

УДК 532.529.5

С. Й. Ткаченко, д. т. н., проф.; О. Ю. Бочкова; Н. Д. Степанова, к. т. н., доц.

## БІОГАЗОВА УСТАНОВКА ІЗ СИСТЕМОЮ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ КОНТУРІВ

*Проаналізовано проблеми термостабілізації і перемішування в біогазовій установці (БГУ) з урахуванням особливостей життєдіяльності метаноутворювальних бактерій. Запропоновано і проаналізовано ерліфтний метод організації циркуляції в системі, що забезпечує рівномірне підведення теплоти й перемішування з урахуванням мікробіологічних особливостей анаеробного процесу.*

**Ключові слова:** біореактор, складна суміш, двофазні потоки, високов'язкі рідини, ерліфтний метод, біогазова установка, термостабілізація, енергоефективність.

### Вступ

На питомий вихід біогазу впливають вид технологічної схеми БГУ, якість термостабілізації, спосіб та інтенсивність перемішування, співвідношення вуглецю й азоту, водневий показник субстрату перед реактором і в реакторі, наявність інгібіторів процесу, швидкість обігу речовини тощо [1].

Питання стабілізації температурних режимів у реакторі біогазової установки ускладнене необхідністю врахування мікробіологічних особливостей анаеробних процесів. Перепади температури негативно впливають на хід процесу біоконверсії, тому необхідно поєднувати підведення теплоти на компенсацію теплових втрат біореактора з перемішуванням робочої сировини [2]. Для підведення теплової енергії до субстрату використовують внутрішні та виносні рекуперативні теплообмінні пристрої, контактні теплообмінники [3]. На етапі проектування системи біоконверсії теплообмінні пристрої в окремих випадках доцільно виносити за межі реактора, а тому виникає потреба в установці насосу для субстрату. При цьому слід урахувати чутливість бактеріального середовища до швидкості руху. Переміщення субстрату зі швидкістю більше 0,6 м/с знижує життєздатність метаноутворювальних бактерій, що може призвести до зменшення виходу біогазу [4]. У насосі утворюються ділянки, де лінійні швидкості рідини можуть перевищувати 0,6 м/с. Контроль за швидкостями за умов роботи насосу на цих ділянках у системі циркуляції ускладнений.

Для розв'язання проблеми перемішування і термостабілізації в біогазовому реакторі з урахуванням обмежень швидкостей субстрату ( $W_c \leq 0,6$  м/с) виникає потреба в забезпеченні циркуляції без використання насосу. Організувати циркуляцію можна за допомогою ерліфтного методу, що передбачає підведення частини біогазу нагнітальним пристроєм із реактора на ділянку, розташовану після теплообмінника. У цьому випадку можна керувати подачею біогазу в надставку і таким чином встановлювати задану лінійну швидкість субстрату.

**Мета дослідження** – розробка методу створення енергоефективної БГУ за умов об'єднання раціональних процесів термостабілізації і перемішування шляхом застосування контурів із теплообмінником і ерліфтною системою організації циркуляції.

### Основна частина

Запропонована нами циркуляційна система з ерліфтним методом організації циркуляції працює так (рис. 1 а) [5]. Субстрат по прямому трубопроводу 2 надходить у кожухотрубний теплообмінник 3, де його підігрівають грійною водою з температурою  $t_g$  до необхідної температури  $t_c$ . Біогаз подають із реактора 1 за допомогою нагнітальника 4 в надставку

теплообмінника 5, куди одночасно надходить підігрітий субстрат. У надставці створюється двофазний газорідний потік, густина якого менша за густину субстрату. Унаслідок різної ваги стовпа в біореакторі та в системі термостабілізації біогазової установки за умови однакової висоти стовпів можна забезпечити швидкість субстрату  $W_c \leq 0,6$  м/с. У надставці створюється тягова ділянка із двофазним середовищем довжиною  $L_{тяг}$  – і в системі виникає рушійний напір  $P_{руш}$ . Двофазну газорідну суміш направляють в сепаратор 6, після чого субстрат по зворотному трубопроводу 7 повертається в біореактор 1, а біогаз відводиться в газгольдер 8.

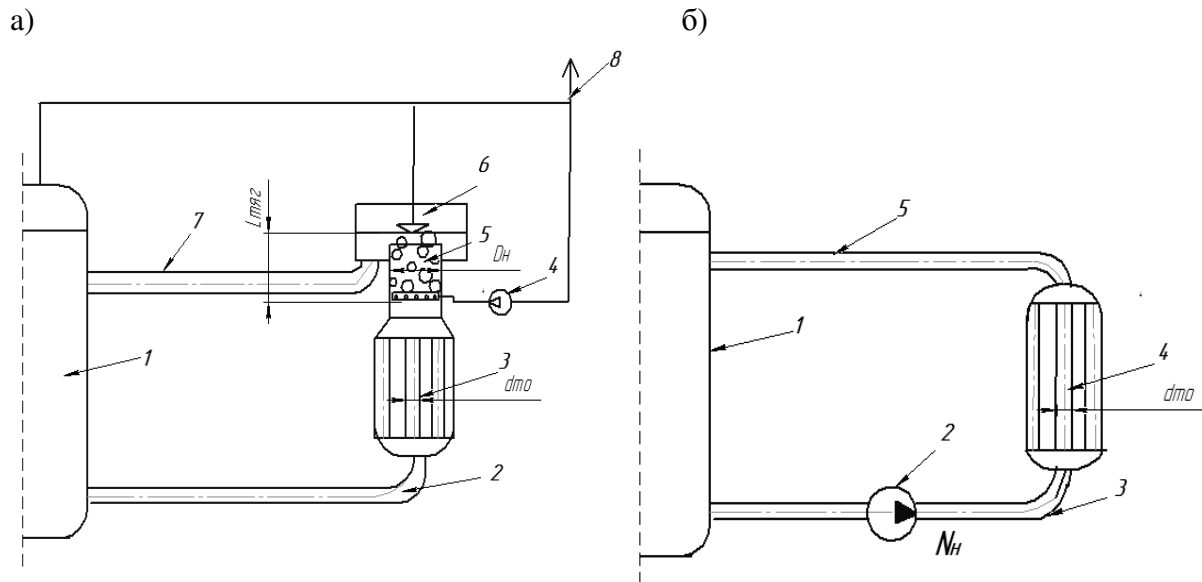


Рис. 1. а) схема циркуляційного контуру з теплообмінником і тяговою ділянкою:

1 – реактор, 2 – прямий трубопровід, 3 – теплообмінник, 4 – нагнітач біогазу,  
5 – надставка з тяговою ділянкою, 6 – сепаратор, 7 – зворотний трубопровід, 8 – у газгольдер;

б) схема циркуляційного контуру з теплообмінником і насосом з електричним двигуном:

1 – реактор, 2 – насос, 3 – прямий трубопровід, 4 – кожухотрубний теплообмінник,  
5 – зворотний трубопровід

За допомогою такої системи циркуляційних контурів (рис. 1 а), на наш погляд, можна розв'язати проблему перемішування субстрату й підведення теплоти для компенсації тепловтрат у реакторі [5]. Для аналізу енергоефективності такої системи було проведено її порівняння із системою з насосом.

Отже, для числового дослідження енергозатратності запропоновано такі варіанти системи термостабілізації БГУ:

1) систему з теплообмінником і надставкою (тяговою ділянкою) із нагнітачем біогазу (рис. 1 а);

2) система з теплообмінником і електродвигуном для насоса (рис. 1 б).

Для аналізу енергоспоживання цих систем застосовано математичні моделі для:

1) визначення виходу біогазу з біореактора певного об'єму за добу;

2) визначення тепловтрат біореактора в навколишнє середовище;

3) теплового розрахунку циркуляційного контуру з теплообмінником і ерліфтною тяговою ділянкою й у випадку використання системи з насосом;

4) гідравлічного розрахунку циркуляційного контуру з теплообмінником і ерліфтною тяговою ділянкою й у випадку використання системи з відцентровим насосом;

5) визначення частки біогазу на вироблення електричної енергії на привід нагнітача біогазу й насоса.

Для визначення виходу біогазу з біореактора за добу було проаналізовано роботу промислових біогазових установок таких фірм: “Колорадо-Біогаз” (США), “ЕНБОМ” (Фінляндія), “Біосистем” (Швеція), “Пекенжені-рінг” (Франція), “Нічимен корпорейшн” (Японія), “Клаухен” (Данія) [6]. У числових дослідженнях приймали, що з одиниці робочого об’єму реактора питомий вихід біогазу складає  $w=1-2,5 \text{ м}^3$  за добу, а отже, вихід біогазу з реактора об’ємом  $V_p$  за добу:

$$W = w \cdot V_p. \quad (1)$$

У цьому випадку вихід біогазу залежить від дотримання умов, що сприяють підвищенню життєздатності метаноутворювальних бактерій. За умови регулювання подачі біогазу в тягову ділянку теплообмінника й за рахунок конструктивних характеристик ерліфтної системи є можливість установити швидкість субстрату в усіх елементах системи термостабілізації (у прямому та зворотному трубопроводах, у трубах теплообмінника, у надставці з двофазною ділянкою) не більше 0,6 м/с.

Переважно для всіх значень об’єму біореактора  $V_p=10...1000 \text{ м}^3$ , прийнятих нами для дослідження, система термостабілізації з ерліфтным методом складалася з  $n$  циркуляційних контурів із теплообмінником. Теплообмінник, згідно з [7], складається з  $n$  апаратів-модулів. Установлення системи таких циркуляційних контурів дозволяє досягти рівномірного розподілення температури вздовж біореактора з урахуванням мікробіологічних особливостей процесу анаеробного збродження.

Математичні моделі для визначення тепловтрат біореактора та для теплового розрахунку апарата-модуля в контурі з ерліфтною надставкою і для контуру з насосом були побудовані із застосуванням відомих рівнянь теплового балансу й теплопередачі [8]. Проблему, що виникла під час математичного моделювання через труднощі визначення інтенсивності теплообміну в складних сумішах, було розв’язано за допомогою експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) [9].

Для створення математичної моделі гідравлічного розрахунку контуру з теплообмінником і ерліфтною тяговою ділянкою використано методу [10], адаптовану до умов роботи цього циркуляційного контуру. Рівняння балансу рушійних сил та гідравлічних опорів і рівняння матеріальних балансів, на яких ґрунтується зазначена методика, були уточнені нами через особливості контуру з теплообмінником і ерліфтным пристроєм (тяговою ділянкою).

У цьому контурі з ерліфтным теплообмінником і надставкою, де наявні кілька однофазних ділянок та одна двофазна ділянка, рівняння балансу рушійних сил і гідравлічних опорів має вид, Па:

$$P_{кор} = \sum \Delta P_{опір}, \quad (2)$$

де  $P_{кор}$  – корисний напір;  $\sum \Delta P_{опір}$  – сума втрат тиску на однофазних ділянках.

На однофазних ділянках контуру (у прямому і зворотному трубопроводах, у трубах теплообмінника) рівняння матеріального балансу має вигляд, кг/с:

$$G' = \rho' \cdot W_{0i}' \cdot \omega_i = const. \quad (3)$$

На двофазній ділянці контуру (тягова ділянка після теплообмінника), кг/с:

$$G_c' = \rho' \cdot W_0' \cdot \omega_{дф} + \rho'' \cdot W_0'' \cdot \omega_{дф} = const, \quad (4)$$

де  $G'$ ,  $G_c'$  – масові витрати субстрату і газорідної суміші (субстрат+біогаз);  $\rho'$ ,  $\rho''$  – густина субстрату і густина біогазу;  $W_0'$ ,  $W_0''$  – відповідно приведена швидкість руху субстрату і біогазу;  $\omega_i$  – площа  $i$ -тих живих перерізів однофазних ділянок;  $\omega_{дф}$  – площа живого перерізу двофазної ділянки (циліндричної надставки).

Корисний напір  $P_{кор}$ , Па, визначають з рівняння:

$$P_{кор} = P_{руш} - \Delta P_{заг}^{\partial\phi}, \quad (5)$$

де  $P_{руш}$  – рушійний напір;  $\Delta P_{заг}^{\partial\phi}$  – загальні втрати тиску на двофазній ділянці в надставці теплообмінника, Па:

$$\Delta P_{заг}^{\partial\phi} = \Delta P_{тр}^{\partial\phi} + \Delta P_{пр}^{\partial\phi} + \Delta P_{ваг}^{\partial\phi}, \quad (6)$$

де  $\Delta P_{тр}^{\partial\phi}$ ,  $\Delta P_{пр}^{\partial\phi}$ ,  $\Delta P_{ваг}^{\partial\phi}$  – втрати тиску на тертя, на прискорення й вагові втрати тиску.

Під час розрахунку гідродинамічних процесів у контурі виникли проблеми невизначеності теплофізичних властивостей (ТФВ) субстрату й розрахунку складників втрат тиску у двофазному вертикальному потоці, де рідина високов'язка.

Для замикання математичної моделі ТФВ субстрату були оцінені із застосуванням (ЕРМ).

В основу визначення складників перепаду тиску двофазного високов'язкого потоку покладено рівняння збереження енергії. Втрати тиску на тертя на двофазній ділянці визначали за рівнянням для високов'язких рідин за умов низького тиску [11]:

$$\Delta P_{тр}^{\partial\phi} = \Delta P_{тр1} \cdot \left[ 1 + \Psi \cdot \left( \frac{W_0''}{W_0'} \right) \right], \quad (7)$$

де  $\Delta P_{тр1}$  – втрати тиску в однофазному потоці, Па;  $\Psi$  – поправка на двофазність, яку визначають за критеріальним рівнянням для високов'язких двофазних течій.

Поправку  $\Psi$  розраховують згідно з [11]:

$$\Psi = 91,6 \cdot Fr_0^{-0,26} \cdot Fr_{см}^{-0,43} \cdot \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0,15} \cdot \left( \frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^{-0,12} \cdot Re_1^{-0,08}, \quad (8)$$

де  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – динамічна в'язкість рідинної і газової фази;  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  – густина рідинної і газової фаз; критерій Фруда суміші  $Fr_{см} = W_{см}/(g \cdot D)$ ; критерій Фруда  $Fr_0 = W_0/(g \cdot D)$ ; критерій Рейнольдса для рідини  $Re_1 = (W_0' \cdot D)/\nu_1$ ;  $W_{см}$ ,  $W_0$ ,  $W_0'$  – відповідно швидкість двофазної суміші, швидкість циркуляції і приведена швидкість рідини,  $D$  – діаметр труби з двофазною ділянкою,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\nu_1$  – кінематична в'язкість рідини.

Математична модель гідравлічного розрахунку циркуляційного контуру з насосом, коли в системі наявні лише однофазні ділянки трубопроводу, була побудована на основі відомих залежностей для розрахунку сумарних втрат тиску й витрати субстрату в контурі. Для розв'язання проблеми невизначеності ТФВ субстрату було застосовано ЕРМ [9].

Математична модель для визначення частки біогазу на вироблення електричної енергії на привід нагнітача біогазу і насосу складається із залежностей для витрат електричної потужності на привід нагнітача біогазу й насосу та інших відомих рівнянь за [13, 14], що представлено нижче в табл. 1.

### Результати дослідження

Для реалізації застосованих нами математичних моделей розглянуто конкретний приклад із такими вихідними даними: об'єм реактора  $V_p = 10 \dots 1000 \text{ м}^3$ ; температура субстрату в реакторі  $t_p = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температура навколишнього середовища  $t_{н.с.} = -4 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температура грійної води  $t_g = 47 \text{ }^\circ\text{C}$ ; рідина-субстрат ВРХ із вологістю 92 %; для визначення коефіцієнту тепловіддачі до субстрату  $\alpha_1$  застосовано ЕРМ; коефіцієнт тепловіддачі до повітря  $\alpha_2 = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; коефіцієнт тепловіддачі до грійної води визначали за відомими методиками [8]; теплопровідність сталі  $\lambda_{см} = 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ; теплопровідність ізоляції  $\lambda_{із} = 0,035 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ; товщина стінки реактора  $\delta_{см} = 35 \text{ мм}$ ; товщина ізоляції  $\delta_{із} = 500 \text{ мм}$ .

Основні залежності для оцінки й порівняння енергоефективності системи з нагнітачем біогазу із системою з насосом для субстрату наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Визначення частки біогазу на вироблення електричної енергії на організацію циркуляції в системі контурів БГУ**

Показники організації циркуляції, № п/п	Нагнітач біогазу в циркуляційній системі з теплообмінником і ерліфтом	Насос для перекачки субстрату в циркуляційній системі з теплообмінником
1.	$N_{нз} = \frac{Q'' \cdot P}{1000 \cdot \eta_{нз} \cdot \eta_{мех}}$	$N_{нс} = \frac{Q' \cdot P}{1000 \cdot \eta_{нс} \cdot \eta_{мех}}$
2.	$Q_{ел}^{нз} = N_{нз} \cdot 24$	$Q_{ел}^{нс} = N_{нс} \cdot 24$
3.	$Q_{те}^{нз} = (Q_{ел}^{нз} \cdot 3600) / \eta_{кес}$	$Q_{те}^{нс} = (Q_{ел}^{нс} \cdot 3600) / \eta_{кес}$
4.	$V_{бз}^{нз} = Q_{те}^{нз} / Q_{н}^p$	$V_{бз}^{нс} = Q_{те}^{нс} / Q_{н}^p$
5.	$\chi_{нз} = V_{бз}^{нз} / W$	$\chi_{нс} = V_{бз}^{нс} / W$
Пояснення до рівнянь	$Q''$ – об'ємна витрата біогазу, м <sup>3</sup> /с; $P$ – тиск біогазу в надставці, Па; $\eta_{нз}$ – ККД нагнітача ( $\eta_{нз}=0,6 \dots 0,75$ ) [12], у розрахунках приймали $\eta_{нз}=0,69$ ; $\eta_{мех}$ – механічний ККД ( $\eta_{н}=0,96$ ) [13]; $\eta_{кес}=0,38$ – ККД конденсаційної електричної станції $\eta_{кес}$ [15]	$Q'$ – об'ємна витрата субстрату, м <sup>3</sup> /с; $P$ – втрати тиску в контурі, Па; $\eta_{нс}$ – ККД насоса для субстрату ( $\eta_{нс}=0,49 \dots 0,6$ ), у розрахунках приймали $\eta_{нс}=0,55$ ) [14]; $Q_{н}^p$ – нижча теплота згорання біогазу, $Q_{н}^p=22000$ кДж/нм <sup>3</sup>

Показники організації циркуляції, наведені в табл. 1 (п. 1 – 5), для системи з нагнітачем біогазу, теплообмінником і ерліфтом та для системи з насосом для перекачки субстрату такі:

- 1) потужність на валу нагнітача, кВт;
- 2) витрата електричної енергії на електродвигун за добу, кВт·год;
- 3) необхідна кількість теплової енергії на добу вироблення електричної енергії згідно з п. 2 на конденсаційній станції, кДж;
- 4) витрата біогазу за добу на отримання теплоти  $Q_{те}^{нз}$  і  $Q_{те}^{нс}$ , нм<sup>3</sup>;
- 5) частка біогазу від кількості виробленого біогазу на БГУ, яка витрачається на електричну потужність відповідно для нагнітача біогазу і на насос для перекачки субстрату.

У результаті застосування вищеописаних в основній частині математичних моделей було визначено:

- теплові втрати з біореактора в навколишнє середовище залежно від його об'єму  $Q_{втр}=384 \dots 10624$  Вт;
- необхідну кількість циркуляційних контурів залежно від об'єму реактора з апаратами-модулями  $n_k=1 \dots 14$ ;
- основні конструктивні параметри теплообмінного апарата-модуля: діаметр труб у теплообміннику  $d_{то}=50$  мм; довжина труб  $L_{мп}=1700$  мм; діаметр надставки  $D_n=120$  мм; діаметр прямого трубопроводу  $d_1=106$  мм; діаметр зворотного трубопроводу  $d_2=106$  мм; довжина прямого трубопроводу  $l_2=1700$  мм; довжина зворотного трубопроводу  $l_2=2000$  мм; висота надставки  $L_{н.}=350$  мм;
- електричну потужність нагнітача біогазу  $N_{нз}=4,69 \dots 65,7$  Вт; електричну потужність електродвигуна відцентрового насосу  $N_{нс}=6,9 \dots 96$  Вт;
- частку виробленого біогазу, затрачену на вироблення електроенергії для електродвигуна нагнітача біогазу за  $w=1$  м<sup>3</sup> за добу –  $\chi=0,6 \dots 0,09$  %; частку біогазу, затрачену на вироблення електроенергії для електродвигуна нагнітача

біогазу за  $w=2,5 \text{ м}^3$  за добу –  $\chi=0,24\dots0,03 \text{ \%}$ ; частку біогазу, затрачену на вироблення електроенергії для електродвигуна насоса за  $w=1 \text{ м}^3$  за добу –  $\chi=0,9\dots0,12 \text{ \%}$ ; частка біогазу, затрачена на вироблення електроенергії для електродвигуна насоса за  $w=2,5 \text{ м}^3$  за добу –  $\chi=0,36\dots0,05 \text{ \%}$ .

Залежність частки біогазу на вироблення електричної енергії  $\chi$  від об'єму біореактора  $V_p$  графічно представлена у вигляді (рис. 2):

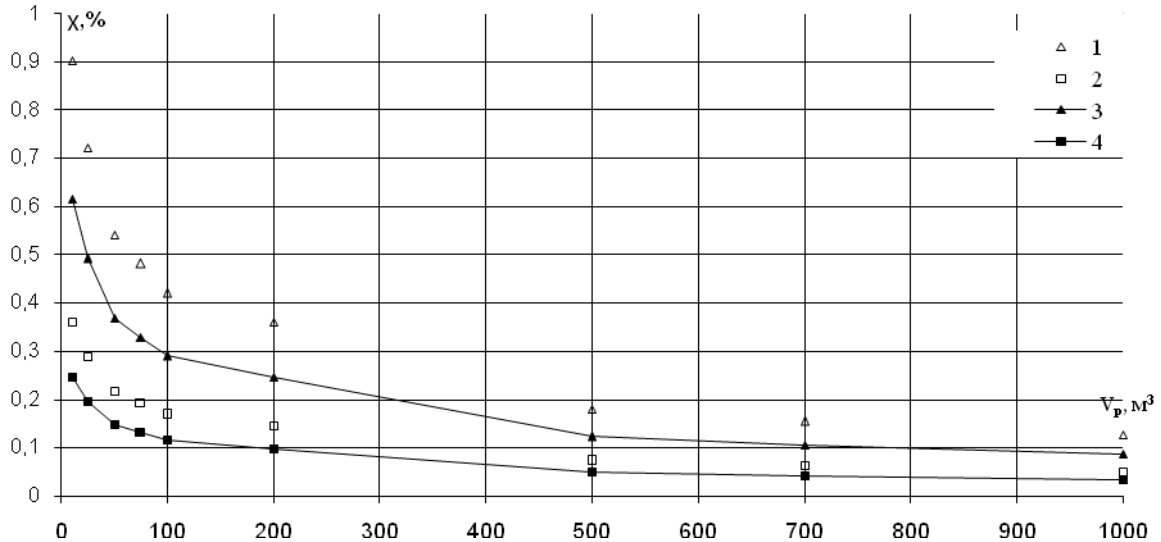


Рис. 2. 1 – нагнітач біогазу за  $w=1 \text{ м}^3$  за добу; 2 – нагнітач біогазу за  $w=2,5 \text{ м}^3$  за добу; 3 – насос за  $w=1 \text{ м}^3$  за добу; 4 – насос за  $w=2,5 \text{ м}^3$  за добу

У результаті аналізу рис. 2 під час порівняння ерліфтної системи й системи з насосом встановлено, що частка біогазу в разі застосування нагнітача біогазу є меншою, ніж за використання контура з насосом у 1,5...1,4 рази. У плані енергоспоживання ерліфтна система економічніша, крім того, вона враховує мікробіологічні особливості анаеробного процесу, а саме: обмеження стосовно швидкості руху субстрату ( $W_c \leq 0,6 \text{ м/с}$ ), що сприяє збільшенню виходу біогазу.

Нагнітач біогазу можна встановлювати один на всі циркуляційні контури БГУ. А в разі застосування системи з насосом для субстрату його необхідно встановлювати в кожному циркуляційному контурі. Такі невеликі нагнітачі для абразивних сумішей, як субстрат мають низький ККД, а нагнітачі біогазу мають вищий ККД [13,14].

Також перевагою системи контурів з ерліфтною надставкою й нагнітачем біогазу є відсутність контакту рухомих елементів обладнання із субстратом, на відміну від насосу. Перекачування субстрату у випадку застосування системи із насосом призводить до швидкого зносу його елементів.

## Висновки

Запропоновано систему з ерліфтным методом організації циркуляції, яка об'єднує процеси термостабілізації й перемішування в реакторі БГУ та дозволяє врахувати мікробіологічні особливості процесу. Порівняно цю систему із системою з теплообмінником і насосом.

Для аналізу енергоспоживання двох систем застосовано математичні моделі, за допомогою яких визначають: тепловтрати в біореакторі; інтенсивність теплообміну в складних сумішах із невизначеними реологічними й теплофізичними властивостями; характеристики двофазних течій складна суміш + біогаз; кількість теплообмінних апаратів-модулів; електричну потужність електродвигунів нагнітача біогазу й насосів для перекачки субстрату; частку біогазу на вироблення електричної енергії для нагнітача біогазу й для насосів у циркуляційному контурі.

У результаті дослідження встановлено, що витрати електричної енергії для системи з нагнітачем біогазу на 40 – 50 % менші, ніж для системи з насосами. Крім того, встановлені такі переваги ерліфтної системи організації циркуляції:

- 1) можливість урахування обмежень швидкостей субстрату на всіх ділянках контуру ( $W_c \leq 0,6$  м/с) подачею біогазу в надставку;
- 2) відсутність прямого контакту рухомих елементів нагнітача біогазу із субстратом;
- 3) можливість установа одного нагнітача біогазу на всі циркуляційні контури біореактора.

Результати досліджень рекомендовані до подальшого техніко-економічного аналізу з метою впровадження вертикальних циркуляційних контурів з ерліфтом методом організації циркуляції в практику створення енергоефективних природозберігальних БГУ.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С. Й. Наземні біогазові установки / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, Т. Ю. Румянцева // Науково-технічний збірник "Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві". – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2010. – № 2. – С. 147 – 152.
2. Баадер Б. Биогаз: Теория и практика / Б. Баадер, Е. Доне, М. Брендерфер. – М. : Колос, 1989. – 450 с.
3. Семенов И. В. Проектирование биогазовых установок / И. В. Семенов. – К. : Техника, 1992. – 346 с.
4. Никитин Г. А. Метановое брожение в биотехнологии. Учебное пособие / Г. А. Никитин. – К. : Вища школа, 1990. – 207 с.
5. Ткаченко С. Й. Самозакипаючі потоки в дренажних каналах теплотехнологічних систем. Монографія / С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 160 с.
6. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки. Монографія / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. – В. : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 132 с. ISBN 996-641-107-5.
7. Канивец Г. Е. Обобщенные методы расчета теплообменников / Г. Е. Канивец. – К. : Наукова думка, 1970. – 352 с.
8. Бакластов А. М. Промышленные тепломасообменные процессы и установки / А. М. Бакластов, В. А. Горбенко, О. Л. Данилов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.
9. Ткаченко С. Й. Застосування поняття «модельна рідина» в експериментально-розрахунковому методі / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 3. – С. 103 – 110. – ISSN 1997-9266.
10. Балдина О. М. Гидравлический расчёт котельных агрегатов (нормативный метод) / О. М. Балдина, А. В. Локшин, Д. Ф. Петерсон. – М. : "Энергия", 1978. – 256 с.
11. Ткаченко С. Й. Обобщенные методы расчёта теплогидродинамических процессов и применение их для оптимизации выпарных установок : автореф. дис. докт. техн. наук.: 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика». / С. Й. Ткаченко. – Москва, 1988. – 39 с.
12. Ткаченко С. Й. Застосування рівняння енергії для визначення втрат на тертя у вертикальному високов'язкому двофазному потоці / С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова О. Ю. Бочкова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП». – 2016. – № 10 (1182). – С. 50 – 55. – ISSN 2078-774X.
13. Калинушкин М. П. Насосы и вентиляторы: Учеб. пособие для вузов / М. П. Калинушкин. – [6-е изд.]. – М. : Высшая школа, 1987. – 176 с.
14. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебник для теплоэнергетических специальностей для вузов / В. М. Черкасский. – [2-е изд.]. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 412 с.
15. Безродний М. К. Енергетична ефективність теплонасосних схем постачання. Монографія / М. К. Безродний, Н. О. Притула. – К.: НТУУ КП, 2012. – 208 с.

**Ткаченко Станіслав Йосипович** – д. т. н., професор, завідувач кафедри теплоенергетики, e-mail: Stahit@mail.ru.

**Степанова Наталія Дмитрівна** – к. т. н., доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: Stepanovand@mail.ru.

**Бочкова Ольга Юрійвна** – аспірант кафедри теплоенергетики, e-mail: Olichkab888@gmail.com.  
Вінницький національний технічний університет.