

УДК 662.763

## **ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС МЕТАНТЕНКА БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ ВП НУБІП УКРАЇНИ «АГРОНОМІЧНА ДОСЛІДНА СТАНЦІЯ»**

**В.М. Поліщук**, канд. техн. наук,

**В.О. Дубровін**, докт. техн. наук,

**О.В. Поліщук**, здобувач\*

*Національний університет біоресурсів та природокористування України*

*За відомою методикою встановлений енергетичний баланс метантенка біогазової установки, що споруджується в ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція». Визначені потреби енергії для підтримання теплового балансу метантенка, а також корисне загальнодобове виробництво енергії.*

**Ключові слова:** метантенк, втрати тепла, коефіцієнт теплопередачі, теплообмін, біогаз, енергія, теплота згорання, субстрат, біогазова установка.

**Постановка проблеми.** До складу Національного університету біоресурсів і природокористування (НУБіП) України належать 5 дослідних господарств, одним із яких є відокремлений підрозділ (ВП) НУБіП України «Агрономічна дослідна станція», в основу господарювання якого, окрім рослинництва, покладене тваринництво, яке представлене молочнотоварною фермою із 237 коровами [1] і 294 телятами і нетелями, а також свинарником із 132 голів свиней, в т.ч. 28 свиноматок [2]. Відходом від виробництва молока і м'яса є гній, який, як правило, застосовується для підвищення родючості ґрунту в якості органічного добрива. Разом із тим, у перший рік внесення свіжого гною ВРХ рослини використовують 30–40 % фосфору, 60–70 % калію і лише близько 18 % азоту, що міститься в ньому. Повне засвоєння рослинами поживних речовин гною відбувається протягом трьох років. При розкладанні гною одночасно з мінералізацією азоту, фосфору і сірки, не менше 70 % вуглецю органічної речовини перетворюється в діоксид вуглецю. З одного боку, це покращує живлення рослин через фотосинтез, однак

---

\* Науковий керівник, доктор технічних наук Дубровін В.О.

значна кількість вуглекислого газу, не спожитого рослинами, потрапляє у верхні шари атмосфери, підсилюючи парниковий ефект [3].

Тому перед внесенням свіжого гною в ґрунт його необхідно підготувати. При компостуванні утворюється перегній, поживні речовини якого засвоюються набагато краще. Однак сам процес компостування займає досить довгий проміжок часу, при цьому не вирішується проблема викидів в атмосферу вуглекислого газу. Іншим способом підготовки гною до повнішого засвоєння його поживних речовин рослинами є його метанове зброджування. При цьому утворюється цінне органічне добриво — біошлам, а значна частина вуглецю, яка в інших випадках брала участь у виникненні парникового вуглекислого газу, перетворюється на енергетично цінний газ — метан, що в суміші з вуглекислим газом утворює біогаз.

Однак для забезпечення метанового зброджування в метантенках, відходи необхідно підігрівати до температури, при якій відбувається бродіння, на що витрачається, як правило, частина виробленого біогазу. У випадку, якщо метанове зброджування відходів відбувається задля отримання біогазу, важливим є встановлення кількості виробленого біогазу, який затрачається для підтримання теплового балансу метантенка, і тієї частини, яка може бути використана для корисних цілей, оскільки цей показник суттєво впливає на рентабельність виробництва біогазу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженню питань теплового навантаження систем опалення взагалі і метантенка зокрема присвячена робота Б.Х. Драганова і Р.А. Амерханова [4], в якій втрати тепла в метантенку визначаються як сума втрат на підігрівання субстрату до температури бродіння, втрат в навколишнє середовище і на перемішування субстрату. Однак, оскільки, на нашу думку, перемішування субстрату механічними мішалками не пов'язане із втратами теплоти, втрати тепла в метантенку скориговані в роботі [5] і визначаються за формулою:

$$E_{Т.М} = E_{II} + E_{Д}, \quad (1)$$

де  $E_{Т.М}$  — втрати тепла в метантенку, МДж/добу;  $E_{II}$  — втрати тепла на підігрівання субстрату до температури бродіння, МДж/добу;  $E_{Д}$  — втрати енергії в доквілля, МДж/добу.

Також в роботі [4] наведені формули визначення кількості теплоти (втрат тепла) на підігрівання субстрату і втрат тепла в доквілля.

Кількість теплоти для підігрівання завантаженої протягом доби біомаси до температури процесу бродіння, визначається як:

$$E_{II} = m_{\text{доб}} \cdot c_c \cdot (t_{\text{бр}} - t_{\text{бм}}), \quad (2)$$

де  $m_{\text{доб}}$  — маса субстрату, що завантажується в метантенк за добу, кг/добу;  $c_c$  — теплоємність субстрату, МДж/(кг·°К);  $t_{\text{бр}}$  — температура бродіння, °С;  $t_{\text{бм}}$  — температура біомаси, що завантажується в метантенк, °С.

Вказано, що середнє значення теплоємності субстрату  $c_c$  становить  $4,18 \cdot 10^3$  МДж/(кг·°К).

Втрати енергії від метантенка в довкілля  $E_d$  визначають за формулою:

$$E_d = 0,0036 \cdot k \cdot S_M \cdot (t_{\text{бр}} - t_o) \cdot \tau, \quad (3)$$

де  $k$  — коефіцієнт теплопередачі від субстрату до довкілля, Вт/(м<sup>2</sup>·°К);  $S_M$  — площа зовнішньої поверхні метантенка, м<sup>2</sup>;  $t_o$  — температура довкілля, °С;  $\tau$  — число годин у добі.

Коефіцієнт теплопередачі  $k$  знаходять за формулою [4]:

$$k = \frac{1}{R_3 + R_{I3}}, \quad (4)$$

де  $R_3$  — термічний опір теплопередачі на зовнішній поверхні, м<sup>2</sup>·°К/Вт;  $R_{I3}$  — термічний опір теплопровідності теплоізоляційного шару, м<sup>2</sup>·°К/Вт.

Термічний опір тепловіддачі  $R_3$  визначають з виразу [4]:

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_3}, \quad (5)$$

де  $\alpha_3$  — коефіцієнт теплообміну на зовнішній поверхні метантенка, Вт/(м<sup>2</sup>·°К).

Коефіцієнт теплообміну на зовнішній поверхні метантенка  $\alpha_3$  залежить від швидкості вітру [5]:

$$\alpha_3 = 11,6 + 7 \cdot \sqrt{v_6}, \quad (6)$$

де  $v_6$  — швидкість вітру, м/с.

Термічний опір теплопровідності теплоізоляційного шару  $R_{I3}$  визначається за формулою [4]:

$$R_{I3} = \frac{\delta_{CM}}{\lambda_{CM}} + \frac{\delta_{IM}}{\lambda_{IM}}, \quad (7)$$

де  $\delta_{CM}$  — товщина стінки метантенка, м;  $\delta_{IM}$  — товщина шару теплоізоляції метантенка, м;  $\lambda_{CM}$  — коефіцієнт теплопровідності стінки метантенка, Вт/(м·°К);  $\lambda_{IM}$  — коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції, Вт/(м·°К).

Енергію біогазу  $E_{\delta}$ , яка виробляється протягом доби, згідно із [4] визначається за формулою:

$$E_{\delta} = V_{\delta} \cdot Q_n^{\delta}, \quad (8)$$

де  $V_{\delta}$  — об'єм виробленого за добу біогазу, м<sup>3</sup>/добу;  $Q_n^{\delta}$  — нижча теплота згорання біогазу, МДж/м<sup>3</sup>.

Добовий вихід біогазу  $V_{\delta}$  визначають за формулою [6]:

$$V_{\delta} = \frac{m_{ACP} \cdot b \cdot z}{100}, \quad (9)$$

де  $m_{ACP}$  — кількість абсолютно сухої речовини гною, кг/добу;  $b$  — вихід біогазу з одиниці органічної речовини, м<sup>3</sup>/кг;  $z$  — ступінь розкладання органічної речовини при бродінні, %.

Нижчу теплоту згорання газоподібного палива (кДж/кг) у розрахунку на суху масу визначають за формулою Д.І. Менделєєва [7]:

$$Q_n = 128CO + 108H_2 + 234H_2S + 339CH_4 + 589C_nH_m, \quad (10)$$

де  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_nH_m$  — склад газоподібного палива, відсотки за об'ємом при нормальних умовах (0 °С, тиск 760 мм рт.ст.).

В роботі [7] наведений вираз для переведення теплоти згорання газоподібного палива із кДж/кг в кДж/м<sup>3</sup>:

$$Q(\text{кДж/кг}) = Q(\text{кДж/м}^3) \cdot \rho_{II}, \quad (11)$$

де  $\rho_{II}$  — щільність газоподібного палива, кг/м<sup>3</sup>.

Оскільки біогаз являє собою суміш горючих і негорючих газів із різним вмістом компонентів. його щільність визначається за формулою [7]:

$$\rho_{II} = \frac{\sum \rho_{\text{комп}} \cdot A_{\text{комп}}}{\sum A_{\text{комп}}}, \quad (12)$$

де  $\rho_{\text{комп}}$  — щільність компонентів газоподібного палива, кг/м<sup>3</sup>;  $A_{\text{комп}}$  — вміст компонентів у газоподібному паливі, %.

**Результати дослідження.** Для визначення кількості теплоти для підігрівання завантаженої протягом доби біомаси до температури процесу бродіння за формулою (2) залишаються невідомими значення маси субстрату, що завантажуються в метантенк за добу,  $m_{\text{доб}}$ . Передбачається будівництво біогазової

установки ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» в декілька етапів. На першому етапі буде вводитись в експлуатацію горизонтальний метантенк об'ємом  $V=10 \text{ м}^3$ .

Враховуючи, що при метановому збродженні гноївки будуть застосовуватись косубстрати, які суттєво підвищують інтенсивність бродіння сировини в біореакторі, коефіцієнт заповнення біореактора приймаємо  $q=0,7$ . Коефіцієнт спорожнення біореактора  $k$  при поступовому завантаженні метантенка приймаємо рівним 1.

Оскільки формула для визначення залежності густини гною  $\rho_G$  від його вологості  $W_G$ , отримана в результаті апроксимації даних із літературних джерел, має вигляд:

$$\rho_G = 1624 - 6,24 \cdot W_G, \quad (13)$$

добова маса завантаження субстрату в метантенк  $m_{\text{доб}}$  визначається як:

$$m_{\text{доб}} = V_m \cdot k \cdot q \cdot \rho_G = V_m \cdot k \cdot q \cdot (1624 - 6,24 \cdot W_G). \quad (14)$$

При оптимальній вологості гною 92% [8], в метантенк об'ємом  $V = 10 \text{ м}^3$  щоденно необхідно завантажувати приблизно 7 т гною.

Метанове бродіння буде проходити в мезофільному режимі при температурі  $40^\circ\text{C}$ . Температура завантаженої біомаси  $t_m$  залежить від способу її завантаження у метантенк. Якщо масу для збродження беруть зі сховища для гною, то її температура дорівнює температурі, до якої підігрівають гній у сховищі. Якщо маса надходить безпосередньо з тваринницького корпусу, то її температура в неопалювальний період дорівнює температурі доквілля, а в опалювальний період — така ж, як у приміщенні комплексу. Оптимальна температура в корівниках при стійловому утриманні становить  $10\text{-}12^\circ\text{C}$ . Середньомісячна температура по Київщині наведена в табл. 1.

**Таблиця 1. Середньомісячна температура по Київщині [5]**

січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
-5,6	-4,2	0,7	8,7	15,1	18,2	19,3	18,6	13,9	8,1	2,1	-2,3

Для визначення втрат енергії від метантенка в довкілля  $E_d$  за формулою (3) залишаються невідомими коефіцієнт теплопередачі від субстрату до довкілля  $k$  і площа зовнішньої поверхні метантенка  $S_M$ .

Площа зовнішньої поверхні метантенка визначається як сума бокової поверхні і поверхні даху:

$$S_M = S_{БП} + 2S_{ТП} \quad (15)$$

де  $S_{БП}$  — площа зовнішньої бокової поверхні метантенка, м<sup>2</sup>;  $S_{ТП}$  — площа зовнішньої торцової поверхні метантенка, м<sup>2</sup>.

Площа зовнішньої бокової поверхні циліндричного метантенка  $S_{БП}$  визначається як добуток периметра зовнішньої бокової поверхні метантенка  $P_M$  на його довжину  $L$ :

$$S_{БП} = P_M \cdot L = \pi \cdot D \cdot L \quad (16)$$

де  $D$  — діаметр метантенка, м.

Площа зовнішньої торцової поверхні метантенка  $S_{ТП}$  визначається за формулою:

$$S_{ТП} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (17)$$

Середньомісячна швидкість вітру по Київщині для визначення коефіцієнта теплообміну на зовнішній поверхні метантенка  $\alpha_s$  за формулою (6), наведена в табл. 2.

Для встановлення термічного опору теплопровідності теплоізоляційного шару метантенка  $R_{ГЗ}$  за формулою (7) потрібні дані про матеріал метантенка та його теплову ізоляцію.

Матеріалом метантенка є сталь з товщиною стінки  $\delta_{см} = 7$  мм. Коефіцієнт теплопровідності сталі становить 52 Вт/(м·°К) [5]. Утеплювачем метантенка є мінераловатні листи товщиною 80 мм із коефіцієнтом теплопровідності 0,05 Вт/(м·°К) [5].

**Таблиця 2.** Середньомісячна швидкість вітру по Київщині [5]

січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
2,8	2,8	2,6	2,6	2,2	2,2	2,1	2,0	2,1	2,3	2,6	2,7

Вихід біогазу із субстрату, що складається із гною ВРХ з додаванням 3 % відходу біодизельного виробництва — сирого гліцерину, при поступовому процесі завантаження, може сягати 62 л / (кг·добу) [2].

В результаті лабораторних досліджень на експериментальній біогазовій установці в лабораторії біоконверсії в АПК НУБіП України встановлено, що біогаз із гною ВРХ містить 55% метану і 45% вуглекислого газу [9]. В цьому випадку нижча теплота згорання біогазу за формулою (10) становить 19580 кДж/кг. Враховуючи, що щільність метану становить 0,7 кг/м<sup>3</sup>, вуглекислого газу — 1,98 кг/м<sup>3</sup>, щільність біогазу, розрахована за формулою (12), становить 1,28 кг/м<sup>3</sup>. Тоді теплота згорання біогазу за формулою (11) становить 25,0 МДж/м<sup>3</sup>.

Компенсацію втрат теплової енергії в метантенку  $E_{T.M}$  здійснюють за рахунок спалювання частини виробленого біогазу. Добовий об'єм біогазу  $V_{б.Т.М}$ , який використовується для підтримання теплового балансу метантенка, можна визначити із виразу:

$$V_{б.Т.М} = \frac{E_{T.M}}{Q_u^б} \quad (18)$$

Різниця між виробленим за добу біогазом  $V_б$  і спаленим протягом доби біогазом для підтримання теплового балансу метантенка,  $V_{б.Т.М}$  після очищення може використовуватись в енергетичних цілях: для приготування їжі, опалювання виробничих і побутових приміщень, виробництва електроенергії на когенераційних установках. Корисний добовий об'єм біогазу визначається за формулою:

$$V_{б.Кор} = V_б - V_{б.Т.М} \quad (19)$$

Тоді загальне добове корисне виробництво енергії біогазовою установкою  $E_{Кор}$ , визначають як:

$$E_{Кор} = E_б - E_{T.M} \quad (20)$$

Результати розрахунків енергетичного балансу горизонтального сталевого метантенка першої черги наведені в табл. 3.

**Таблиця 3.** Енергетичний баланс горизонтального сталевого метантенка об'ємом 10 м<sup>3</sup>

Місяць	Кількість теплоти (в МДж/добу)			Доля біогазу, що використовується для		Корисне загальнодобове виробництво енергії Екор, МДж/добу
	для підігрівання субстрату ЕП,	для підтри- мання тем- пературного режиму ЕД	загальні втрати ЕТ.М.	компенсації загальних втрат Вб.Т.М, %	корисних цілей Вб.Кор, %	
Січень	891	65	956	8,4	91,6	10415
Лютий	891	63	954	8,4	91,6	10417
Березень	891	56	947	8,3	91,7	10424
Квітень	891	44	936	8,2	91,8	10435
Травень	784	35	819	7,2	92,8	10552
Червень	688	31	719	6,3	93,7	10652
Липень	655	29	684	6,0	94,0	10687
Серпень	685	30	716	6,3	93,7	10655
Вересень	836	37	873	7,7	92,3	10498
Жовтень	891	45	936	8,2	91,8	10434
Листопад	891	54	945	8,3	91,7	10426
Грудень	891	60	951	8,4	91,6	10420

**Висновок.** У разі застосування субстрату із додаванням 3 % гліцерину вихід біогазу при поступовому процесі завантаження може сягати 62 л/(кг·добу). При цьому загальні витрати тепла в метантенку становитимуть 716-956 МДж/добу, із яких від 30 МДж/добу до 65 МДж/добу затрачається на підтримання температурного режиму, решта — на підігрівання субстрату. Доля біогазу, що використовується для корисних цілей, перевищує 90 %, а корисне загальнодобове виробництво енергії є більшим, ніж 10 тис. МДж/добу.

## Бібліографія

1. Якубчак О.М. Стан виробництва сирого товарного молока в умовах ВП НУ-БіП України у 2007–2011 рр. / О.М. Якубчак, А.І. Кобиш, Л.О. Олійник // Наукові доповіді НУБіП України. — 2012. — № 7 (36). — С. 131-139.
2. Розробити комплексні ресурсоощадні технології виробництва і використання біопалива на агропромислових підприємствах та у сільській місцевості:



- Звіт про НДР (проміжний) / Національний університет біоресурсів і природокористування України; Керівник В.О. Дубровін. — № 3.01.12/236-92. — Київ, 2013. — 272 с.
3. *Смирнов П.М.* Агрехимия: 1/ учебн. для вузов] / П. М. Смирнов, Э. А. Муравин. — М.: Колос, 1981. — 319 с.
  4. *Амерханов Р.А.* Проектирование систем тапоснабжения сельського хозяйства : учебн. для вузов. Под. ред. проф. Б.Х. Драганова / Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов. — Краснодар: 2001. — 200 с.
  5. Процеси та апарати біотехнологічних виробництв. Ч. 5. Визначення теплового балансу метантенка. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисциплін «Процеси та апарати біотехнологічних виробництв» для студентів сільськогосподарських вищих навчальних закладів 3-4 рівнів акредитації освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» зі спеціальності 8.10010203 — «Механізація сільського господарства» / В.М. Поліщук, В.О. Дубровін, С.В. Драгнев, М.М. Лободко, О.В. Дубровіна. — К.: АграрМедіаГруп, 2013. — 40 с.
  6. Біотехнологія. Методичні вказівки та робочий зошит до виконання лабораторно-практичних робіт для студентів із спеціальності 7.130301 «Водні біоресурси» / В.Г. Герасименко, М.О. Герасименко, О.М. Мельниченко та ін. — Біла Церква, 2004. — 82 с.
  7. Технології біоенергоконверсій. Ч. 4. Визначення теплоти згорання біопалива. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисциплін «Технології біоенергоконверсій» для студентів сільськогосподарських вищих навчальних закладів 3-4 рівнів акредитації освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» зі спеціальності 8.10010203 — «Механізація сільського господарства» / В.М. Поліщук, В.О. Дубровін, С.В. Драгнев, О.В. Дубровіна. — К.: АграрМедіаГруп, 2013. — 16 с.
  8. *Веденеев А.Г.* Биогазовые технологии в Кыргызской республике: справочное руководство / А.Г. Веденеев, Т.А. Веденева. — Бишкек: Евро, 2006. — 90 с.
  9. *Полищук Виктор.* Влияние режимов метанового сбраживания на эффективность производства биогаза / Виктор Полищук, Николай Лободко, Ольга Дубровина // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. — Lublin: Rzeszow, 2013. — Vol. 15, № 3. — С. 207-220.

### **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС МЕТАНТЕНКА БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ ОП НУБІП УКРАИНЫ «АГРОНОМИЧЕСКАЯ ОПЫТНАЯ СТАНЦИЯ»**

*По известной методике определен энергетический баланс метантенка биогазовой установки, сооружаемой в ОП НУБиП Украины «Агрономическая опытная станция». Определены потребности энергии для поддержания теплового баланса метантенка, а также полезное общее суточное производство энергии.*

**Ключевые слова:** метантенк, потери тепла, коэффициент теплопередачи, теплообмен, биогаз, энергия, теплота сгорания, субстрат, биогазовая установка.

### **ENERGY BALANCE DIGESTERS BIOGAS PLANT OF NUBIP UKRAINE «AGRONOMIC RESEARCH STATION»**

*By a known method to determine the energy balance of bio-digester gas installation being built in PU NULaES of Ukraine «Agronomic experiment station». The needs energy to heat the digester ballansa and useful public daily energy production.*

**Key words:** Digester, heat loss, heat transfer coefficient, heat, biogas, energy, heat of combustion, substrate, biogas plant.