УДК 536.24:620.92

Ткаченко С.Й.
Резидент Н. В.
Ткачук В. С.

СХЕМНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ БІОКОНВЕРСІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Із застосуванням експериментально-розрахункового методу проаналізовані теплообмінники для утилізації теплоти відпрацьованої суміші в системі біоконверсії, виявлені їх доцільні конструкції і режими роботи.

Ключові слова: біоконверсія, теплообмін в органічних сумішах, вимушена конвекція, вільна конвекція, режими теплообміну, критеріальні рівняння, експериментально-розрахунковий метод.

Abstract

While using experimental and calculation method the heat exchangers for heat utilization of worked out mixture in biogas installation system was analysed, the proper constructions and work parameters were found out.

Key words: bioconversion, heat-utilizator, heat-exchange in organic mixtures, artificial convection, natural convection, heat-exchange conditions, criterion equations.

Вступ

Кожне підприємство, де є відходи органічного походження, повинно вирішувати питання їх утилізації. Процес анаеробної переробки відходів в біогазових установках (БГУ) є одним із найбільш перспективних методів утилізації від якого отримуємо екологічний, енергетичний та економічний ефекти. В роботах [1, 2] запропоновані схеми БГУ з утилізацією теплоти відпрацьованої суміші і утилізацією теплоти біогазу та проаналізована енергоефективність цих установок. При цьому виявлено, що за рахунок утилізації теплоти можливо збільшити вихід товарного біогазу до 70…80% від того, що виробляється. Але в даному випадку металоємність БГУ може збільшитись на 10…25 %.

Дана робота є продовженням тематики кафедри теплоенергетики [3 - 8] і ставить за мету застосувати експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) в проектному розрахунку і чисельному експерименті утилізаторів теплоти відпрацьованої суміші в системі БГУ, виявити їх доцільні конструкції і режими роботи.

Основна частина

Розглянемо БГУ з такими основними складовими (рис. 1): біореактор 1, змішувач 2, виносний теплообмінник 4, перемішувальний пристрій 5, водогрійний котел 9, газгольдер 10 та теплообмінник-утилізатор (ТУ) 3. Установка працює наступним чином. Свіжа сировина завантажується у ємність 2, де змішується з гарячою водою, яка надходить із бака-акумулятора гарячої води 7. Одночасно вода із бака-акумулятора 7 подається у кільцевий зазор змішувача. Суміш, яка доведена до потрібної температури і концентрації, подається у біореактор 1 для анаеробної переробки. Утворений біогаз відводиться з біореактора через теплообмінник-осушувач отриманого біогазу 6 у газгольдер 10.

Утилізація теплоти в установці здійснюється у двох напрямках: утилізація теплоти відпрацьованої суміші (основна частина утилізованої теплоти) та утилізація теплоти отриманого біогазу.

Перший напрямок відбувається наступним чином. Відпрацьована суміш з біореактора та додаткова мережна вода, що нагрівається, подаються в робочі ємності теплообмінника-утилізатора 3. Нагріта вода надходить у теплообмінник 8 та бак-акумулятор 7. Охолоджена відпрацьована суміш зливається в збірник 11 і в подальшому використовується як органічне добриво. Завантаження сировини може відбуватись один раз або декілька разів на добу. Відповідно, суміш у теплообміннику-утилізаторі та в змішувачі утримується певну кількість годин, що залежить від режиму роботи установки.

Другий напрямок утилізації здійснюється за допомогою встановлення теплообмінника-

осушувача отриманого біогазу 6, де відбувається нагрівання додаткової мережної води використанням теплоти утвореного біогазу, а також осушування біогазу, чим покращуються параметри спалювання, підвищується коефіцієнт корисної дії водогрійного котла 9 і понижується рівень шкідливих викидів у процесі спалювання біогазу. Частина біогазу подається компресором у виносний теплообмінник 4 для здійснення циркуляції, а частина – в пальник водогрійного котла.

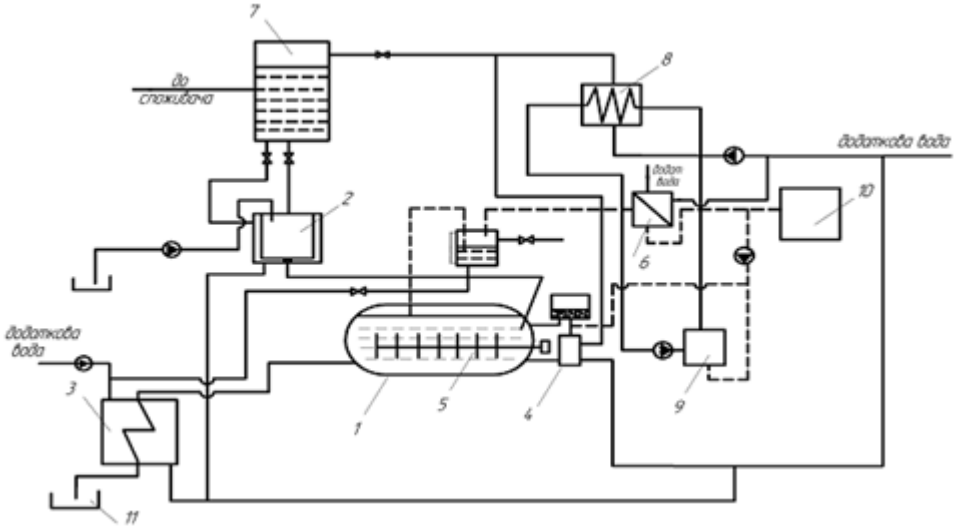

Рис. 1. Схема БГУ з утилізацією теплоти зброджено суміші і виробленого біогазу

В таких схемах важливо раціонально проектувати теплообмінники-утилізатори. Проектні та перевірні розрахунки для сумішей з обмеженою інформацією про теплофізичні властивості можна здійснювати використовуючи експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) [3 - 8]. Базовий стенд і методика вимірювань показані в [6, 8].

Для прикладу розглянемо схему БГУ з активним об'ємом реактора V_p = 20 м^3, двома варіантами теплоутилізаторів (рис. 2а, 2б). Теплоутилізатор висотою Н (рис. 2а) виконаний таким чином, що утворені робочі порожнини: внутрішня циліндрична з об'ємом V та зовнішня у вигляді кільцевого зазору. На внутрішній теплообмінній поверхні циліндричної форми розміщені по колу виступи, що обмежують розвиток теплового і гідродинамічного граничного шару. Теплообмінник працює у напівпроточному режимі. Тепла (гаряча) суміш з реактора при вивантаженні заповнює зовнішню ємність 1 і знаходиться в ній до наступного вивантаження-завантаження реактора $\tau_{в-з}$. За цей час суміш охолоджується проточною водою від температури в реакторі t_c' до деякої заданої кінцевої температури t_c'' через теплообмінну поверхню 2. Тобто теплота суміші передається воді і вводиться в теплову схему БГУ. В даному випадку у внутрішній і зовнішній ємностях теплообмін відбувається за умов природної конвекції.

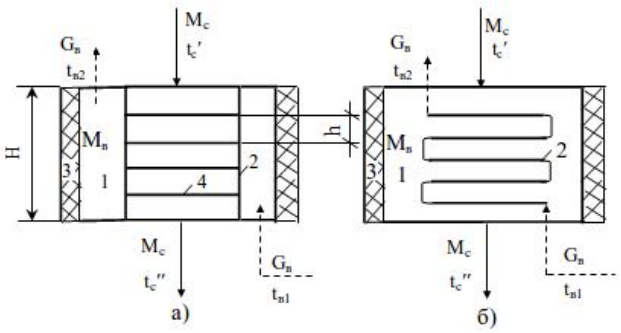

Рис. 2. Принципова схема утилізатора а) ТУ із циліндричною поверхнею теплопередачі; б) ТУ із змійовиковою поверхнею теплообміну: 1 – зовнішня циліндрична ємність; 2 – теплообмінна поверхня; 3 – ізоляція; 4 – виступи.

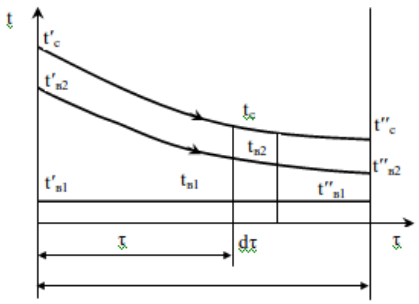

Рис.3. Зміна температур суміші і води за часом в ТУ

В теплоутилізаторі (рис. 2б), вода, що нагрівається, рухається всередині труби, а суміш в міжтрубному просторі витримується час $\tau_{в-з}$. В міжтрубному просторі відбувається постійний рух суміші відносно труб, який створюється мішалкою, що обертається зі сталою кутовою швидкістю. При цьому лінійна швидкість суміші відносно труб згідно біотехнологічних вимог не перевищує 0,6

м/с. При такій схемі ТУ теплообмін до води і в міжтрубному просторі здійснюється шляхом вимушеної конвекції. За результатами наших досліджень виявлено, що для розрахунку теплообміну в потоках субстратів (сумішей) і у великому об‘ємі при повздовжньому омиванні теплообмінної поверхні сумішшю (рис. 2б) можна рекомендувати одну і ту ж відому критеріальну залежність [6, 7].

Вважаємо, що вода в теплоутилізатори (рис. 2а і 2б) входить на протязі циклу $\tau_{в\text{-}з}$ зі сталою температурою $t_{в1}$ і виходить з температурою $t_{в2}$, яка змінюється в часі. Якісна картина зміни температур суміші і води показана на рис. 3.

На рис. 3 позначені температури на початку процесу охолодження, в процесі та в кінці процесу відповідно: t_c', t_c, t_c'' - температура суміші; $t_{в1}'$, $t_{в1}$, $t_{в1}''$ - температура води на вході в ТУ; $t_{в2}'$, $t_{в2}$, $t_{в2}''$ - температура води на виході із ТУ. Особливістю такого нестаціонарного теплообміну є те, що з часом температури непроточного грійного теплоносія (суміші) і проточної (води), що нагрівається зменшуються.

Рівняння теплопередачі і теплового балансу для всієї поверхні теплообміну F за інтервал часу $d\tau$ має вигляд

$$dQ = k \cdot F \cdot \bar{\Delta t} \cdot d\tau = G_B \cdot C_B \cdot (t_{в1} - t_{B2}) d\tau = M_C \cdot C_C \cdot dt_C \qquad (1)$$

де $\bar{\Delta}t$ - середня різниця температур між теплоносіями в момент часу τ; dt_c - величина зміни температури суміші за проміжок часу $d\tau$; k - коефіцієнт теплопередачі від суміші через поверхню F до води в момент часу τ; $C_в$, C_c - відповідно теплоємність води і суміші в момент часу τ; M_c - маса суміші у кільцевому зазорі (рис. 2а) циліндричній ємності (рис. 2б) ТУ; $M_c = \rho_c \cdot V_{ТУ}$.

Температурний напір Δt в момент часу τ розраховується як середньологарифмічна різниця температур

$$\bar{\Delta t} = \frac{t_{B2} - t_{в1}}{\ln \dfrac{t_C - t_{в1}}{t_C - t_{B2}}} \qquad (2)$$

Коефіцієнт теплопередачі осереднений по поверхні теплопередачі F і відповідно за час $\tau_{в\text{-}з.}$ визначається за відомим рівнянням

$$k = \psi_з \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}, \qquad (3)$$

α_1 - коефіцієнт тепловіддачі від суміші до поверхні теплообміну усереднений по поверхні теплообміну і відповідно за проміжок часу $\tau_{в\text{-}з}$ і температур (t_c'…t_c) і (t_c'…t_c''); α_2 - коефіцієнт тепловіддачі від поверхні теплообміну до води, що нагрівається, усереднений по поверхні теплообміну і відповідно за проміжок часу $\tau_{в\text{-}з}$ і температур ($t_{в1}$…$t_{в2}$) і ($t_{в1}$…$t_{в2}''$); $\delta_{ст}$, $\lambda_{ст}$ - відповідно товщина стінки, теплопровідність матеріалу стінки; $\psi_з$ - коефіцієнт зниження коефіцієнта теплопередачі у зв’язку із забрудненням поверхні теплообміну.

Для визначення коефіцієнтів тепловіддачі від поверхні теплообміну до води α_2 у різних режимах теплообміну достатньо методичних рекомендацій і надійних залежностей [6, 7]. Проблеми виникають в разі визначення інтенсивності теплообміну між поверхнею теплообміну і сумішшю з обмеженою інформацією про теплофізичні властивості.

Авторами визначені поверхні теплообміну та коефіцієнти тепловіддачі від суміші до поверхні теплообміну α_1 з використанням ЕРМ. Для розрахунків вибрані різні види органічних сумішей вологістю 90% і температурою 20…55 °С. Виконані конструктивні розрахунки напівпроточного коаксіального утилізатора (рис.2а) та із змійовиковою поверхнею теплообміну (рис.2б). При цьому визначені основні конструктивні параметри теплообмінників: площа поверхні теплообміну F, внутрішній діаметр циліндричної ємності D, висота H та загальна довжина труб теплообмінника L відповідно до діаметра d. Площа поверхні теплообміну в напівпроточному коаксіальному утилізаторі в 6- 7 разів більша за площу теплообмінника в утилізаторі, який має змійовикову поверхнею теплообміну (рис. 2б).

Проведено чисельний експеримент. При цьому побудовані залежності площі змійовикового теплообмінника і температури води на виході з ТУ, від витрати води $G_в$, які розраховані з використанням рівнянь (1 – 3) та ЕРМ. Отже, використання ЕРМ дозволяє вибрати поверхню теплообмінника-утилізатора, яка задовольнить технологічну потребу у воді із заданою температурою.

Також визначені параметри роботи теплообмінників t_c та $t_в$ у часі для прийнятих конструктивних параметрів d, L, F. Виявлено, що спроектовані теплообмінники для утилізації

теплоти різних сумішей забезпечують вирішення проблеми утилізації теплоти в БГУ. На основі побудованих залежностей встановлено, що найбільш доцільна в даному випадку принципова схема ТУ (рис. 2б) для утилізації теплоти відпрацьованої суміші, коли із конструктивних міркувань не потрібно збільшувати поверхню теплообміну.

Висновки

1. Застосування ЕРМ дозволило виконати проектні розрахунки теплообмінників та виявити доцільні конструкції теплообмінників-утилізаторів і їх режими роботи.
2. Експериментально-розрахунковий метод дозволяє вибрати з врахуванням технологічної потреби у воді певної температури необхідну поверхню теплообміну.
3. Площі поверхонь теплообміну ТУ з вимушеною конвекцією для утилізації теплоти субстратів в 6…7 разів менші за площі поверхонь ТУ за умов природної конвекції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С.Й. Енергоефективні схеми біогазових установок з утилізацією теплоти / С.Й. Ткаченко, Н.В. Резидент, І.В. Буженко // Энергосбережение. – 2009. – № 2. – С. 11 – 13.
2. Патент України 41855 А, МПК7 С02F11/04. Установка для отримання біогазу/Ткаченко С.Й., Резидент Н.В., Пішеніна Н.В. Опубл. 10.06.2009. – К.: Промислова власність. – Бюл. №11. – 3с.
3. Ткаченко С. Й. Нові аспекти застосування теорії подібності в теплотехнічних розрахунках систем біоконверсії [Електронний ресурс] / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – №2. Режим доступу: https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/4423
4. Резидент Н.В. Застосування експериментально-розрахункового методу при розробці теплообмінного обладнання біоконверсії / Н.В. Резидент // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2009. – № 2. – С. 233 – 237.
5. Патент України на винахід № 97021, (51) МПК (2006.01) G01N 25/18. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші / Ткаченко С. Й., Пішеніна Н. В., Резидент Н. В; заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № a201005661; заявл. 11.05.2010; опубл. 26.05.2011, Бюл. № 2.
6. Ткаченко С.Й. Теплообмін в системах біоконверсії : монографія / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент. — Вінниця : ВНТУ, 2011. — 124 с.
7. Ткаченко С.Й. Тепловіддача до багатокомпонентного середовища в умовах вимушеної і природної конвекції / Ткаченко С.Й., Резидент Н.В. // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2006. – № 1. – С. 111 – 114.
8. Ткаченко С.Й. Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів: монографія / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна. — Вінниця : ВНТУ, 2017. — 124 с.

Ткаченко Станіслав Йосипович – д. т. н., професор кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: stahit6937@gmail.com

Резидент Наталія Володимирівна – к. т. н., доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: rezidentnv1@ukr.net

Ткачук Владислав Сергійович – студент групи ТЕ – 14б, факультет будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: fo_rrest@mail.ru

Stanislav Tkachenko – Dc. Sc.., Professor, Heat of the power system, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: stahit6937@gmail.com

Nataliya Rezydent – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of power engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rezidentnv1@ukr.net

Vladyslav Tkachuk – student group TE – 14b, Faculty of Civil Engineering, Heat and Power engineering and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: fo_rrest@mail.ru