

Для виробництва біогазу використовують різні за конструктивними особливостями біогазові установки (БГУ) [1, 2, 3]. Показниками 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. Тривалість робочого циклу БГУ для забезпечення максимального виходу біогазу з одиниці об'єму біомаси визначається за умови

$$t_{p.ц.} = f(t_3, t_{n.ф.}, t_{ф.}, t_{в.}) \rightarrow t_{min} \quad (1)$$

де t_3 – час завантаження біомаси в БГУ;

$t_{n.ф.}$ – час підготовки біомаси до активної фази ферментації;

$t_{ф.}$ – час активної ферментації біомаси;

$t_{в.}$ – 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. 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: криофільному, мезофільному та термофільному [5], результати яких стануть основою 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:

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

де $m_{СУБ}$ – маса субстрату, який завантажується в БГУ, кг;

$m'_{СУБ}$ – маса субстрату після перероблення його в біогазовій установці, кг;

$m_{Г}$ – маса газу, який утворився із субстрату внаслідок анаеробного бродіння, кг.

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 $\rho_T (dV_T/dt)$ та $\rho_P (dV_P/dt)$ 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/°С;

F_B – площа зовнішньої поверхні корпусу біогазової установки, м²;

T_B – температура внутрішнього середовища БГУ, °С;

T_3 – температура зовнішнього середовища навколо біогазової установки, °С;

$\alpha_T F_B (T_B - T_3)$ – 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 чинник, 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 [5]. Тому більшість БГУ працюють при тиску, що незначно перевищує атмосферний.

Процес переміщення газової суміші із біогазової установки в акумулюючу порожнину можна подати у вигляді рівняння:

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

де k – показник адіабати ($k=1,4$);

R – питома газова стала, Дж/(кг·°С);

T_G – температура газової суміші, яка виділилась всередині БГУ, °С;

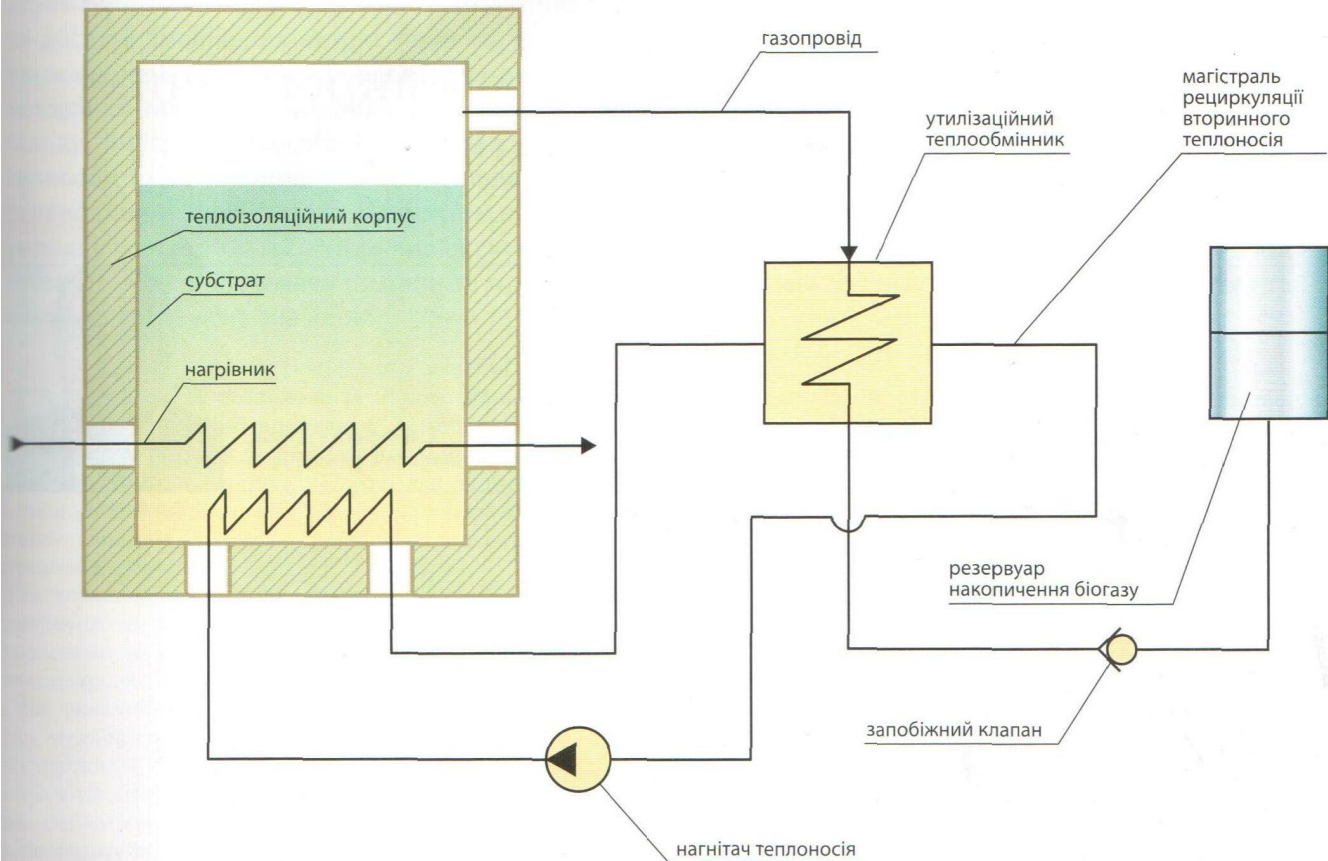


Рис. 1. Схема до моделювання тепломасообмінних процесів в БГУ.

dm_{Γ} – зміна маси газової суміші внаслідок перероблення субстрату в БГУ;

p_{Γ} – 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

$$dm_{\Gamma} = G_{\Gamma} dt \quad (6)$$

в якому масова витрата газової суміші G_{Γ} визначається як

$$G_{\Gamma} = f_{\text{кл.эф.}} \frac{K p_{\Gamma}}{\sqrt{RT_{\Gamma}}} \phi(\sigma_{\Gamma}) \quad (7)$$

$$K = (2k/(k-1))^{1/2};$$

$\phi(\sigma_{\Gamma})$ – коефіцієнт витрат;

$f_{\text{кл.эф.}}$ – ефективна площа клапана в резервуарі накопичення біогазової суміші 7, яка рівна

$$f_{\text{кл.эф.}} = \mu_{\Gamma} f_{\Gamma} \quad (8)$$

де μ_{Γ} – коефіцієнт витрати біогазової суміші;

f_{Γ} – дійсна площа перерізу клапана, м^2 .

Для адиабатного процесу витіку об'єм газової суміші, яка утворюється в БГУ та витікає з порожнини БГУ, визначається згідно з рівняннями:

$$V = F_{\text{пер}} (Z_0 + Z) \quad (9)$$

$$dV_{\Gamma} = F_{\text{пер}} dZ \quad (10)$$

де $F_{\text{пер}}$ – медіальний переріз резервуару БГУ, м^2 ;

Z_0 – початкова координата зміни висоти субстрату в БГУ;

Z – поточна координата зміни висоти субстрату в БГУ;

Зміна тиску в резервуарі БГУ з часом характеризується рівнянням:

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

Отримані рівняння масообміну в БГУ (3), теплового балансу (4) та зміни тиску (11) моделюють тепломасообмінні процеси, які відбуваються при анаеробному бродінні органічного субстрату в БГУ. Сумісне рішення цих рівнянь дозволяє визначити оптимальні робочі параметри тепломасообмінних процесів в БГУ, що є підґрунтям для вдосконалення конструктивно-технологічних рішень БГУ з метою підвищення їх продуктивності при утилізації органічних відходів.

Список літератури:

1. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. *Енергозбереження 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 ВПШ*. – 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. Сербін В. А. *Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії в системах ТТВ*. □ Макіївка: ДонДАБА, 2003. – 153 с.