УДК 631.371

МІНІМІЗАЦІЯ ВИТРАТ ЕКСЕРГІЇ НА ЖИВЛЕННЯ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ ЕНЕРГІЄЮ

Д.т.н., професор, Ткаченко С.Й., аспірант Степанов Д.В.

Процес анаеробної переробки органічних відходів за допомогою біогазової установки (БГУ) є складним біо-хіміко-технологічним процесом. [1, 2]. Важливим питанням є побудова моделі для оптимізації такої системи. Велика кількість факторів та критеріїв визначають ефективність процесу, таким чином, зведення процесу визначення ефективності до згорнутого або узагальненого критерію не дозволить врахувати всієї гами часткових, але визначальних критеріїв якості технологічного процесу. Тому ми пропонуємо для проведення оптимізації використати задачу багатокритеріального аналізу складного технологічного процесу. В результаті вирішення якої повинна бути виділена множина, точки якої відповідають варіантам, що задовільняють всім висунутим обмеженням. До отриманої множини може бути визначений найліпший вектор оптимального розв'язку. Обмеження до системи поділяють на [3]:

- **Параметричні**, що мають вигляд : $\alpha_J^* \le \alpha_J \le \alpha_J^{**}$, $j = \overline{1,r}$,

де α_J^* , α_J^{**}, r - межі варіювання та кількість параметрів.

Для запропонованої біотехнологічної системи до параметричних обмежень можна віднести : розташування об'єкту, розміри установки, характеристики технологічного устаткування, параметри сировини, температурні режими тощо.

- **Функціональні**, що мають вигляд : $c_J^* \le f_L(\alpha) \le c_j^{**}$, $L = \overline{1,t}$,

де c_J^* , c_j^{**} , t - обмеження нормативного вигляду та їх кількість.

До функціональних обмежень (процесу біоконверсії) можна віднести : діапазон питомого виходу біогазу, який віднесений до одиниці об'єму реактора БГУ, рівень знешкодження збудників хвороб та насіння будяків тощо .

- **Критеріальні**, що мають вигляд :

$$\Phi_V(\alpha) \le \Phi_V^{**} \quad \text{або} \quad \Phi_V(\alpha) \ge \Phi_V^{**} , V = \overline{1,k} ,$$

де $\Phi_V(\alpha)$ - критерій якості варіанту ;

Φ_V** - найгірше значення критерію, на яке погоджується проектувальник ;

k - кількість локальних критеріїв, якими ми варіюємо.

Знак « ≤ » обирається у випадку, коли екстремізацію проводять у напрямку мінімізації, знак « ≥ » - якщо необхідно провести максимізацію критерію.

До критеріальних обмежень відносяться такі часткові критерії: ступінь перетворення органічних речовин, питомі приведені витрати ексергії на реалізацію технологічного процесу, матеріало- та енергомісткість, якість та ступінь очистки отриманого біогазу, ступінь видалення вуглекислого газу, кількість виробленої електричної та теплової енергії тощо.

Мета даної роботи – побудова БГУ як ефективного джерела енергії в кліматичних умовах України. Для досягнення цієї мети розглядаються методи зменшення питомих приведених витрат ексергії на організацію і проведення біотехнологічного процесу через мінімізацію витрат ексергії на живлення БГУ енергією. Питомі приведені витрати ексергії на організацію та проведення технологічного процесу мають вигляд :

$$E^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{G_{біог} \cdot Q_H^P}$$

Оптимізацію по цьому критерію можна проводити в два етапи :

1) приймаючи до уваги тільки витрати енергетичного характеру (витрати енергії на живлення установки тепловою та електричною енергією), без урахування капітальних витрат на обладнання.

$$E^{EH} = \frac{E_1^{EH} + E_2^{EH} + \cdots + E_i^{EH} + \cdots + E_m^{EH}}{G_{біог} \cdot Q_H^P} \quad ;$$

2) приймаючи до уваги всі витрати при реалізації процесу (витрати енергетичного характеру, капітальні витрати на устаткування (посудини, нагнітачі, перемішувальні пристрої, трубопроводи), витрати на заробітну плату, амортизаційні відрахування, утилізацію установки тощо.

$$\overline{E} = \frac{E_1 + E_2 + \cdots + E_i + \cdots + E_n}{G_{біог} \cdot Q_H^P}$$

Одну з складових чисельника останнього виразу “приведені витрати ексергії на живлення біогазової установки енергією” будемо розглядати згідно принципу центрального домінування : підсистема живлення установки є окремою складовою БГУ і не має суттєвого впливу на інші підсистеми, з іншого боку мінімізація витрат на живлення дозволяє підтримувати оптимальні значення визначальних параметрів. Таким чином, мінімізація приведених витрат ексергії на живлення БГУ енергією призводить до отримання визначеної кількості вихідного продукту (біогазу) при менших витратах на реалізацію процесу, тобто до підвищення ефективності системи взагалі.

Процес анаеробної переробки органічних речовин, що проходить в біогазовій установці (БГУ), споживає певну кількість енергії. А саме: теплової енергії для підтримання термостабільності в робочих ємкостях та механічної енергії для здійснення постійного перемішування і переміщення матеріальних потоків субстрату, шламу, теплоносіїв тощо [1, 2, 4, 5].

Згідно літературної інформації ще не проведено оптимізацію схем живлення БГУ енергією в умовах роботи установок в складі теплотехнологічних систем та комплексів, що не дозволяє в ряді випадків зробити біогазову установку енергоефективною, тобто перетворити її з споживача на постачальника енергії.

При здійсненні процесу живлення БГУ енергією використовується певна сукупність обладнання, що характеризується відповідним апаратурно-схемним оформленням [1, 2, 4], тому для визначення оптимальної схеми нами запропоновано проводити мінімізацію витрат ексергії на живлення БГУ, використовуючи дворівневу структуру оптимізації. В основу покладено ітерактивний метод синтезу. Формування ланцюгів живлення рекомендується проводити евристичними методами з подальшим аналізом гіпотетично сформованих схем за допомогою розрахункових приведених витрат ексергії на живлення БГУ енергією.

Схема живлення біогазових установок енергією залежить в першу чергу від наявності та типів джерел енергії, що можуть бути використані для поста-

чання БГУ. Системи анаеробної переробки можуть встановлюватись на «хвості» цукрових заводів та інших підприємств харчової промисловості, на базі підсобних господарств промислових підприємств, в селянському подвір'ї. [4,5,6].

В кожному конкретному випадку схема живлення енергією буде мати свої, часом суттєві, особливості.

Можливі джерела енергії, що реально використати для живлення БГУ класифікуються згідно рис. 1.

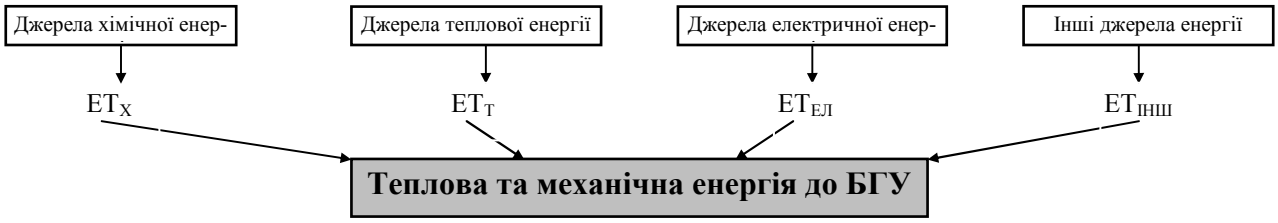


Рис. 1. Узагальнена схема енергетичних потоків живлення БГУ

Основною узагальнюючою одиницею в схемі є елемент підводу та трансформації енергії ЕТ. Такий елемент являє собою сукупність максимально можливої кількості різних ланцюгів перетворення ресурсів з визначеними параметрами в потік енергії з параметрами, які вимагає технологічний процес переробки органічних відходів. Представимо деякі з можливих елементів підводу та трансформації енергії (рис. 2).

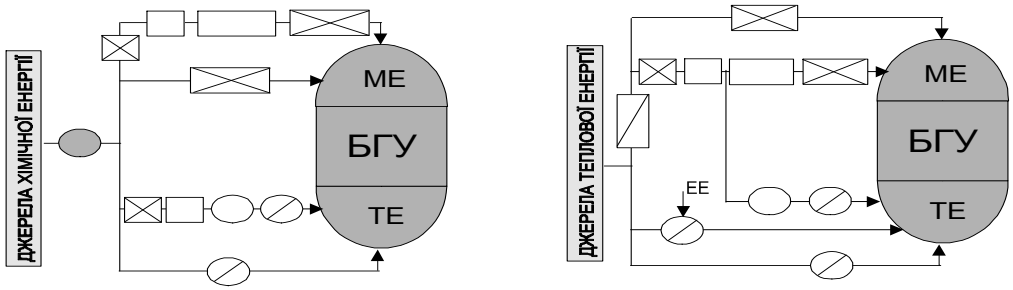


Рис.2. Елемент трансформації : а) джерела хімічної енергії $Ет_{х}$;
б) джерела теплової енергії $Ет_{т}$

Умовні позначення: - перетворювач хімічної енергії палива в теплову та механічну енергію потоку відхідних газів;

- перетворювач теплової в механічну ;
- перетворювач механічної енергії в електричну;
- перетворювач електричної енергії в теплову;
- перетворювач електричної енергії в механічну;
- трансформатор електричної енергії ;
- трансформатор теплової енергії ;
- трансформатор механічної енергії .

Останнім кроком в процесі формування схеми живлення БГУ є вибір відповідного ланцюга підводу та перетворення енергії, який складається з окремих видів устаткування, що підбирається виходячи з технологічних вимог. До такого устаткування відносяться теплообмінники, гідро- та електромуфти, електротени, теплові насоси, редуктори, турбіни, детандери тощо.

Мінімізацію витрат ексергії на живлення БГУ з вибраним температурним режимом, конструкцією та поверхнею теплообмінного пристрою, характеристиками та розмірами теплової ізоляції доцільно проводити, використовуючи дворівневу структуру: 1) вибір оптимального ланцюга від кожного з можливих джерел до БГУ; 2) вибір оптимального джерела з мінімальною витратою ексергії на живлення БГУ енергією [7].

В процесі аналізу гіпотетично сформованих схем на передпроектних етапах роботи доцільно визначати такий критерій якості системи як «приведені витрати ексергії на живлення БГУ тепловою енергією» згідно формули:

$$\mathbf{E_{ЖИВ} = E_{ЕН} + E_{ПІД} + E_{ТРАНС} + E_{ТО}} \quad , \qquad (1)$$

де $\mathbf{E_{ЕН}}$ - витрати ексергії на отримання енергоносія, кДж/ рік. Цей доданок може визначатись за формулами :

При живленні від електрокотла: $\mathbf{E_{ЕН}} = (Q + Q_{ВТР}) \cdot К_{ЕЛ} \cdot К_{ЕЛ}^{ЗДЕШ} / \eta_{ЕК}$, (2)

де Q – кількість енергії необхідна для підтримання термостабільності, тобто така, якої достатньо для раціональної організації процесів біоконверсії в даному температурному режимі при певних характеристиках установки), кДж/ рік ;

$Q_{ВТР}$ – кількість теплоти, що втрачається через стінки трубопроводів та баків-акумуляторів, кДж/рік ;

$К_{ЕЛ}$ – ексергетична вартість одиниці електричної енергії, кДж / кДж ;

$К_{ЕЛ}^{ЗДЕШ}$ – коефіцієнт, що враховує зміну вартості електричної енергії в різні відрізки доби ;

$\eta_{ЕК}$ – ККД перетворення електроенергії в теплову енергію в електрокотлі .

При живленні від котла на біогазі : $\mathbf{E_{ЕН}} = (Q + Q_{ВТР}) / \eta_{БК}$, де (3)

$\eta_{БК}$ – ККД котла на біогазі .

У випадку живлення БГУ від бросового джерела доданок $\mathbf{E_{ЕН}}$ не враховується.

$\mathbf{E_{ПІД}}$ – приведені витрати ексергії на підвід енергоносія до БГУ, кДж/ рік.

При живленні від джерел, що знаходяться у безпосередній близькості від БГУ цим доданком нехтуємо.

При живленні від джерел, що знаходяться на відстані від БГУ:

$$\mathbf{E_{ПІД} = E_{ТРУБ} + E_{ІЗОЛ}^{ТРУБ} + E_{НАГН} + E_{ЕЛ}} \quad , \qquad (4)$$

де $\mathbf{E_{ТРУБ}}$ – приведені витрати ексергії на трубопровід , кДж / рік :

$\mathbf{E_{ТРУБ}} = К_{ЕКСП} \cdot \pi \cdot d_{ТРУБ} \cdot L_{ТРУБ} \cdot \delta_{ТРУБ} \cdot \rho_{ТРУБ} \cdot e_{ТРУБ} \cdot К_{ТРУБ}^{ОБР} \cdot К_{МОНТ} / Т_{ОК}$, (5)

де $К_{ЕКСП}$ - коефіцієнт, що враховує експлуатаційні (поточні) витрати (окрім витрат на електроенергію) ;

$d_{ТРУБ}$, $e_{ТРУБ}$, $L_{ТРУБ}$, $\rho_{ТРУБ}$, $\delta_{ТРУБ}$ - діаметр, ексергетична вартість матеріалу, довжина, густина матеріалу та товщина стінки трубопроводу, відповідно м , кДж / кг, м , кг / $м^3$, м ;

$К_{ТРУБ}^{ОБР}$ – коефіцієнт, що враховує витрати на обробку матеріалу ;

$Т_{ОК}$ - строк окупності обладнання , років .

$\mathbf{E_{ІЗОЛ}^{ТРУБ}}$ – приведені витрати на ізоляцію трубопроводу, кДж / рік :

$$\mathbf{E_{ІЗОЛ}^{ТРУБ}} = K_{ЕКСП} \cdot \pi \cdot d_{ТРУБ} \cdot L_{ТРУБ} \cdot \delta_{ІЗ}^{ТРУБ} \cdot e_{ІЗ}^{ТРУБ} \cdot K_{МОНТ} / T_{ОК} \ , \qquad (6)$$

де $e_{ІЗ}^{ТРУБ}$, $\delta_{ІЗ}^{ТРУБ}$ – ексергетична вартість та товщина ізоляції, кДж / м^3, м ;

$\mathbf{E_{НАГ}}$ – приведені витрати ексергії на нагнітальний пристрій, кДж / рік :

$$\mathbf{E_{НАГ}} = K_{ЕКСП} \cdot N_{НАГ} \cdot e_{НАГ} \cdot K_{МОНТ} / T_{ОК} \ , \qquad (7)$$

де $N_{НАГ}$, $e_{НАГ}$ – потужність та питома ексергетична вартість нагнітача, відповідно кВт , кДж / кВт ;

$\mathbf{E_{ЕЛ}}$ – приведені витрати ексергії на живлення нагнітачів енергією, кДж/рік :

$$\mathbf{E_{ЕЛ}} = K_{РІК} \cdot N_{НАГ} / K_{ЕЛ} \ , \qquad (8)$$

де $K_{РІК}$ - коефіцієнт переводу, сек / рік ;

$\mathbf{E_{ТРАНС}}$ – приведені витрати ексергії на трансформацію енергії, кДж/ рік .

В цей пункт включаються витрати на устаткування для трансформації енергії (біогазові та електричні котли, баки-акумулятори, електротени, тризонні

лічильники енергії тощо).

При живленні від електрокотла:

$$\mathbf{E_{ТРАНС}} = K_{ЕКСП} \cdot K_{МОНТ} \cdot (Q + Q_{ВТР}) \cdot e_{ЕК} / (T_{ОК} \cdot \eta_{ЕК}) \ , \qquad (9)$$

де $e_{ЕК}$ - питома ексергетична вартість електрокотла, кДж/ кВт .

При живленні від котла на біогазі:

$$\mathbf{E_{ТРАНС}} = K_{ЕКСП} \cdot K_{МОНТ} \cdot (Q + Q_{ВТР}) \cdot e_{БК} / (T_{ОК} \cdot \eta_{БК}) \ , \qquad (10)$$

де $e_{БК}$ – питома ексергетична вартість біогазового котла, кДж/ кВт .

При живленні від баків-акумуляторів (Б-А) із використанням тризонних лічильників електроенергії : $\mathbf{E_{ТРАНС} = E_{Б\text{-}А} + E_{Б\text{-}А}^{ІЗОЛ} + E_{ЕТ} + E_{ЛІЧ}}$, (11)

$\mathbf{E_{Б\text{-}А}}$ – приведені витрати ексергії на виготовлення Б-А, кДж / рік :

$$\mathbf{E_{Б\text{-}А}} = K_{ЕКСП} \cdot K_{МОНТ} \cdot F_{Б\text{-}А} \cdot \delta_{Б\text{-}А} \cdot \rho_{Б\text{-}А} \cdot e_{Б\text{-}А} \cdot K_{Б\text{-}А}^{ОБР} / T_{ОК} \ , \qquad (12)$$

де $F_{Б\text{-}А}$, $\delta_{Б\text{-}А}$, $\rho_{Б\text{-}А}$, $e_{Б\text{-}А}$ – площа поверхні стін , товщина стінки, густина матеріалу та ексергетична вартість Б-А, відповідно м^2 , м, кг/м^3, кДж/ кг ;

$K_{Б\text{-}А}^{ОБР}$ – коефіцієнт, що враховує витрати на обробку матеріалу .

$\mathbf{E_{Б\text{-}А}^{ІЗОЛ}}$ – приведені витрати ексергії на ізоляцію Б-А, кДж/ рік :

$$\mathbf{E_{Б\text{-}А}^{ІЗОЛ}} = К_{ЕКСП} \cdot К_{МОНТ} \cdot F_{Б\text{-}А} \cdot \delta_{Б\text{-}А}^{ІЗОЛ} \cdot e_{Б\text{-}А}^{ІЗОЛ} / T_{ОК} \qquad (13)$$

де $\delta_{Б\text{-}А}^{ІЗОЛ}$, $e_{Б\text{-}А}^{ІЗОЛ}$ – товщина та ексергетична вартість ізоляції Б-А, м , кДж/м^3.

$E_{ЕТ}$ – приведені витрати ексергії на електротени, кДж / рік :

$$\mathbf{E_{ЕТ}} = К_{ЕКСП} \cdot К_{МОНТ} \cdot К_{ЧАСУ} \cdot (Q + Q_{ВТР}) \cdot e_{ЕТ} / (T_{ОК} \cdot \eta_{ЕТ}) \ , \qquad (14)$$

де $e_{ЕТ}$, $\eta_{ЕТ}$ – питома ексергетична вартість та ККД електротенів, кДж / кВт ;

$К_{ЧАСУ}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення номінальної потужності електротенів через нецілодобову їх роботу.

$E_{ЛІЧ}$ – приведені витрати на тризонний лічильник електроенергії, кДж/ рік .

$E_{ТО}$ – приведені витрати на теплообмінний апарат системи термостатування, кДж/ рік. Цей доданок визначається за формулою :

$$\mathbf{E_{ТО}} = К_{ЕКСП} \cdot К_{МОНТ} \cdot F_{ТО} \cdot \delta_{ТО} \cdot \rho_{ТО} \cdot e_{ТО} \cdot К_{ТО}^{ОБР} / T_{ОК} \ , \qquad (15)$$

де $F_{ТО}$ - площа поверхні теплообмінного апарату, м^2 ;

$\delta_{ТО}$ - товщина стінки поверхні теплообміну апарату, м ;

$\rho_{ТО}$ - густина матеріалу теплообмінника, кг /м^3 ;

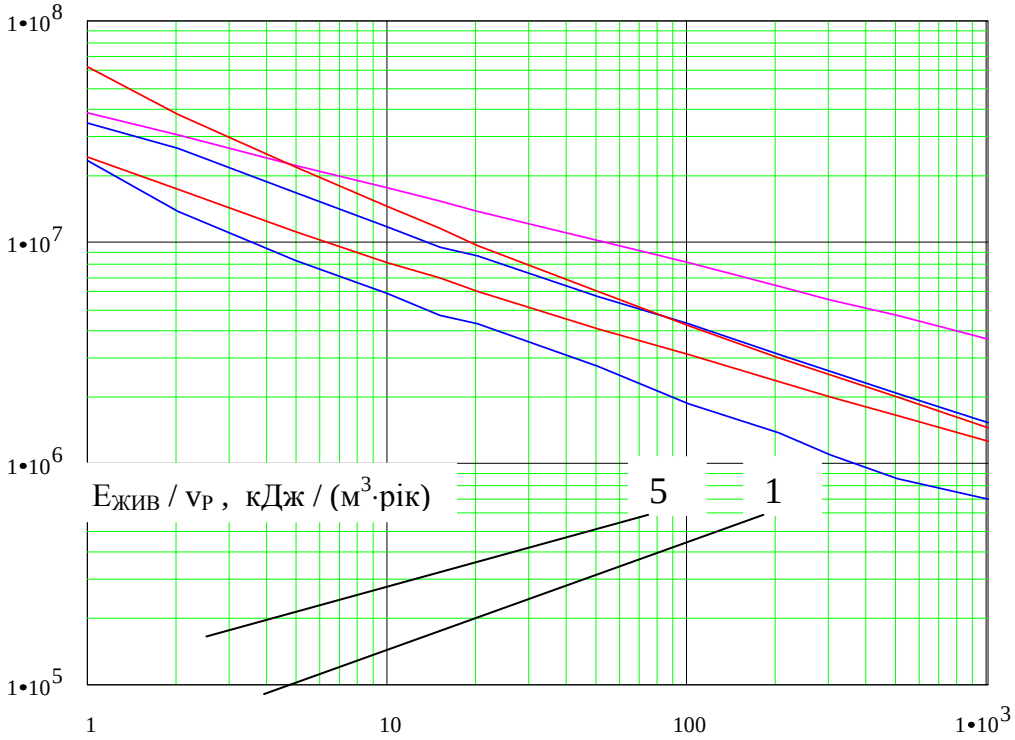
$e_{ТО}$ - ексергетична вартість матеріалу теплообмінника, кДж/ кг ;

$К_{ТО}^{ОБР}$ – коефіцієнт, що враховує витрати на обробку матеріалу .

Запропонована методика може бути використана для визначення ефективності живлення БГУ при підводі теплової енергії від централізованих систем електро- та газопостачання за допомогою відповідних котлів; при живленні БГУ тепловою енергією від ТЕЦ підприємства, на базі якого працює установка; при підводі теплової енергії від вторинних, або бросових джерел низькопотенціальної енергії з використанням установок термотрансформації; при термостатуванні реактору від системи охолодження дизель-генераторної установки; при виробітку теплової енергії за рахунок отриманого біогазу із використанням біогазових котлів; при живленні БГУ тепловою енергією, що закумульована в господарстві за допомогою Б-А і поповнюється за рахунок здешевленої в час « провалу » електроспоживання енергії та при інших варіантах живлення установки тепловою енергією для підтримання термостабільності в процесі анаеробної ферментації.

Для того, щоб зробити метод « прозорим » продемонструємо його на прикладах спрощеної постановки задачі мінімізації витрат ексергії на живлення біогазової установки тепловою енергією. Але слід відмітити, що прийняте спрощення не впливає кардинально на висновки, отримані з розрахунків.

Використовуючи дану методику був проведений числовий експеримент при таких початкових умовах : біогазова установка переробляє відходи тваринницького господарства; температурний режим мезофільний ; теплоносій – вода; кількість енергії, яка необхідна для забезпечення термостабільності та витрата теплоносія визначені з рівнянь теплового балансу реактору та аналізу температурних полів всередині реактору; температура навколишнього середовища прийнята $t_{НС}$ = 0 ^{0}C; теплоізоляційний матеріал мінераловатні мати (відповідає умовам критичного діаметру теплоізоляції); розміри теплообмінника, товщина ізоляції трубопроводів та бака-акумулятора визначаються за допомогою стандартної задачі оптимізації; ККД отримання електроенергії $К_{ЕЛ}$ = 0,24 [8, 9] ; ККД котла на біогазі прийнятий в розмірі 0,8 ; коефіцієнт переводу прийнятий згідно інженерних міркувань $К_{РІК}$ = 31 500 000 с/рік ; термін окупності обладнання прийнятий $Т_{ОК}$ = 5 років, матеріал трубопроводів, Б-А та теплообмінника – сталь $е_{ТРУБ} = е_{ТО} = е_{Б\text{-}А}$ = 80 000 кДж/кг [8]; питомі ексергетичні вартості устаткування, теплоізоляції та коефіцієнти обробки матеріалу знайдені за допомогою зрізу цін та коефіцієнтів переводу грошових одиниць в ексергетичної вартості



0^6 кДж / кВт

$е_{БК}$ = 8 200

енергії $Е_{ЛІЧ}$

коефіцієнти

Рис. 3. Залежність питомих приведених витрат ексергії на живлення БГУ $E_{жив}$ від об'єму реактора v_P для різних варіантів живлення *Позначення на рис. 3*: Лінія 1 характеризує сумарні витрати для варіанту живлення бросовою енергією з відстані 500 м із використанням додаткового насосу для повернення носія в вихідну ємкість. Крива 2 характеризує приведені витрати для варіанту живлення бросовою енергією, джерело якої знаходиться на відстані 1500 м і підводиться вона самотоком при наявному перепаді тиску 50 кПа. Лінія 3 характеризує приведені витрати для варіанту живлення за допомогою котла на біогазі, що знаходиться на відстані 50 м від БГУ, для циркуляції носія використовується додатковий насос. Лінія 4 характеризує приведені витрати для варіанту живлення за допомогою електрокотла, що знаходиться в безпосередній близькості від реактора БГУ. Крива 5 характеризує приведені витрати для варіанту живлення за допомогою бака-акумулятора, що знаходиться на відстані 100 м від реактора (із використанням циркуляційного насосу) та тризонного лічильника електроенергії.

По результатах графіка на рис. 3 видно, що найбільш ефективним варіантом живлення БГУ тепловою енергією з запропонованих є використання бросової енергії з відстані 1500 м самотоком (лінія 2). Дещо менш ефективним є варіант використання котла на біогазі (лінія 3). Найбільші приведені витрати для установок з об′ємом реактора до 6 м^3 має варіант використання бака-акумулятора з тризонним лічильником електроенергії (лінія 5), але при об'ємах реактора більше 6 м^3 найбільших приведених витрат ексергії потребує система живлення із використанням електрокотла (лінія 4). Значення приведених витрат ексергії, що супроводжують процес живлення БГУ бросовою тепловою енергію з джерела, що знаходиться на відстані 500 м від реактору БГУ (із поверненням теплоносія в вихідну ємкість за допомогою циркуляційного насосу в 1,5 – 2,5 рази більші за витрати на найбільш ефективний варіант, але в 2 – 3 рази менші за витрати на найгірший за розробленим критерієм варіант.

У висновку слід відмітити, що для такого складного біо-хіміко-технологічного процесу як анаеробна переробка органічних відходів оптимізацію проводити раціонально із використанням багатокритеріальних методів. Одним з визначальних критеріїв якості системи є показник ефективності теплозабезпечення установки. В даній роботі запропоновано використати в якості такого критерію «приведені витрати ексергії на живлення БГУ тепловою енергією», представлена методика мінімізації запропонованого показника якості, яка має дворівневу структуру. Авторами проведений числовий експеримент по визначенню відповідного критерію при різних варіантах забезпечення установки тепловою енергією. На основі результатів побудована залежність питомих приведених витрат ексергії (віднесених до 1 $м^3$ реактора) на здійснення процесу живлення установки тепловою енергією від об′єму реактора установки при різних варіантах схем живлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Баадер Б., Доне Е., Брендерфер М. Биогаз: Теория и практика. -М. : Колос, 1982. –148с.

2. Гюнтер Л.И., Гольдфарб Л.Л. Метантенки. -М.:Стройиздат, 1991. -128 с.

3. Соболь И.М., Статников Р.Б. Вібор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. –М: Наука, 1981. - 110 с.

4. Оцінка енергетичної ефективності біогазової установки. Ткаченко С.Й., Ларюшкін Є.П., Нудель Г.О., Таргоня В.С. //Вісник ВПІ, 1998, №2,с.48-55.

5. Дубровский В.С., Виестур У.Э. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов. -Рига: Зинатке, 1988. -204 с.

6. Гаряжа В.Т. и др. Использование вторичных энергоресурсов пищевых производств /В.Т. Гаряжа, П.С. Матвиенко, В.А. Фесик. -К.: Техніка, 1982. -183 с.

7. Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.П. Принципы математического моделирования химико-технологических систем. (Введение в системотехнику химических производств). –М.: Химия, 1974. –344 с.

8. Янтовский Е.И. Потоки энергии и эксергии. –М.: Наука, –1988. – 144 с.

9. Эксергетические расчеты технических систем: Справочное пособие /Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др. : под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. АН УССР. Ин - т технической теплофизики. -Киев: Наукова думка, 1991.-360 с.