

УДК 536.24+631.3

Г. С. Ратушняк, к. т. н., проф.;

К. В. Анохіна, асп.

ТЕПЛОВТРАТИ В БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ ПРИ РІЗНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМАХ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ

Запропоновано рівняння теплового балансу біогазової установки та проведено числовий експеримент його складових. Визначено, що оптимальний тепловий баланс може бути забезпечений шляхом підвищення термічного опору огорожувальних конструкцій та зменшення тепловтрат з БГУ. Встановлено залежності тепловтрат в системах біоконверсії від температур зовнішнього повітря при різних коефіцієнтах термічного опору теплопередачі.

Вступ

В зв'язку зі зменшенням запасів нафти та газу й погіршенням екологічної ситуації значна увага приділяється використанню поновлюваних джерел енергії. Так в країнах Європейського Союзу їх частка в енергоспоживанні становить 6 % , з них 16 % складає біогаз [1]. Анаеробне перероблення органіки з метою отримання біогазу відбувається при заданих температурних режимах: кріофільному, мезофільному та термофільному [2]. Ці режими з оптимальними параметрами важко підтримувати, особливо при від'ємних температурах. Термостабілізація та інтенсифікація процесу анаеробного бродіння можуть бути забезпечені шляхом зниження тепловтрат через огорожувальні конструкції біогазової установки (БГУ) [3]. Для оптимізації анаеробних процесів в БГУ необхідно розробити математичної моделі теплового балансу та визначити кількісні параметри його складових. На сьогодні актуальними є подальші наукові дослідження тепловтрат в БГУ при різних температурних режимах її роботи та температури зовнішнього середовища.

Метою дослідження є розроблення математичної моделі теплового балансу БГУ та за результатами числового експерименту встановлення величин його складових, що визначають тепловтрати при різних температурних режимах анаеробного бродіння від температурних параметрів зовнішнього середовища.

Постановка задачі дослідження

У виробництві біогазу шляхом анаеробного бродіння органіки метаболічна активність і репродуктивна здатність мікроорганізмів знаходяться в функціональній залежності від температури в БГУ. Температура впливає на об'єм газу, який можна отримати з певної кількості органічної речовини протягом заданого часу в БГУ, а також на технологічний час процесу зброджування, необхідний для вивільнення певної кількості газу за відповідної температури [4].

В залежності від температурного інтервалу, що підтримується в біогазовій установці в процесі роботи, розрізняють такі режими зброджування [2, 5]:

- кріофільний ($T < 20$ °С; $T_{\text{опт}} = 5 \dots 15$ °С);
- мезофільний ($T = 25 \dots 45$ °С; $T_{\text{опт}} = 32 \dots 42$ °С);
- термофільний ($T = 45 \dots 55$ °С; $T_{\text{опт}} = 48 \dots 51$ °С).

Кріофільний режим зброджування не вимагає спеціального підігріву субстрату, відбувається при температурі навколишнього середовища і використовується на невеликих індивідуальних установках у країнах з теплим кліматом.

Мезофільний режим зброджування, як це підтверджено численними дослідженнями і практикою експлуатації установок, відбувається найбільш інтенсивно в температурному інтервалі 32...42 °С [2, 5]. При цьому найактивніше «працюють» метаногенні бактерії з максимальним утворенням біогазу. Підігрівання і підтримання стабільної температури зброджування здійснюється, як правило, прокачуванням нагрітої води через спеціальні теплообмінники, що змонтовані в біогазовій установці. Нагріту воду отримують у котельному агрегаті, використовуючи для його роботи частину виробленого біогазу, витрати якого складають 30...40 % загального виходу.

Термофільний режим дає можливість отримувати максимальну кількість біогазу за короткий термін зброджування. Інтенсивність зброджування вдвічі вища, а час перебування в біогазовій установці вдвічі менший, ніж при мезофільному [5].

Отже, визначення складових теплового балансу БГУ та тепловтрат через огорожувальні конструкції для різних режимів зброджування в залежності від зовнішніх температур є актуальною задачею.

Основний розділ

Тепловий режим в біогазовій установці значною мірою залежить від теплоізоляційних властивостей зовнішніх огорожень. Для підтримання заданого оптимального режиму анаеробного бродіння в БГУ повинен дотримуватись тепловий баланс втрат та надходжень теплоти (рис. 1).

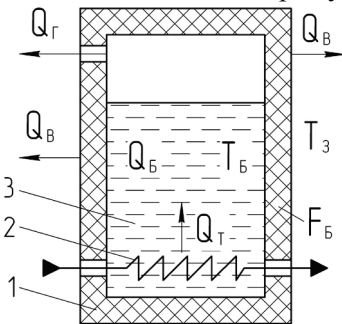


Рис. 1. Схема до визначення теплового балансу біогазової установки: 1 — теплозахисні огорожувальні конструкції; 2 — теплообмінник; 3 — органічний субстрат

Рівняння теплового балансу біогазової установки описується залежністю

$$Q_B = \alpha_T F_B (T_B - T_3) + m_B c_m \frac{d}{dt} (T_B - T_3) - Q_T + Q_G, \quad (1)$$

де Q_B — теплота, що надходить до внутрішнього середовища біогазової установки в результаті анаеробного бродіння, Вт; α_T — загальний коефіцієнт теплопередачі через корпус та теплозахисні огорожувальні конструкції БГУ, Вт/(м²·°С); F_B — площа поверхні огорожувальних конструкцій корпуса біогазової установки, м²; T_B — температура внутрішнього середовища біогазової установки, °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, Вт; m_B — маса субстрату, біогазу та газової суміші в біогазовій установці, кг; c_m — приведена питома масова теплоємність субстрату, біогазу та газової суміші в біогазовій установці, Дж/(кг·°С); $m_B c_m \frac{d}{dt} (T_B - T_3) = m_B c_m \frac{d}{dt} \Delta T$ — вираз, який описує зміну теплоти, що акумулюється в середовищі біогазової установки, Вт; ΔT — поточна зміна температур під час анаеробного бродіння, °С; Q_T — додаткова теплота в установці від термостабілізаційного обладнання, Вт; Q_G — теплота біогазу та газової суміші, що відводиться з біогазової установки, Вт.

Умови оптимізації складових рівняння теплового балансу (1) біогазової установки для забезпечення заданого процесу анаеробного бродіння наступні.

Витрати теплоти для термостабілізації потребують додаткових витрат енергоносіїв у процесі регулювання реакцій анаеробного бродіння в БГУ [6, 7]. Вони повинні бути мінімальними, тобто наближатись до нуля:

$$Q_T \rightarrow 0 \quad (2)$$

Втрати теплоти з БГУ у зовнішнє середовище також повинні бути мінімальними для забезпечення оптимального процесу бродіння та зменшення енерговитрат на процес термостабілізації

$$\alpha_T F_B (T_B - T_3) \rightarrow \min \quad (3)$$

Теплота, що акумулюється в середовищі біогазової установки, повинна набути максимального

значення у відповідному режимі зброджування для забезпечення найбільшої продуктивності БГУ:

$$m_B c_m \cdot \frac{d}{dt} \Delta T \rightarrow \max . \tag{4}$$

Одним із варіантів оптимізації складових рівняння теплового балансу (1) біогазової установки є зменшення втрат теплоти внутрішнього середовища біогазової установки у зовнішнє навколишнє середовище через теплозахисні огорожувальні конструкції корпусу установки. Ці втрати мають прямопропорційну залежність від коефіцієнту теплопередачі α_T матеріалу огорожувальних конструкцій БГУ. Для оптимізації складової теплового балансу, яка відображає втрати тепла у зовнішнє середовище, коефіцієнт теплопередачі матеріалу α_T повинен наближатись до свого мінімального значення:

$$\alpha_T \rightarrow \min . \tag{5}$$

Величина тепловтрат із внутрішнього середовища Q_B (Вт) характеризується термічним опором матеріалу огорожувальних конструкцій, різницею температур між внутрішнім і зовнішнім середовищем БГУ, та обчислюються за формулою [8]:

$$Q_B = \alpha_T (T_B - T_3) n_1 F_B \eta_n , \tag{6}$$

де $\alpha_T = \frac{1}{R}$ — коефіцієнт теплопередачі огороження БГУ, Вт/(м²·°C); R — термічний опір теплопередачі матеріалу огорожувальної конструкції та тепловіддачі з обох боків огороження, (м²·°C)/Вт; $(T_B - T_3)$ — розрахункова різниця температур між внутрішньою та зовнішньою температурами, °C; n_1 — поправочний множник, що враховує зменшення розрахункової різниці температур для огорожень біогазової установки (для даного випадку $n = 1$); F_B — площа поверхні огороження біогазової установки, м² (ведеться розрахунок для $F_B = 1$ м²); η_n — коефіцієнт, що враховує додаткові тепловтрати, які можуть помітно змінюватись від впливу сонячного випромінення, інфільтрації та ексільтрації (для визначення тепловтрат в біогазовій установці не враховуються) через його несуттєвий вплив.

Таким чином, з урахуванням наведених припущень щодо роботи БГУ, формула (6) матиме вигляд

$$Q_B = \frac{\Delta T}{R} . \tag{7}$$

Для різних теплових режимів анаеробного бродіння проведено числові експерименти з визначення тепловтрат через огорожувальні конструкції при різних зовнішніх температурних режимах за формулою (7), результати яких наведено в табл. 1—3.

Таблиця 1

Тепловтрати для кріофільного режиму зброджування ($T < 20$ °C; $T_{opt} = 5...15$ °C)

Термічний опір та режим роботи, (м ² ·°C)/Вт		Температура зовнішнього середовища $T_{зovн.}$, °C								
		20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
R = 1	$T_{opt}^{BГУ} = 10$ °C	-10,0	-5,0	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
	$T_{max}^{BГУ} = 15$ °C	-5,0	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0
R = 2	$T_{opt}^{BГУ} = 10$ °C	-5,0	-2,5	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
	$T_{max}^{BГУ} = 15$ °C	-2,5	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5
R = 3	$T_{opt}^{BГУ} = 10$ °C	-3,3	-1,6	0,0	1,7	3,3	5,0	6,7	8,3	10,0
	$T_{max}^{BГУ} = 15$ °C	-1,6	0,0	1,7	3,3	5,0	6,7	8,3	10,0	11,7
R = 4	$T_{opt}^{BГУ} = 10$ °C	-2,5	-1,2	0,0	1,3	2,5	3,8	5,0	6,3	7,5
	$T_{max}^{BГУ} = 15$ °C	-1,2	0,0	1,25	2,5	3,8	5,0	6,3	7,5	8,8

Таблиця 2

Тепловтрати для мезофільного режиму збродження ($T = 25...45\text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{онт}} = 32...42\text{ }^\circ\text{C}$)

Термічний опір та режим роботи, ($\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$)		Температура зовнішнього середовища $T_{\text{зовн}},\text{ }^\circ\text{C}$								
		20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
$R = 1$	$T_{\text{онт}}^{\text{бг}} = 32\text{ }^\circ\text{C}$	12,0	17,0	22,0	27,0	32,0	37,0	42,0	47,0	52,0
	$T_{\text{мак}}^{\text{бг}} = 45\text{ }^\circ\text{C}$	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0
$R = 2$	$T_{\text{онт}}^{\text{бг}} = 32\text{ }^\circ\text{C}$	6,0	8,5	11,0	13,5	16,0	18,5	21,0	23,5	26,0
	$T_{\text{мак}}^{\text{бг}} = 45\text{ }^\circ\text{C}$	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5
$R = 3$	$T_{\text{онт}}^{\text{бг}} = 32\text{ }^\circ\text{C}$	4,0	5,7	7,3	9,0	10,6	12,3	14,0	15,6	17,3
	$T_{\text{мак}}^{\text{бг}} = 45\text{ }^\circ\text{C}$	8,3	10,0	11,6	13,3	15,0	16,6	18,3	20,0	21,7
$R = 4$	$T_{\text{онт}}^{\text{бг}} = 32\text{ }^\circ\text{C}$	3,0	4,3	5,5	6,8	8,0	9,3	10,5	11,7	13,0
	$T_{\text{мак}}^{\text{бг}} = 45\text{ }^\circ\text{C}$	6,3	7,5	8,8	10,0	11,2	12,5	13,7	15,0	16,3

Таблиця 3

Тепловтрати для термофільного режиму збродження ($T = 45...55\text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{онт}} = 48...51\text{ }^\circ\text{C}$)

Термічний опір та режим роботи, ($\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$)		Температура зовнішнього середовища $T_{\text{зовн}},\text{ }^\circ\text{C}$								
		20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
$R = 1$	$T_{\text{онт}}^{\text{бг}} = 50\text{ }^\circ\text{C}$	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0
	$T_{\text{мак}}^{\text{бг}} = 55\text{ }^\circ\text{C}$	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0
$R = 1$	$T_{\text{онт}}^{\text{бг}} = 50\text{ }^\circ\text{C}$	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0
	$T_{\text{мак}}^{\text{бг}} = 55\text{ }^\circ\text{C}$	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5
$R = 1$	$T_{\text{онт}}^{\text{бг}} = 50\text{ }^\circ\text{C}$	10,0	11,7	13,3	15,0	16,7	18,3	20,0	21,7	23,3
	$T_{\text{мак}}^{\text{бг}} = 55\text{ }^\circ\text{C}$	11,7	13,3	15,0	16,7	18,3	20,0	21,7	23,3	25,0
$R = 4$	$T_{\text{онт}}^{\text{бг}} = 50\text{ }^\circ\text{C}$	7,5	8,8	10,0	11,3	12,5	13,8	15,0	16,3	17,5
	$T_{\text{мак}}^{\text{бг}} = 55\text{ }^\circ\text{C}$	8,8	10,0	11,3	12,5	13,8	15,0	16,3	17,5	18,8

Графічно зміни тепловтрат від зовнішніх температур для кріофільного, мезофільного та термофільного режимів збродження зображено на рис. 2—4. Також визначені зони втрат для оптимальних температурних режимів $T_{\text{онт}}$ анаеробного бродиння.

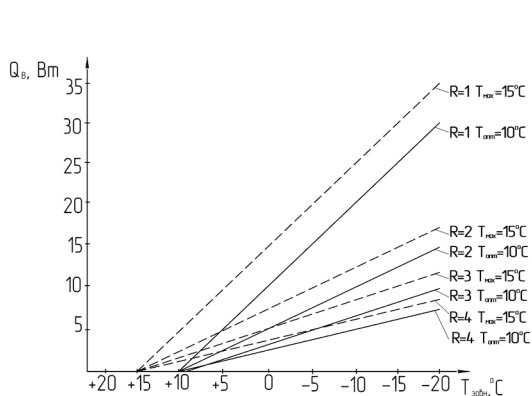


Рис. 2. Тепловтрати для кріофільного режиму

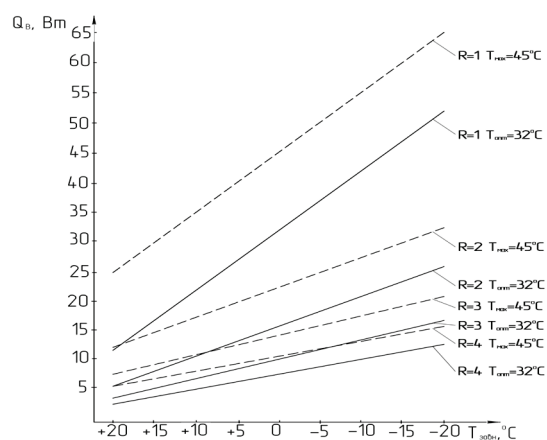
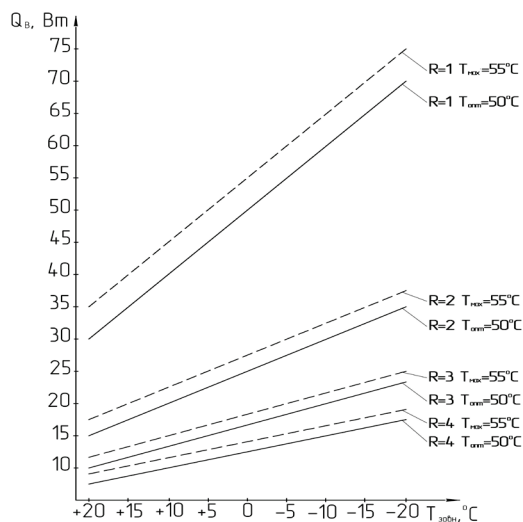


Рис. 3. Тепловтрати для мезофільного режиму



Тепловтрати в залежності від зовнішніх температур

Рис. 4. Тепловтрати для термофільного режиму

Аналіз даних числового експерименту про тепловтрати в системах біоконверсії свідчить про те, що у кріофільному режимі (рис. 2) анаеробний процес, який протікає в БГУ при від'ємних температурах та термічному опорі, рівному одиниці, є неефективним. У кріофільному режимі тепловтрати огорожувальних конструкцій БГУ досягають 20...35 Вт.

У мезофільному режимі (рис. 3) при від'ємних температурах і термічному опорі, рівному одиниці, вони досягають величини 45...65 Вт. Найсуттєвіші тепловтрати у термофільному режимі (рис. 4) при температурі $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ можуть досягати величини 75 Вт. З рис. 2—4 видно, що найменші тепловтрати досягаються з термічним опором більшим $3\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$. Це свідчить про те, що оптимальний тепловий баланс (1) може бути забезпечений шляхом підвищення термічного опору огорожувальних конструкцій та зменшення тепловтрат в БГУ.

Висновки

Запропоновано рівняння теплового балансу біогазової установки, що включає тепло, яке передається внутрішнім середовищем біогазової установки для забезпечення робочого процесу; втрати тепла біогазової установки у зовнішнє середовище; тепло, що акумулюється в середовищі біогазової установки; додаткове тепло в установці від термостабілізаційного обладнання.

Встановлені залежності тепловтрат від температур зовнішнього повітря при різних коефіцієнтах термічного опору теплопередачі: максимальними є тепловтрати при $R = 1\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$, $T_{\text{max}}^{\text{БГУ}} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$, а мінімальними — при $R = 4\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$, $T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}} = 17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки. [монографія] / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. — Вінниця: УНІВЕРСУМ—Вінниця, 2004. — 132 с.
2. Сербін В. А. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії в системах ТГВ / В. А. Сербін. — Макіївка: ДонДАБА, 2003. — 153 с.
3. Висновок про видачу деклараційного патенту на корисну модель по заявці у 2007 14164 від 17.12.2007. Біогазовий реактор / Ратушняк Г. С., Анохіна К. В., Джеджула В. В.
4. Баадер Б. Биогаз: Теория и практика; пер. с нем. и предисловие М. И. Серебряного / Б. Баадер, Е. Доне, М. Брендерфер. — М.: Колос, 1982. — 148 с.
5. Ратушняк Г. С. Энергозбереження в системах біоконверсії / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула. — Вінниця, ВНТУ, 2006. — 83 с.
6. Ратушняк Г. С. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2006. — № 2. — С. 26—31.
7. Ткаченко С. Й. Моделювання інтенсивності теплообміну до багатокомпонентних органічних сумішей / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2005. — № 6. — С. 187 — 193.
8. Теплотехника / [А. М. Архаров, С. И. Исаев, И. А. Кожин и др.]; под общ. ред. В. И. Крутова. — М.: Машиностроение, 1986. — 432 с.

Рекомендована кафедрою теплогазопостачання і вентиляції

Надійшла до редакції 29.05.08
Рекомендована опублікування 29.06.08

Ратушняк Георгій Сергійович — завідувач кафедри, **Анохіна Катерина Володимирівна** — аспірантка.
Кафедра теплогазопостачання і вентиляції, Вінницький національний технічний університет