

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БУДІВНИЦТВІ

УДК 536.24: 628.477

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ БІОКОНВЕРСІЇ ПРИ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ СУБСТРАТУ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ З ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ

Г. С. Ратушняк, І. А. Кощесв

Розглянуто енергоощадну конструктивно-технологічну схему біогазової установки з тепловим насосом та з віброперемішувачем. Запропоновано методику визначення затрат енергоносіїв для розглянутої конструкції біогазової установки з тепловим насосом. Визначено за результатами чисельного моделювання затрати енергії на забезпечення інтенсифікації та термостабілізації процесу біоконверсії при різних режимах ферментації.

Рассмотрено энергосберегающую конструктивно-технологическую схему биогазовой установки с тепловым насосом и с виброперемешивателем. Предложена методика определения затрат энергоносителей для рассматриваемой конструкции биогазовой установки с тепловым насосом. Определены по результатам численного моделирования затраты энергии на обеспечение интенсификации и термостабилизации процесса биоконверсии при разных режимах ферментации.

Energy-saving constructively-technological scheme of biogas plant with heat pump and vibromixer was considered. The method of determining the cost of energy for the considered biogas plant with a heat pump was proposed. It was determined by the results of numerical modeling of energy costs for intensification and thermal stabilization of process of bioconversion in different modes of fermentation.

Вступ

Інтенсифікація анаеробного бродіння потребує певних затрат додаткової енергії, що може привести до зниження рентабельності біоконверсії [1, 2, 3]. Конструктивно-технологічне рішення біогазової установки повинно забезпечувати максимальну продуктивність виробництва біогазу з мінімальними затратами енергоносіїв на інтенсифікацію та термостабілізацію ферментації біомаси [4, 5]. Найбільш продуктивна енергоефективність мезофільного та термофільного режимів ферментації може бути забезпечена шляхом зменшення тепловтрат із біогазової установки та використанням відновлювальних енергоносіїв для підтримання відповідного температурного режиму бродіння субстрату [6, 7].

Метою роботи є теоретичне обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів біогазових установок та визначення їх енергоефективності при використанні альтернативного джерела додаткової теплової енергії на термостабілізацію процесу виділення біогазу.

Результати досліджень

На рис. 1 наведено енергоощадну конструктивно-технологічну схему біогазової установки з тепловим насосом [3], отримана тепла енергія якого використовується для термостабілізації анаеробного бродіння субстрату.

Біогазова установка з тепловим насосом містить резервуар-реактор 1, закритий ковпаком 2, який встановлений з можливістю руху по напрямних 10 шахти завантаження біомаси 12 з заслінками 8 та манометр 3, що розташовані в ковпаку 2. В резервуар-реактор 1 введено провальні колосникові решітки 4, з вмонтованим нагрівником 25, з можливістю зміни гідравлічного опору за допомогою регулятора 14. Провальні колосникові решітки 4 розташовані в резервуарі-реакторі 1 і ділять його на три секції 13₁, 13₂, 13₃. Кожна з секцій 13₁, 13₂, 13₃ має оглядові вікна 11, труби споживача 6, що з'єднані в одну мережу і з'єднані з кожною секцією 13₁, 13₂, 13₃ резервуара-реактора 1. Крім того в нижній частині резервуара-реактора 1 розміщена ємність для збирання біодобрив 5 із заслінкою 7. Провальні колосникові решітки 4 з'єднані з резервуаром-реактором 1 за допомогою шарнірів 9 та кінематично зв'язані з віброактиватором. Вмонтований нагрівник 25 є частиною першого трубопровода 20, який з'єднує бак-аккумулятор 19 з резервуаром-реактором 1.

Рух теплоносія в баку-акумуляторі 19 забезпечує циркуляційний насос 21 і запірно-регулювальна арматура 22, спускник 23 та повітроспускник 24 встановлені для спорожнення системи. Другий трубопровід 26 має ті ж складові і з'єднує бак-акумулятор 19 з тепловим насосом 16, який містить випарник та конденсатор 15. Холодильна камера 18 містить теплообмінний контур 17 теплового насоса 16.

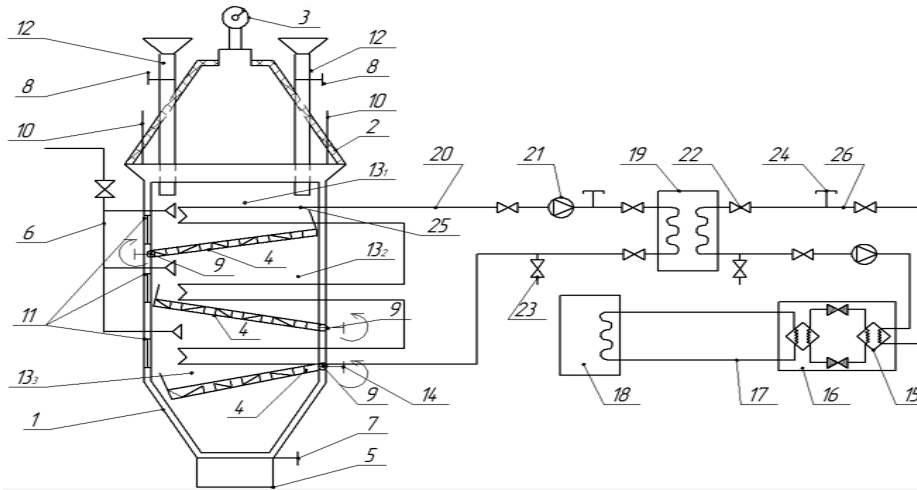


Рис.1. Конструктивно-технологічна схема біогазової установки з тепловим насосом

Біогазова установка з тепловим насосом працює таким чином. При завантаженні біомаси в резервуар-реактор 1 через шахти завантаження біомаси 12 подачу регулюють заслінками 8. Біомаса опиняється в першій секції 13₁ резервуара-реактора 1, де вона нагрівається нагрівачем 25, який отримує теплову енергію від теплоносія, що циркулює в першому трубопроводі 20 між баком-акумулятором 19 та біогазовим реактором, регуляція якого здійснюється запірно-регулювальною арматурою 22, а нагнітання циркуляційним насосом 21. Другий трубопровід 26 за допомогою циркуляційного насоса 21 транспортує теплоносій між тепловим насосом 16 та баком-акумулятором 19, регуляція здійснюється запірно-регулювальною арматурою 22. Спускник 23 та повітроспускник 24 необхідні для спорожнення системи при заміні теплоносія. Конденсатор та випарник 15 виконують основні функції теплового насоса 16. При цьому теплоносій через теплообмінний контур 17 теплового насоса 16 відбирає теплову енергію у холодильній камери 18. Нагрівач 25 вмонтований в провальні колосникові решітки 4. Біомаса проходить першу стадію бродіння, після чого за рахунок зміни гідравлічного опору провальних колосникових решіток 4 за допомогою регулятора 14, опиняється в другій секції 13₂, де проходить другу стадію бродіння, а в першу секцію завантажується нова порція біомаси. Отриманий біогаз відводиться за рахунок труб споживача 6. Третю стадію бродіння біомаса проходить в третій секції 13₃ резервуара-реактора 1. Після завершення бродіння біомаса потрапляє в ємність збору біодобрив 5, завантаження якої регулюється заслінкою 7. Процеси бродіння візуально оцінюють за допомогою оглядових вікон 11. При необхідності відкрити резервуар-реактор 1, при цьому ковпак 2 рухається по напрямних 10 і знімається. Регуляція гідравлічного опору провальних колосникових решіток 4 відбувається за рахунок регулятора 14. Вібратор вимушує здійснювати коливальні рухи провальних колосникових решіток 4. Імпульсні коливання суміші дозволяють більш активно перемішуватись субстрату. Також за рахунок омивання поверхні нагрівача 25 біомасою інтенсифікується тепловіддача від стінки нагрівального елемента до середовища. Причому прогрів буде рівномірним за рахунок активного перемішування. Також пульсація рідини дозволить біогазу більш легко прориватися крізь суміш та відбиратися через труби споживача 6. В кожній секції резервуара-реактора 1 провальні колосникові решітки 4 виконують коливання за індивідуально заданих частотах і амплітудах, що дозволяє досягти індивідуальних параметрів бродіння.

Підвищення енергоефективності біоконверсії потребує модернізації технологічного процесу бродіння біомаси у біогазовій установці. Цього можна досягнути, зменшивши затрати енергоносіїв, вибравши найбільш раціональний температурний режим ферментації та інше.

Затрати енергії на інтенсифікацію технологічного процесу анаеробного бродіння з

використанням вібраційного перемішування субстрату відповідно до конструктивно-технологічної схеми (рис. 1). Визначимо відповідно методики запропонованої авторами [2].

$$E_{\text{ТП}} = (E_{\text{П}} + E_{\text{ТС}} + E_{\text{ТВ}}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $E_{\text{П}}$ – затрати енергії на вібраційне перемішування субстрату, $\frac{\text{кВт/год.}}{\text{рік}}$;

$E_{\text{ТС}}$ – затрати енергії на підігрівання біомаси, $\frac{\text{кВт/год.}}{\text{рік}}$;

$E_{\text{ТВ}}$ – затрати енергії на компенсацію тепловтрат із біогазової установки з тепловим насосом в зовнішнє середовище, $\frac{\text{кВт/год.}}{\text{рік}}$.

Втрати на термостабілізацію технологічного процесу шляхом підігрівання біомаси з врахуванням періодичності її завантаження в резервуар 1 біогазової установки опишемо, користуючись раніше відомою формулою [2], дещо модернізувавши її до вигляду

$$E_{\text{ТС}} = c_x \cdot m \cdot \Delta T_x \cdot \frac{n_x/n_{\text{ц}}}{3600} + c_T \cdot m \cdot \Delta T_T \cdot \frac{n_T/n_{\text{ц}}}{3600}, \quad (2)$$

де c_x, c_T – теплоємність біосуміші, відповідно для холодного та теплого періоду, кДж/м^3 ;

m – маса однієї порції завантаження в біогазову установку, кг ;

$\Delta T_x, \Delta T_T$ – різниця температур відповідно в біогазовій установці та у навколишньому середовищі за холодний та теплий період року, $^{\circ}\text{C}$;

$n_{\text{ц}}$ – термін повторюваності завантаження біосуміші, дні;

n_x, n_T – кількість днів холодного та теплого періодів року, відповідно, дні.

Затрати енергії на вібраційне перемішування становлять [2]

$$E_{\text{П}} = V \cdot q \cdot (n_x + n_T) \cdot n_n, \quad (3)$$

де n_n – час вібраційного перемішування протягом доби, год. ;

q – затрати енергії на перемішування субстрату, кВт/м^3 ;

V – об'єм біосуміші, м^3 .

Втрати енергії конструкцією біогазової установки з тепловим насосом (рис. 1) можна подати у вигляді формули

$$E_{\text{ТВ}} = E_{\text{бу}} + E_{\text{ба}} + E_{\text{бг}} + E_{\text{бм}} + E_m, \quad (4)$$

де $E_{\text{бу}}, E_{\text{ба}}, E_m, E_{\text{бг}}, E_{\text{бм}}$ – тепловтрати поверхнею біогазової установки, поверхнею бака акумулятора 19, поверхнею трубопроводів, із виходом біогазу та з відпрацьованою біомасою, відповідно, $\frac{\text{кВт/год.}}{\text{рік}}$.

Відповідно до запропонованої конструктивно-технологічної схеми енергоощадної біогазової установки з тепловим насосом (рис. 1) затрати енергії на термостабілізацію анаеробного бродіння біомаси та на відшкодування тепловтрат можуть бути покриті тепловою енергією, що отримується від теплового насоса 31, тобто

$$E_{\text{ТВ}} = E_{\text{ТН}}, \quad (5)$$

де $E_{\text{ТН}}$ – кількість теплової енергії, яку можна отримати в бак-акумулятор 19 від теплового насоса 16, $\frac{\text{кВт/год.}}{\text{рік}}$.

Річні тепловтрати через поверхню резервуара 1 біогазової установки та бака акумулятора

19 визначаються згідно з формулами [2]:

$$E_{6y} = k \cdot F_1 \cdot (\Delta T_x \cdot n_x + \Delta T_T \cdot n_T), \quad (6)$$

$$E_{6a} = k \cdot F_2 \cdot (\Delta T_x \cdot n_x + \Delta T_T \cdot n_T), \quad (7)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, кВт/м²К;
 F_1, F_2 – площа зовнішньої поверхні біогазової установки та бака акумулятора, відповідно, м²;

Річні тепловтрати з відхідним біогазом із резервуара-реактора 1

$$E_{6z} = c_x \cdot \rho \cdot V_x \cdot \Delta T_x \cdot \frac{n_x/n_{ц}}{3600} + c_T \cdot \rho \cdot V_T \cdot \Delta T_T \cdot \frac{n_T/n_{ц}}{3600}, \quad (8)$$

де c_x, c_T – теплоємність біогазу, відповідно для холодного та теплого періоду, кДж/м³;
 ρ – густина біогазу, кг/м³;
 V_x, V_T – об'єм біогазу, що виділяється в результаті бродіння біомаси, відповідно, холодного та теплого періоду року, кг/м³.

Річні тепловтрати з відпрацьованим субстратом

$$E_{6m} = E_{TC}. \quad (9)$$

Річні тепловтрати трубопроводами по яких циркулює теплоносій

$$E_m = q_x \cdot l \cdot n_x + q_T \cdot l \cdot n_T, \quad (10)$$

де q_x, q_T – тепловий потік через трубу відповідно для холодного та теплого періоду року, Вт/м;
 l – сумарна довжина трубопроводів, м.

Використовуючи формули [3-10], виконано чисельне моделювання затрат енергоносіїв на забезпечення технологічного процесу конструктивно-технологічної схеми біогазової установки з тепловим насосом (рис. 1). Розрахунки проведено на основі таких початкових даних:

- біогазова установка об'ємом 100 м³, висотою 1,8 м, діаметром 8,22 м, площа бічної поверхні 156,25 м², з ізолюваною поверхнею мінеральною ватою шаром 100 мм, при цьому термічний опір стінки складає 2,38 м²·К/Вт;
- біомаса займає 70 % всього об'єму біогазової установки;
- постачання нової порції біосуміші кожні 5 діб масою 25 % від загальної маси суміші;
- біогазова установка постійної дії;
- розрахункові температури нової порції біомаси в теплий період +15 °С, в холодний період +5 °С;
- довжина трубопроводів 90 м, радіус бака акумулятора 2 м, ціна нічного тарифу за електроенергію 0,35 грн./кВт.

Моделювання проводиться для природно-кліматичних умов м. Вінниця із врахуванням середньої тривалості холодного періоду року 120 днів при розрахунковій зовнішній температурі – 21 °С, а теплого 245 днів при розрахунковій зовнішній температурі +11,9 °С [8].

Результати чисельного моделювання наведено в таблицях для затрат енергії на експлуатацію біогазової установки (табл. 1) та затрат коштів (табл. 2) на використання енергоресурсів для криофільного, мезофільного, термофільного режимів. Причому у таблицю 2 включено порівняння витрат коштів при різних коефіцієнтах перетворення теплового насоса.

Таблиця 1

Затрати енергоносіїв та коштів на забезпечення технологічних процесів біогазової установки для різних режимів ферментації

Параметри		Холодний період, кВт·год./рік	Теплий період, кВт·год./рік	Річні, кВт·год./рік
Кріофільний режим				
Затрати енергії на підігрівання нової порції біомаси, $E_{тс}$		11734	7965	19700
Затрати енергії на вібраційне перемішування, $E_{п}$		504	1029	1533
Тепловтрати устаткування, $E_{тв}$	Тепловтрати поверхнею біогазової установки, $E_{бу}$	7752	3126	10878
	Тепловтрати поверхнею бака акумулятора, $E_{ба}$	5252	3805	9057
	Тепловтрати з виходом біогазу, $E_{бг}$	9810	3957	13767
	Тепловтрати з вихідною біомасою, $E_{бм}$	11734	7965	19700
	Тепловтрати поверхнею трубопроводів, $E_{м}$	6489	4702	11191
Сумарні втрати		53275	29423	82698
Мезофільний режим				
Затрати енергії на підігрівання нової порції біомаси, $E_{тс}$		21122	27081	48204
Затрати енергії на вібраційне перемішування, $E_{п}$		504	1029	1533
Тепловтрати устаткування, $E_{тв}$	Тепловтрати поверхнею біогазової установки, $E_{бу}$	10021	7759	17780
	Тепловтрати поверхнею бака акумулятора, $E_{ба}$	6572	6411	12984
	Тепловтрати з виходом біогазу, $E_{бг}$	12681	9819	22501
	Тепловтрати з вихідною біомасою, $E_{бм}$	21122	27081	48204
	Тепловтрати поверхнею трубопроводів, $E_{м}$	8016	7819	15836
Сумарні втрати		80038	86999	167042
Термофільний режим				
Затрати енергії на підігрівання нової порції біомаси, $E_{тс}$		35204	55755	90960
Затрати енергії на вібраційне перемішування, $E_{п}$		504	1029	1533
Тепловтрати устаткування, $E_{тв}$	Тепловтрати поверхнею біогазової установки, $E_{бу}$	13424	14707	28132
	Тепловтрати поверхнею бака акумулятора, $E_{ба}$	8545	10360	18906
	Тепловтрати з виходом біогазу, $E_{бг}$	16989	18613	35602
	Тепловтрати з вихідною біомасою, $E_{бм}$	35204	55755	90960
	Тепловтрати поверхнею трубопроводів, $E_{м}$	10307	12496	22803
Сумарні втрати		120177	168715	288899

Таблиця 2

Затрати коштів на електроенергію при різних режимах ферментації та коефіцієнт перетворення теплового насоса

Коефіцієнт перетворення	2,25	2,5	2,75	3,0	3,25
Кріофільний режим					
Електроенергія, (кВт/год.)/рік	38146	34331	31210	28609	26409
Кошти на електроенергію, грн.	13351	12016	10923	10013	9243
Мезофільний режим					
Електроенергія, (кВт/год.)/рік	74242	66817	60743	55681	51398
Кошти на електроенергію, грн.	25984	23386	21260	19488	17989
Термофільний режим					
Електроенергія, (кВт/год.)/рік	128399	115559	105054	96299	88892
Кошти на електроенергію, грн.	44939	40445	36768	33704	31112

Аналіз отриманих результатів (табл. 1, 2) свідчить, що затрати енергії на інтенсифікацію біоконверсії в установках до 100 м³ з термічним опором огорожуючих поверхонь до 2,5 м²·К/Вт в природно-кліматичних умовах Вінницької області можуть досягати 288899 кВт·год./рік для термофільного режиму збродження біомаси, 167042 кВт·год./рік для мезофільного режиму та 82698 кВт·год./рік для кріофільного режиму. Затрати енергії можуть бути компенсовані за рахунок використання відновлювальної енергії, що отримана з теплового насоса відповідно до запропонованої енергоощадної конструкції біореактора (рис. 1). Із збільшенням коефіцієнта перетворення теплового насоса затрати коштів на електроенергію зменшуються при всіх режимах

ферментації (рис. 2). Інтенсивність зменшення коштів більша при термофільному режимі ніж при мезофільному і криофільному.

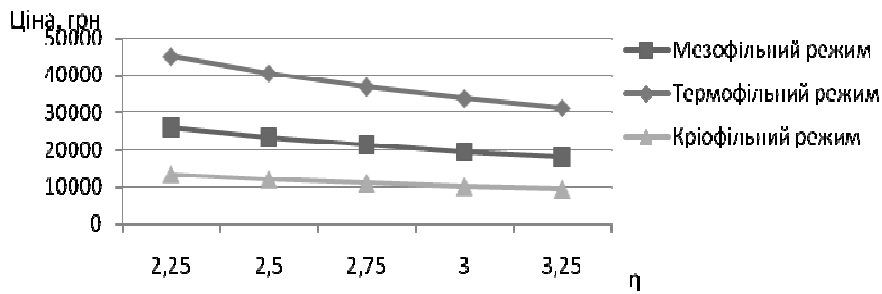


Рис. 2. Залежність витрачених коштів на електроенергію від коефіцієнта перетворення теплового насоса при різних режимах ферментації

Порівняння доцільності використання теплонасосного обладнання виконано для таких джерел тепlopостачання як газовий та електричний котел (рис. 3). При цьому продуктивність газового котла 92 %, електричного котла 98 %. Теплота згорання природного газу $34 \cdot 10^3$ кДж/м³ при його вартості 3,5 грн./м³. Вартість електроенергії за тризонним тарифом [9]. Витрата коштів на підтримання температурного режиму біогазової установки газовим та електричним котлом, відповідно:

$$k_r = (3,5 \cdot \Sigma E) / (KKD_r \cdot \frac{34 \cdot 10^3}{3600}), \quad (11)$$

$$k_e = S_r \cdot \Sigma E \cdot KKD_e, \quad (12)$$

де ΣE – сумарні річні втрати енергії, кВт;
 KKD_r, KKD_e – ККД газового та електричного котла, відповідно, 92 % та 98 %;
 S_r – ціна електричної енергії відповідно до вибраного тарифу, грн./кВт.

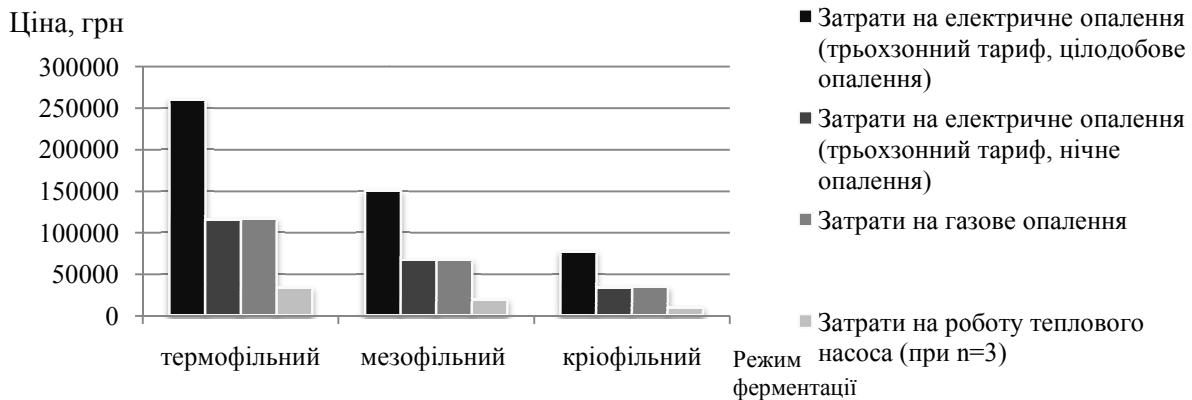


Рис. 3. Залежність витрачених коштів від джерел тепlopозабезпечення при різних режимах ферментації

На термофільний режим припадають найбільші сумарні витрати енергії і коштів. Це зумовлено тим, що необхідно підтримувати вищу температуру всередині біогазової установки, але при цьому процес бродіння проходить найефективніше і кількість біогазу найбільша. Використання електричного опалення вигідне лише якщо користуватись нічним тризонним тарифом і протягом 8 годин отримувати електричну енергію за ціною 0,35 грн./кВт. Для роботи в такому режимі обов'язково повинен бути встановлений бак-акумулятор необхідного об'єму, для накопичування в ньому теплової енергії за ніч в такій кількості, якої б вистачало на цілу добу. При цьому експлуатація біогазової установки жорстко закріплена за часом споживання електричної енергії. Якщо ж розглядати як джерело тепла газовий котел, то значною перевагою є те, що немає обмеженості в часі щодо споживання природного газу і немає необхідності у встановленні

великогабаритного бака-акумулятора. Порівнюючи розглянуті варіанти джерел теплової енергії для термостабілізації анаеробного бродіння біомаси біогазової установки приходимо до висновку, що використання відновлювальної енергії з допомогою теплового насоса є найекономічнішим варіантом серед запропонованих.

Висновки

- Запропоновано енергоощадну конструктивно-технологічну схему біогазової установки з тепловим насосом як альтернативне джерело енергії, яке забезпечує термостабілізацію анаеробного бродіння субстрату. Введення теплового насоса дозволяє зменшити витрати біогазу на термостабілізацію.
- Відповідно до запропонованої методики за результатами чисельного моделювання визначено затрати енергії та коштів на забезпечення інтенсифікації та термостабілізації процесу біоконверсії для трьох основних теплових режимів бродіння за природно-кліматичних умов Вінницької області. Аналіз отриманих даних свідчить про найбільші експлуатаційні витрати в разі використання термофільного режиму, але при цьому продуктивність утворення біогазу зростає в порівнянні з криофільним та термофільним тепловими режимами.
- Енергоефективність біоконверсії може бути підвищена за рахунок використання теплового насоса як джерела енергії для термостабілізації анаеробного бродіння субстрату. Використання теплового насоса як джерела тепла дає змогу заощаджувати кошти на експлуатації даної біогазової установки у розмірі від 62 % до 75 % залежно від коефіцієнта перетворення теплонасосного обладнання в порівнянні з газовим чи електричним джерелом генерації теплової енергії.

Використана література

1. Ратушняк Г. С. Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 170 с.
2. Ратушняк Г. С. Інтенсифікація біоконверсії шляхом використання відновлювальних джерел енергії / Г. С. Ратушняк, І. А. Кошчєєв // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2011: № 2. – С. 157-160.
3. Пат. 67819 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазовий установка з тепловим насосом / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В., Кошчєєв І. А.; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u201108680; Заявл. 11.07.2011; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5. – 4 с.
4. Ротштейн О. П. Soft Computing в біотехнології багатofакторний аналіз і діагностика: Монографія / О. П. Ротштейн, Є. П. Ларюшкін, Ю. І. Мітюшкін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 144 с.
5. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2004. – 132 с.
6. Ратушняк Г. С. Тепловтрати в біогазових установках при різних температурних режимах анаеробного бродіння / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // ВП. – 2008. – № 4. – С. 20-24.
7. Ратушняк Г. С. Управління технологічним процесом біоконверсії при перемішуванні субстрату / Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк, К. В. Анохіна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2010: № 2. – С. 117-121.
8. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія/ офіційне видання, Мінрегіонбуд України, 2011 р. – 123 с.
9. Тарифи на електроенергію [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://kyivenergo.ua/ua/for-consumers/sp-p/8887-2010-10-06>.

Ратушняк Георгій Сергійович – к.т.н., професор, завідувач кафедри теплогазопостачання Вінницького національного технічного університету, академік Академії будівництва України.

Кошчєєв Іван Анатолійович – магістрант Вінницького національного технічного університету.