсивність процесу зброджування і, як наслідок, утворення біогазу впливає такий фактор як тиск. Підвищення тиску в БГУ впливає двозначно. З одного боку, підвищення загального тиску і парціального тиску діоксиду вуглецю є сприятливою умовою для одержання біогазу. З іншого боку, підвищення тиску веде до зростання розчинності метану у воді, що гальмує його вихід у газову фазу [6]. Тому більшість БГУ працюють при тиску, що незначно перевищує атмосферний.

Процес переміщення газової суміші із біогазової установки в акумулюючу порожнину можна представити у вигляді рівняння [7]:

$$-kRT_G dm_G = k p_G dV_G + V_G dp_G, \quad (5)$$

де k – показник адіабати ($k = 1,4$); R – питома газова стала, Дж/(кг · °С); T_G – температура газової суміші, яка виділилась всередині БГУ, °С; dm_G – зміна маси газової суміші внаслідок перероблення субстрату в БГУ; p_G – поточний тиск газової суміші у камері, Па.

Для визначення зміни тиску у резервуарі накопичення біогазової суміші 7 (рис. 1) перетворимо рівняння (5) шляхом підстановки значення

$$dm_G = G_G dt, \quad (6)$$

в якому масова витрата газової суміші G_G визначається як

$$G_G = f_{кл.еф.} \frac{K p_G}{\sqrt{RT_G}} \varphi(\sigma_G), \quad (7)$$

де $K = \sqrt{\frac{2k}{k-1}}$; $\varphi(\sigma_G)$ – коефіцієнт витрат; $f_{кл.еф.}$ – ефективна площа клапана в резервуарі накопичення біогазової суміші 7, яка рівна

$$f_{кл.еф.} = \mu_G f_G, \quad (8)$$

де μ_{Γ} – коефіцієнт витрати біогазової суміші; f_{Γ} – дійсна площа перерізу клапана, м².

Для адіабатного процесу витоків об'єм газової суміші, яка утворюється в БГУ та витікає з порожнини БГУ, визначається згідно рівнянь [7]:

$$dV_{\Gamma} = F_{nep} dZ, \quad (10)$$

де F_{nep} – медіальний переріз резервуару БГУ, м²; Z_0 – початкова координата зміни висоти субстрату в БГУ; Z – поточна координата зміни висоти субстрату в БГУ;

Тоді зміна тиску в резервуарі БГУ з часом характеризується рівнянням:

$$\frac{dp_{\Gamma}}{dt} = \frac{k}{Z + Z_0} \left[p_{\Gamma} \frac{dZ}{dt} - \frac{f_{кл.еф.} K p_{\Gamma}^{\frac{3k-1}{2k}} \sqrt{RT_{\Gamma}} \varphi(\sigma_{\Gamma})}{F_{nep} p_{\Gamma}^{\frac{k-1}{2k}}} \right]. \quad (11)$$

Отримана система рівнянь моделює тепломасообмінні процеси, які відбуваються при анаеробному бродінні органічного субстрату в БГУ. Сумісне рішення цих рівнянь дозволяє визначити оптимальні робочі параметри тепломасообмінних процесів в БГУ. Це є підґрунтям для вдосконалення конструктивно-технологічних рішень БГУ з метою підвищення їх продуктивності при утилізації органічних відходів.

Висновки

Наведено рівняння масообміну в БГУ, що кількісно характеризує процес анаеробного бродіння у масовому співвідношенні.

Запропоновано рівняння теплового балансу біогазової установки, що включає: теплоту, яка передається внутрішнім середовищем біогазової установки для забезпечення робочого процесу; втрати теплоти біогазової установки у зовнішнє середовище; теплоту, що акумулюється в середовищі біогазової установки; додаткову теплоту в установці від термостабілізаційного обладнання.

Представлено рівняння, яке відображає зміну тиску в резервуарі з субстратом при його зброджуванні в біогазовій установці.

Сумісне рішення рівнянь запропонованої математичної моделі дозволить визначити оптимальні робочі параметри БГУ з метою підвищення виходу біогазу з меншими затратами додаткової енергії на термостабілізацію та інтенсифікацію тепломасообмінних процесів.

Використана література

1. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Энергозбереження в системах біоконверсії. – Вінниця, ВНТУ, 2006. – 83 с.
2. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Інтенсифікація виробництва та підготовка біогазу до використання в теплотехнічному обладнанні //Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, КНУБА, К.: 2005. – №8 –с. 52–60.
3. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів // Вісник ВПІ. – 2006. – №2. – с. 26–31.
4. Ткаченко С.Й., Степанов Д.В. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 132 с.
5. Біопалива (технології, машини і обладнання) / В.О. Дубровін та інші. – К.: ЦТІ “Енергетика і електрифікація”, 2004. – 137 с.
6. Сербін В.А. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії в системах ТГВ. – Макіївка: ДонДАБА, 2003. – 153 с.
7. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков / В.А.Федорец, М.Н.Педченко, А.Ф.Пичко, Ю.В.Пересадько, В.С.Лысенко; Под ред. В.А.Федорца. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 375 с.