

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра механіки та інженерії агроєкосистем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**ДМИТРУК ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 620.92

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Дослідження процесу обертання метантенка із біомасою**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_В.О.Дмитрук

**Керівник роботи**

Кухарець С. М.

Доктор технічних наук, професор

**Житомир – 2021**

## АНОТАЦІЯ

**Дмитрук Володимир Олександрович. Дослідження процесу обертання метантенка із біомасою.** – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

Пропоновані нами технології та біоенергетичне обладнання дозволить підвищити рентабельність автономних ферм за рахунок впровадження новітніх технологій, призведе до підвищення врожайності та зниження собівартості сільгосппродукції, вирощуваної на автономних фермах.

Ми пропонуємо будувати повністю автономні екологічно чисті ферми - екоферми, де основний об'єкт енергозберігаюча теплиця, в комплекті з біоенергетичною установкою.

Для визначення відносної швидкості та встановлення траєкторії руху частинок біомаси необхідно враховувати сили, що діють на частинки складових субстрату. На частинки субстрату, що рухаються по лопатях (лезах) під час обертання реактора, впливають сила тертя, сила супротиву середовища, відцентрова сила інерції, сила Архімеда та складна відцентрова сила.

На основі досліджень рівнянь встановлено, що при щільності субстрату в межах  $1030 \dots 1070 \text{ кг/м}^3$ , раціональні значення кутової швидкості лежать в межах  $0,05 \dots 0,09 \text{ рад/с}$ . Довжина лопаті реактора складає  $70 \dots 80\%$  внутрішнього радіуса.

Також за допомогою нашої установки було отримано візуалізацію процесу перемішування субстрату.

*Ключові слова: біогаз, реактор, субстрат, обертання*

## ANNOTATION

**Dmitruk Volodymyr Alexandrovich. Research of rotation process of a biomass digester.** - *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering.  
– Polissia National University, Zhytomyr, 2021.

Our proposed technologies and bioenergy equipment will increase the profitability of autonomous farms through the introduction of new technologies, will increase yields and reduce the cost of agricultural products grown on autonomous farms.

We propose to build fully autonomous environmentally friendly farms - eco-farms, where the main object is an energy-efficient greenhouse, complete with a bioenergy installation.

To determine the relative velocity and establish the trajectory of biomass particles, it is necessary to take into account the forces acting on the particles of the substrate components. The substrate particles moving on the blades (blades) during the rotation of the reactor are affected by the friction force, the resistance force of the medium, the centrifugal force of inertia, the Archimedes force and the complex centrifugal force.

Based on studies of the equations, it was found that at a substrate density in the range of 1030...1070 kg/m<sup>3</sup>, the rational values of the angular velocity are in the range of 0.05...0.09 rad/s. The length of the reactor blade is 70...80% of the inner radius.

Also with the help of our installation, a visualization of the substrate mixing process was obtained.

*Key words: biogas, reactor, substrate, rotation*

## Зміст

ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1 ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ В ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВАХ.....	6
Висновок до розділу 1.....	8
РОЗДІЛ 2 ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК.....	10
Висновок до розділу 2.....	15
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБЕРТАННЯ МЕТАНТЕНКА.....	16
Висновок до розділу 3.....	26
ВИСНОВКИ.....	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	30

## ВСТУП

Використання малих біогазових станцій для виробництва теплової та електричної енергії в аграрних підприємствах дозволить досягнути таких переваг:

- виробництво власних енергетичних ресурсів;
- утилізація відходів виробництва.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – поліпшити рівень виробництва енергії за рахунок оптимізації технологічно-конструкційних параметрів установки.

Згідно меті роботи сформовано науково-практичні задачі:

- проаналізувати перспективи виробництва біогазу в фермерських господарствах
- визначити перспективи виробництва біогазу в фермерських господарствах переваги та недоліки біогазових установок
- виконати дослідження процесу обертання метантенка із біомасою

Об'єкт дослідження: станція із виробництва біогазу

Предмет дослідження: конструкційні та технологічні параметри біогазової станції.

Методи дослідження: експериментальні дослідження проведено із застосуванням теоретичної механіки, зокрема кінематики та динаміки обертального руху.

Практичне значення одержаних результатів: проведенні дослідження дозволять оптимізувати конструкційно-технологічні параметри біогазових станцій, що оснащені біогазовими ректорами.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота містить вступ, три розділи, висновки, список інформаційних джерел з 15 праць. Загальний обсяг роботи становить 31 сторінку комп'ютерного тексту, містить 7 рисунків.

# РОЗДІЛ 1

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ В ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВАХ

Біоенергетика – це область енергетики, що присвячена виробництву енергії, палива, біодобрих, кормових добавок та інших матеріалів з біологічної сировини [1]. Біологічним сировиною або біомасою можуть бути відходи зернових, технічних, олійних культур, рослинництва, тваринництва, рибної та переробної промисловості, прострочені продукти харчування і життєдіяльності людини [2].

Така різноманітність [доступно] сировини дозволяє використовувати біомасу для виробництва в першу чергу біодобрих, електроенергії і тепла (за рахунок спалювання біогазу), палива (біодизеля, біоетанолу), та інших матеріалів [3].

В останні роки значно зросла зацікавленість процесами утилізації органічних відходів в агровиробництві. Це проявляється не тільки в дедалі більшій кількості створених біогазових установок, але і залученням все більшої кількості фермерів, зацікавлених у вирішенні найгостріших проблем в агрокомплексі - утилізації гною та посліду, в підвищенні врожайності сільгоспкультур, відновленні біоценозу ґрунту, його оздоровленні [4]. А енергетична галузь вже не ставиться з такою обережністю до децентралізації виробництва джерел енергії завдяки будівництву біогазових установок.

Виробництво біогазу – це можливість дешевої утилізації органічних відходів та залишків продуктів харчування в біогазових установках з користю для сільського господарства [1, 4, 5]. Ця технологія завойовує також все більше число прихильників, які переконалися в її корисності для навколишнього середовища,

в отриманні екологічно чистих продуктів харчування. Що важливо, українських продуктів.

Відновлюваний природний газ – це біогаз, якість якого підвищено до рівня природного газу [6]. Підвищення його якості до такого рівня дає можливість поставляти цей газ на масовий ринок за допомогою існуючої газотранспортної системи. Біогаз – це суміш метану і вуглекислого газу, що утворюється в спеціальних реакторах - метантенках, влаштованих і керованих таким чином, щоб забезпечити максимальне виділення метану [1, 6].

ККД, що отримується при спалюванні біогазу, може досягати від 60 до 90% відносно енергії, якою володіє вихідна сировина. Однак біогаз отримують з рідкої маси, що містить 95% води, так практичний вихід газу визначити складно [7].

Інше, і дуже важливе, якість процесу переробки біомаси полягає в тому, що в процесі утилізації виробляються енергетично ефективні біодобрива. У них не містяться нітрати і нітроти, немає яєць гельмінтів, немає хвороботворних бактерій [8].

Отримання біодобрив та біогазу можливо в установках самих різних масштабів, особливо це ефективно на агропромислових комплексах, де існує можливість організації замкнутого технологічного ланцюжка від утилізації, до отримання на кожному етапі продукції готової до реалізації. Це біодобрива, кормові добавки, вирощена на гідропоніці овочева сільгосппродукція, гідропонний зелений корм до повного екологічного циклу. Біогаз використовують для освітлення, створення систем опалення, приготування їжі, для приведення в дію механізмів, автотранспорту, електрогенераторів.

Біогаз – це індустрія з мільярдними оборотами, в світі працюють десятки тисяч біогазових станцій [9, 10, 11]. Безвідходне господарство – норма майбутнього, переробка органічних відходів необхідна з метою захисту навколишнього середовища, отримання і впровадження інноваційних технологій у всіх галузях економіки. Існує безліч пояснень і визначень терміну «органічне

сільське господарство», але всі вони сходяться в одному, що це така система, яка спирається на управління екосистемою, а не на використанні зовнішніх сільськогосподарських ресурсів. Це система, яка враховує потенційно згубний вплив на екологію і людину таких речовин, як синтетичні мінеральні добрива та пестициди, ветеринарні лікарські препарати, антибіотики, генетично-модифіковане насіння і т.д. Органічне сільське господарство передбачає середньо- і довгостроковий ефект впливу на агроекосистему. Воно має на меті виробляти продукти харчування в умовах екологічного балансу.

### **Висновок до розділу 1**

Пропоновані нами технології та біоенергетичне обладнання дозволить підвищити рентабельність автономних ферм за рахунок впровадження новітніх технологій, призведе до підвищення врожайності та зниження собівартості сільгосппродукції, вирощуваної на автономних фермах.

Ми пропонуємо будувати повністю автономні екологічно чисті ферми - екоферми, де основний об'єкт енергозберігаюча теплиця, в комплекті з біоенергетичної установкою.

Це дозволяє не тільки 100% утилізувати всі види органічних відходів, отриманих в процесі життєдіяльності людини, отримувати екологічно чисті енергетично ефективні рідкі біодобрива, вирощувати екологічно чисту сільгосппродукцію, зелений корм, а й отримувати додаткові, а часом і основні енергоресурси - електричну і теплову енергію.

Все це дозволяє значно скоротити собівартість сільгосппродукції, вирощуваної в енергозберігаючій теплиці. З огляду на, те що в складі витрат на вирощування сільгосппродукції в теплицях 90% складають витрати на добриво і опалення.



Отримані рідкі біодобрива по системі крапельного зрошення подаються на гідропонні установки, змонтовані в енергозберігаючій теплиці, тобто ми пропонуємо повернутися до вирощування гідропонних сільгосппродукції і гідропонного зеленого корму. Такі автономні екоферми ми пропонуємо створювати в фермерських господарствах, на підприємствах АПК, на сімейних фермах.

А основним елементом такої ферми буде біогазова установка.

## РОЗДІЛ 2

### ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

Біогазові технології дозволяють утилізувати органічні відходи. Утилізація від латинського «утіліс» – корисний, тобто це повторне використання або повернення в оборот відходів виробництва. Після переробки біовідходів водневим або метановим зброджуванням виходить два корисних продукту: біогаз – відновлюване джерело енергії, яке можна використовувати для отримання електроенергії, тепла, а також палива для транспортних засобів; високоякісне органічне добриво, яке не має запаху і ефективніше звичайного гною в п'ять разів. У біореакторі біогазової установки відбуваються процеси (рис. 2.1), які дозволяють отримати такі продукти: гідроліз жирів, вуглеводів і протеїнів до складових їх полімерів; фаза окислення – окремі молекули проникають в клітини бактерій, де вони продовжують розкладатися [10]. У цьому процес частково беруть участь анаеробні бактерії, які вживають залишки кисню і утворюють необхідні для метанових бактерій анаеробні умови; наступна стадія ацетогенеза – переробка бактеріями складних спиртів і карбонових кислот. Вона відбувається з виділенням водню і розкладанням до оцтової і мурашиної кислоти, далі метанолу; з продуктів ацетогенеза, за допомогою метаноутворюючих бактерій, утворюються вуглекислий газ і метан. Якщо більш узагальнено, то процес утворення біогазу та переробки біомаси в добрива (субстрат) можливий при повній відсутності повітря і у вологому середовищі. Таким чином, до конструкції біореактора пред'являються жорсткі вимоги. Він повинен бути абсолютно герметичним, міцним, теплоізолюваним, а матеріал, з якого зроблена конструкція – стійкий до агресивних середовищ, зокрема мати підвищений опір корозії.

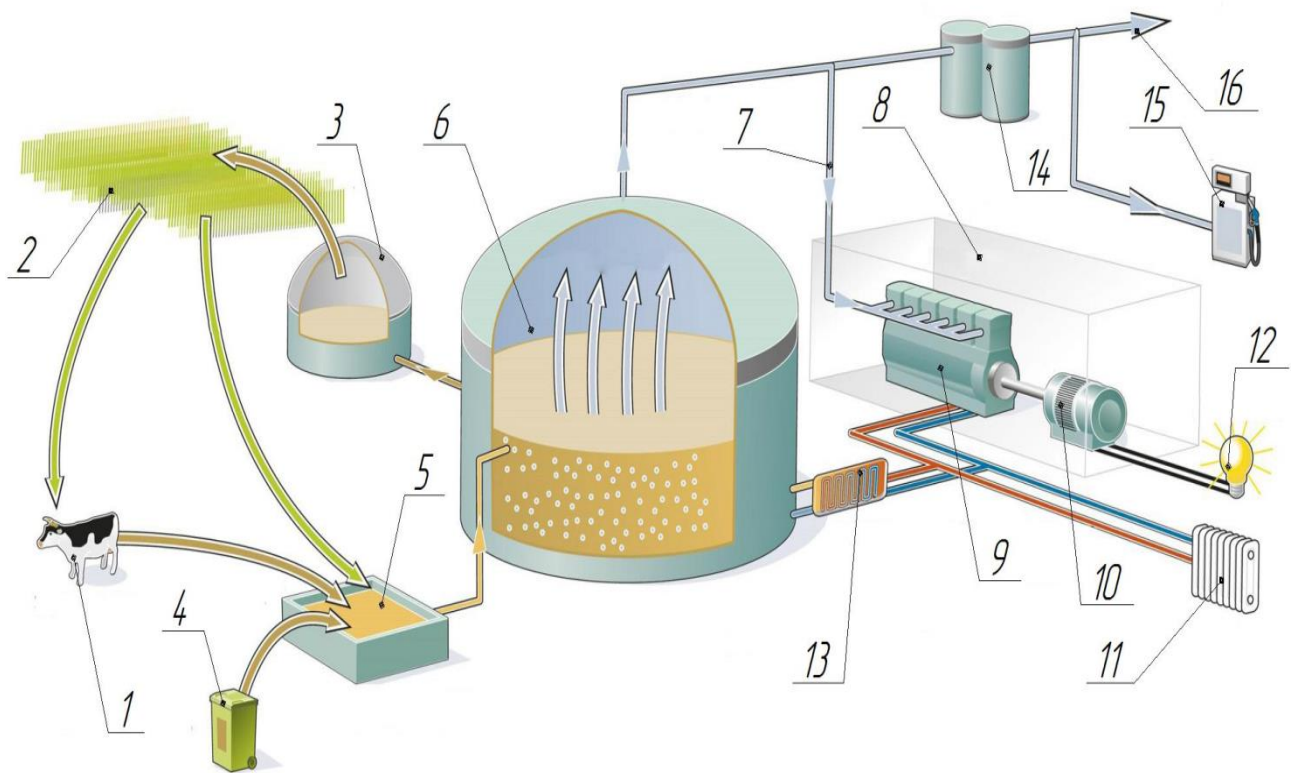


Рис. 2.1. Схема біогазової установки

1 – тваринництво та птахівництво, 2 – аграрні культури, 3 – добрива, 4 – органіка, 5 – дигестат, 6 – біореактор, 7 – газопроводи, 8 – електростанція, 9 – ДВЗ, 10 – генератор, 11 – тепла енергія, 12 – електроенергія, 13 – внутрішні енергопотреби, 14 – очищення до біометану, 15 – АЗС, 16 – газтранспорт мережа [джерело Agentur für Erneuerbare Energien, Німеччина]

Всі біореактори по температурному режиму можна розділити на три великі групи: - психрофільні режим, температура до 25°C; - мезофільні режим, від 25 ° С до 45°C; - термофільний режим, більш 45°C [1]; При психрофільному і мезофільному режимі швидкість протікання реакцій, тобто швидкість переробки біомаси невелика. Активне газоутворення починається лише через 30...80 днів.

Так як біогазові технології стали відомі ще в далекі часи, то найпростіша конструкція біореактора, для психрофільного і мезофільного режимів роботи, представляла собою викопану яму чим-небудь закриту зверху або герметичну ємність. Перевагою даної біогазової установки є простота конструкції і обслуговування, невелика вартість. Мінусами таких установок є: мале виділення біогазу; довга і неповна переробка органічного субстрату; вміст в переробленій біомасі шкідливої флори. Великого поширення набули біореактори, що працюють при термофільному режимі. Вони дозволяють набагато швидше і якісніше переробити біовідходи, вже на 12 день починається інтенсивний процес газоутворення, шкідлива флора повністю знищується [5]. Однак є і мінуси: велика чутливість до перепадів температури (зниження температури переробки біомаси на всього 2°C істотно знижує вихід біогазу), значні витрати на підтримку температурного режиму. Розберемо більш детально плюси і мінуси різних конструкцій термофільного біореактора.

Великі стаціонарні біогазові установки. Переваги: великий обсяг біомаси, що дозволяє збирати органічні відходи з кількох підприємств; інтенсивний процес газоутворення; можливість за допомогою додаткового обладнання забезпечити електроенергією цілий населений пункт. Недоліки: ціни на їх будівництво досягають десятків мільйонів гривень; великі енерговитрати на підтримку режимів роботи установки (підтримання температури в біореакторі, перемішування, транспортування сировини і т. д.), підвищена небезпека.

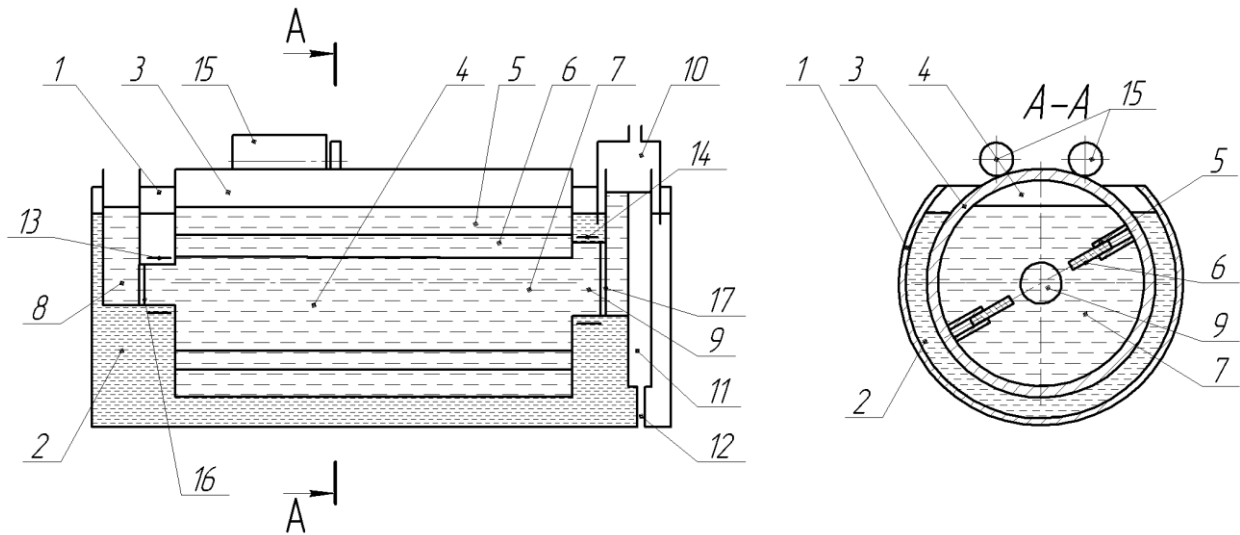
Стаціонарні модульні біогазові установки для невеликих підприємств і фермерських господарств. Плюси: доступна ціна; можливість нарощування чи зменшення виробничих потужностей за рахунок модулів; на відміну від інших альтернативних джерел енергії (геліостанцій і вітрогенераторів) можуть працювати при будь-якій погоді. Мінуси: підвищені енерговитрати при роботі з температурою навколишнього середовища менше 0 С; спостерігається

невідповідність заявлених параметрів з фактичними; через складні конструкції біореактора знижена ремонтпридатність.

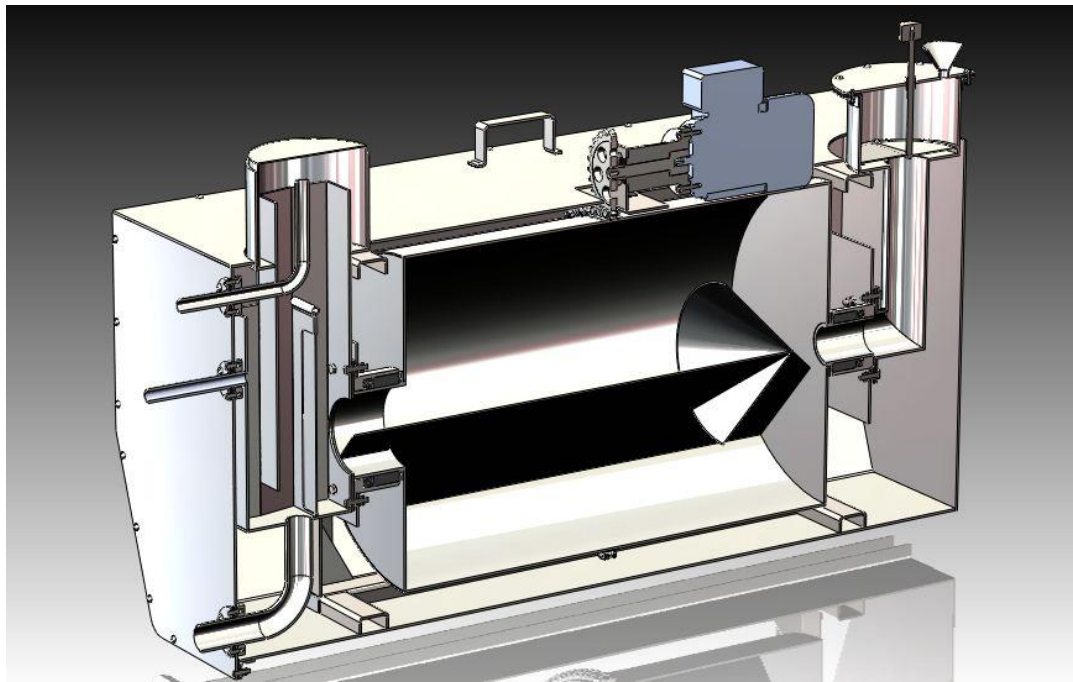
Однією з основних проблем виробництва біогазу є неоднорідність біомаси субстрату всередині біореактора. Неоднорідність субстрату спричиняє порушення доступності органічних елементів для постачання метаноутворюючих бактерій [12]. Бактерії, що виробляють метан, мають щільність більшу, ніж середня щільність субстрату в біогазовому реакторі, і тому разом з мінеральними частинками накопичуються в нижній частині установки. А елементи для харчування бактерій (органічний компонент субстрату), що мають щільність нижчу за середню щільність для субстрату, накопичуються у верхній частині зріджувача. Тому для ефективної взаємодії анаеробних бактерій з біомасою необхідно змішування субстрату. Однак надмірне перемішування може порушити необхідний контакт між органічними елементами та метаноутворюючими бактеріями [13].

Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати повільне або періодичне обертання механічних змішувачів [14]. Однак при використанні механічних змішувачів неможливо повністю усунути неоднорідність біомаси. Таке змішування по суті не усуває розділення мінеральних осадів та органічної плаваючої біомаси.

Науковці Поліського національного університету та Національно університету біоресурсів і природокористування України пропонують перемішувати біомасу за способом обертання біореактора [4, 6, 11], рис. 2.2. Біореактор має форму циліндра, що розміщений горизонтально [15, 16]. Біореактор обертається у воді, вода міститься у спеціальному зовнішньому корпусі [15, 16]. Така конструкція за рахунок сили Архімеда, розвантажує підшипники біореактора, таким чином зменшуючи витрати енергії на обертання.



а



б

Рис. 2.2. Біореактор, а – принципова схема, б – 3Д схема: 1 – корпус в який наливається вода; 2 – вода; 3 – біореактор; 4 – внутрішня порожнина; 5 – розділювач; 6 – активатори; 7 – субстрат; 8, 9, 12 – технічні отвори; 10 – газгольдер; 11 – вивантаження субстрату; 13, 14 – підшипники; 15 – електродвигун; 16, 17 – ущільнення

## Висновок до розділу 2

Для ефективної взаємодії анаеробних бактерій з біомасою необхідно змішування субстрату. Однак надмірне перемішування може порушити необхідний контакт між органічними елементами та метаноутворюючими бактеріями. Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати повільне або періодичне обертання механічних змішувачів. Однак при використанні механічних змішувачів неможливо повністю усунути неоднорідність біомаси. Таке змішування по суті не усуває розділення мінеральних осадів та органічної плаваючої біомаси. Перемішування біомаси за рахунок обертання біореактора дозволить усунути цю проблему, а створення умов плавання біореактора в зовнішньому корпусі дозволить значно зменшити енерговитрати.

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБЕРТАННЯ МЕТАНТЕНКА

Для визначення відносної швидкості та встановлення траєкторії руху частинок біомаси необхідно враховувати сили, що діють на частинки складових субстрату (разом з метанопродукційними бактеріями). Ці сили показані на рис. 3.1.

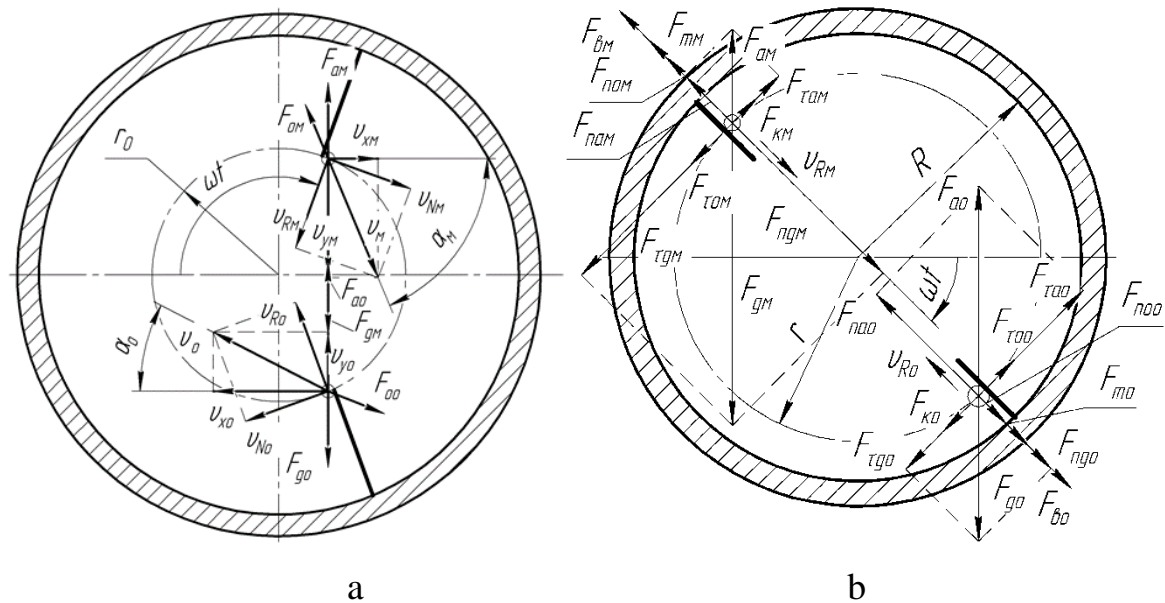


Рис. 3.1. Сили, що діють всередині метантенка в процесі його обертання:  $F_g$  – сила тяжіння, Н;  $F_a$  – сила виштовхування (Архімеда), Н;  $F_m$  – сила тертя, Н;  $F_k$  – сила відцентрового прискорення, Н;  $F_v$  – відцентрова сила інерції, Н;  $F_o$  – сила супротиву субстрату, Н;  $\tau$  – компоненти сили тяжіння, Архімеда та опору (дотичні),  $n$  – компоненти сил тангенційні, Н;  $r$  – радіус-вектор, м;  $R$  – радіус робочої порожнини реактора, м;  $r_0$  – радіус лопаток, м;  $v$  – абсолютна швидкість, м/с;  $v_R$  – радіальна швидкість, м/с;  $v_N$  – нормальна швидкість, м/с [15].



На частинки субстрату, що рухаються по лопатях (лезах) під час обертання реактора, впливають сила тертя, сила супротиву середовища, відцентрова сила інерції, сила Архімеда та складна відцентрова сила.

Сила тертя визначається силами, які притискають частинки до леза або відривають їх від леза:

$$F_m = f(F_{\tau o} \pm F_{\tau g} \mp F_{\tau a} - F_{\kappa}), \quad (3.1)$$

Сили із рівнянню 3.1 можна деталізувати, як:

$$F_o = mr\omega^2; F_g = mg; F_a = \rho_c g V; F_{\kappa} = 2m\omega \frac{dr}{dt}; F_{no} = mk_1 \frac{dr}{dt}; F_{\tau o} = mk_1 r\omega, \quad (3.2)$$

На частинки субстрату, які рухаються всередині реактора після того, як вони притиснулися до лез, впливають сила тертя, сила Архімеда та сила супротиву середовища:

$$F_g = mg; F_a = mk_2 g; F_o = mk_1 v. \quad (3.3)$$

Щоб встановити траєкторію руху частинок біомаси, складаються диференціальні рівняння руху частинок субстрату над лезом сепаратора із врахуванням того, що лопаті-леза знаходяться всередині обертового ферментатора.

Для того, щоб надати докази теоретичного дослідження (рис. 3.2), було створено дослідницьку установу.

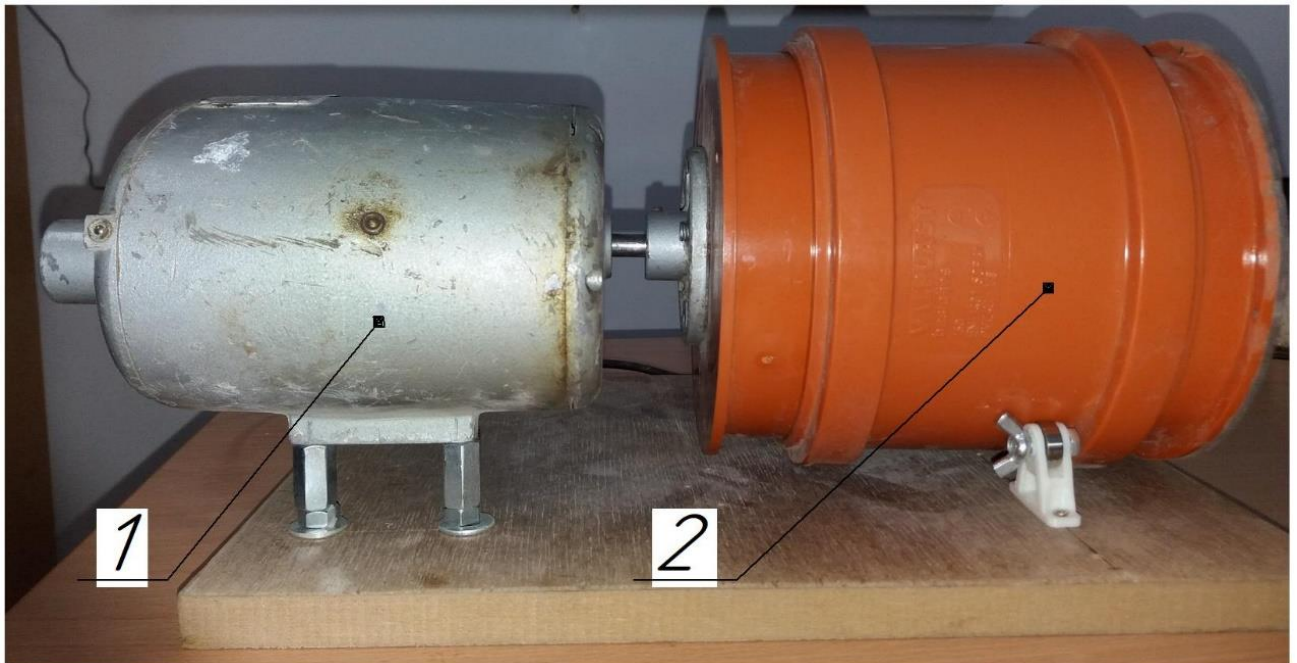


Рис. 3.2. Дослідна установка: 1 – електропривід, 2 – обертовий біореактор-ферментатор

Корпус дослідної установки виконаний у вигляді горизонтального циліндра, який обертається навколо горизонтальної осі. В середині корпуса реактора є дві плоскі лопаті. Внутрішній радіус реатора 0,2 м, довжина леза лопаті 0,15 м. Електричний привід може змінювати частоту обертання установки.

Для цієї дослідної установки були обрані компоненти субстрату, які забезпечують середню щільність субстрату в діапазоні  $1030 \dots 1070 \text{ кг/м}^3$ , щільність частини мінерального субстрату в межах  $1165 \dots 1355 \text{ кг/м}^3$  та щільність органічного субстрату частина в діапазоні  $815 \dots 895 \text{ кг/м}^3$ . Вміст частини органічного субстрату становить  $7 \dots 9\%$  від усього об'єму субстрату, вміст частини мінерального субстрату –  $4 \dots 5\%$  від всього об'єму субстрату.

Диференціальне рівняння руху частинки субстрату у вигляді матеріальної точки над лопаткою обертового реактора матиме такий вигляд:

$$m \frac{d\bar{v}_R}{dt} = \bar{F}_{na} + \bar{F}_6 + \bar{F}_m + \bar{F}_{no} + \bar{F}_{ng} , \quad (3.4)$$

З урахуванням рівняння (3.1) та (3.2), рівняння (3.4) матиме вигляд:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + (2f\omega + k_1) \frac{dr}{dt} - (\omega^2 - fk_1\omega)r = -g [f(1-k_2)\cos(\omega t) + (1-k_2)\sin(\omega t)] \quad (3.5)$$

Для розв'язку рівняння 3.5 необхідно знайти характеристичне рівняння, яке фактично описує закон переміщення матеріальної точки, такий розв'язок проведено в [6, 15]:

$$r = C_1 \exp(\lambda_1 t) + C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g(1-k_2)}{\omega \sqrt{4\omega^2 + k_1^2}} \sin \left( \arctg \frac{4f\omega + k_1(1-f^2)}{2[\omega(1-f^2) - fk_1]} + \omega t \right) , \quad (3.6)$$

В якому відповідні коефіцієнти складатимуть:

$$\lambda_1 = -\left(f\omega + \frac{k_1}{2}\right) + \sqrt{\omega^2(1+f^2) + \frac{k_1^2}{4}}; \quad \lambda_2 = -\left(f\omega + \frac{k_1}{2}\right) - \sqrt{\omega^2(1+f^2) + \frac{k_1^2}{4}}.$$

Після інтегрування рівняння 3.6, знайдемо швидкість переміщення частинки субстрату у вигляді матеріальної точки:

$$v_R = \frac{dr}{dt} = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 t) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g(1-k_2)}{\sqrt{4\omega^2 + k_1^2}} \cos \left( \arctg \frac{4f\omega + k_1(1-f^2)}{2[\omega(1-f^2) - fk_1]} + \omega t \right). \quad (3.7)$$

Прийнявши першопочатково:  $t=0$ ,  $r=R$  (де  $R$  – поточне значення радіус-вектора),  $v_R=0$ , зможемо знайти необхідні нам постійні інтегрування, конкретно для нашого випадку:

$$C_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[ R - \frac{g(1-k_2)}{\omega \sqrt{(4\omega^2 + k_1^2)}} \sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\lambda_2^2}} \sin \left( \arctg \frac{4f\omega + k_1(1-f^2)}{2[\omega(1-f^2) - fk_1]} - \arctg \frac{\omega}{\lambda_2} \right) \right],$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[ \frac{g(1-k_2)}{\omega \sqrt{(4\omega^2 + k_1^2)}} \sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\lambda_1^2}} \sin \left( \arctg \frac{4f\omega + k_1(1-f^2)}{2[\omega(1-f^2) - fk_1]} - \arctg \frac{\omega}{\lambda_1} \right) - R \right]. \quad (3.8)$$

Графічно переміщення та швидкість частинок субстрату у вигляді матеріальних точок можна показати графіками (рис. 3.3 та 3.4)

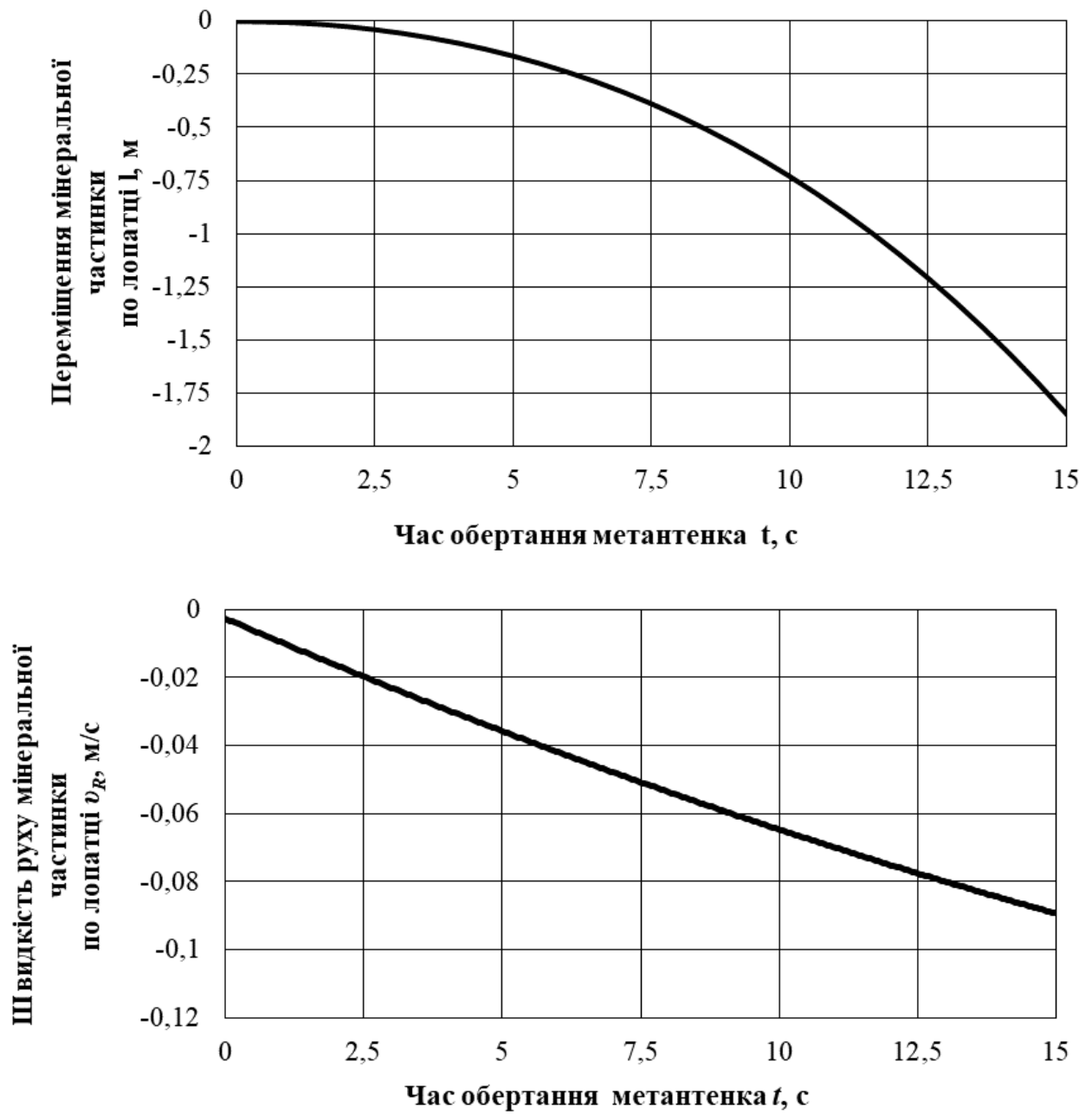


Рис. 3.3. Переміщення та швидкість мінеральних частинок субстрату по поверхні лопатей-лез всередині біореактора

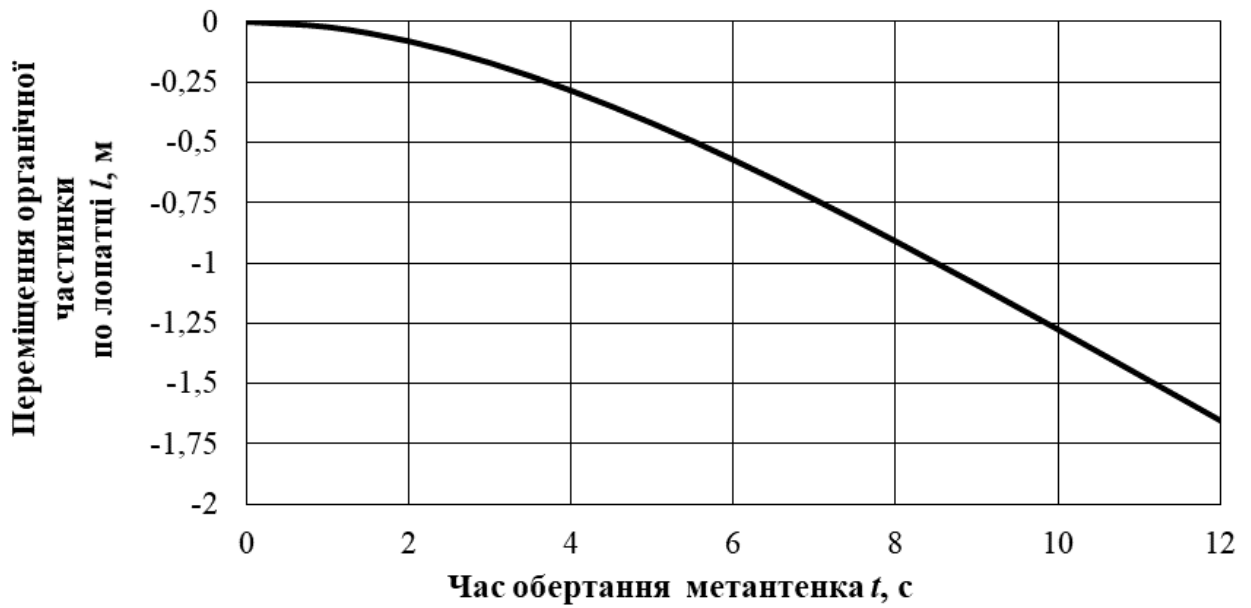


Рис. 3.4. Переміщення та швидкість органічних частинок субстрату по поверхні лопатей-лез всередині біореактора

Після відриву частинок від лопаток їхня траєкторія описується іншою системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \mp k_1 v \cos \alpha, \\ \frac{d^2y}{dt^2} = g(k_2 - 1) \pm k_1 v \sin \alpha, \end{cases} \quad (3.9)$$

де:

$x$  – переміщення по осі  $x$ , м;  $y$  – переміщення по осі  $y$ , м;  $t$  – час переміщення,

с.

Прийнявши за початкові параметри  $v=v_0$ ,  $\alpha=\alpha_0$ , та  $x_0=0$ ,  $y_0=0$ , отримаємо:

$$\begin{cases} x = \frac{v_0 \cos \alpha_0}{k_1} [\pm 1 \mp \exp(-k_1 t)] \\ y = \frac{v_0 \sin \alpha_0}{k_1} [\pm \exp(-k_1 t) \mp 1] \pm \frac{g(1-k_2)}{k_1^2} [1 - k_1 t - \exp(-k_1 t)]; \end{cases} \quad (3.10)$$

Причому в рівнянні 3.10 час можна визначити як:

$$t = \frac{1}{k_1} \ln \left( \pm 1 \mp \frac{x k_1}{v_0 \cos \alpha_0} \right). \quad (3.11)$$

Враховуючи час 3.11 отримаємо залежність:

$$y = x t g \alpha_0 + \frac{g(1-k_2)x}{k_1 v_0 \cos \alpha_0} + \frac{g(1-k_2)}{k_1^2} \ln \left( \pm 1 \mp \frac{x k_1}{v_0 \cos \alpha_0} \right), \quad (3.12)$$

Відповідно до рівняння 3.12 можна виявити траєкторію руху частинок компонентів після їх виходу з лопаті.

У зоні оптимальних значень кутової швидкості біореактора та його внутрішнього (робочого) радіусу на основі отриманих рівнянь руху усіх характерних складових частинок компонентів субстрату над лопатями метантенка і після відокремлення від лопатей було знайдено траєкторію руху частинок всередині реактора (рис. 3.5 та рис. 3.6).

На основі досліджень рівнянь встановлено, що при щільності субстрату в межах  $1030 \dots 1070 \text{ кг/м}^3$ , раціональні значення кутової швидкості лежать в межах  $0,05 \dots 0,09 \text{ рад/с}$ . Довжина лопаті реактора складає  $70 \dots 80\%$  внутрішнього радіуса.







Рис. 3.5. Недостатня інтенсивність перемішування (кутова швидкість менша 0,05 рад/с)





Рис. 3.5. Достатня інтенсивність перемішування (кутова швидкість більша 0,05 рад/с)

Також за допомогою нашої установки було отримано візуалізацію даного процесу, що також показано на відповідних рисунках.

### **Висновок до розділу 3**

Для визначення відносної швидкості та встановлення траєкторії руху частинок біомаси необхідно враховувати сили, що діють на частинки складових субстрату (разом з метанопродукційними бактеріями). На частинки субстрату, що рухаються по лопатях (лезях) під час обертання реактора, впливають сила тертя, сила супротиву середовища, відцентрова сила інерції, сила Архімеда та складна відцентрова сила.

На основі досліджень рівнянь встановлено, що при щільності субстрату в межах  $1030 \dots 1070 \text{ кг/м}^3$ , раціональні значення кутової швидкості лежать в межах  $0,05 \dots 0,09 \text{ рад/с}$ . Довжина лопаті реактора складає  $70 \dots 80\%$  внутрішнього радіуса.

Також за допомогою нашої установки було отримано візуалізацію даного процесу, що також показано на відповідних рисунках.

## ВИСНОВКИ

Пропоновані нами технології та біоенергетичне обладнання дозволить підвищити рентабельність автономних ферм за рахунок впровадження новітніх технологій, призведе до підвищення врожайності та зниження собівартості сільгосппродукції, вирощуваної на автономних фермах.

Ми пропонуємо будувати повністю автономні екологічно чисті ферми - екоферми, де основний об'єкт енергозберігаюча теплиця, в комплекті з біоенергетичною установкою.

Це дозволяє не тільки 100% утилізувати всі види органічних відходів, отриманих в процесі життєдіяльності людини, отримувати екологічно чисті енергетично ефективні рідкі біодобрива, вирощувати екологічно чисту сільгосппродукцію, зелений корм, а й отримувати додаткові, а часом і основні енергоресурси - електричну і теплову енергію.

Все це дозволяє значно скоротити собівартість сільгосппродукції, вирощуваної в енергозберігаючій теплиці. З огляду на, те що в складі витрат на вирощування сільгосппродукції в теплицях 90% складають витрати на добриво і опалення.

Отримані рідкі біодобрива по системі крапельного зрошення подаються на гідропонні установки, змонтовані в енергозберігаючій теплиці, тобто ми пропонуємо повернутися до вирощування гідропонних сільгосппродукції і гідропонного зеленого корму. Такі автономні екоферми ми пропонуємо створювати в фермерських господарствах, на підприємствах АПК, на сімейних фермах.

А основним елементом такої ферми буде біогазова установка.

Для ефективної взаємодії анаеробних бактерій з біомасою необхідно змішування субстрату. Однак надмірне перемішування може порушити

необхідний контакт між органічними елементами та метаноутворюючими бактеріями. Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати повільне або періодичне обертання механічних змішувачів. Однак при використанні механічних змішувачів неможливо повністю усунути неоднорідність біомаси. Таке змішування по суті не усуває розділення мінеральних осадів та органічної плаваючої біомаси. Перемішування біомаси за рахунок обертання біореактора дозволить усунути цю проблему, а створення умов плавання біореактора в зовнішньому корпусі дозволить значно зменшити енерговитрати.

Для визначення відносної швидкості та встановлення траєкторії руху частинок біомаси необхідно враховувати сили, що діють на частинки складових субстрату (разом з метанопродукційними бактеріями). На частинки субстрату, що рухаються по лопатях (лезах) під час обертання реактора, впливають сила тертя, сила супротиву середовища, відцентрова сила інерції, сила Архімеда та складна відцентрова сила.

На основі досліджень рівнянь встановлено, що при щільності субстрату в межах  $1030 \dots 1070 \text{ кг/м}^3$ , раціональні значення кутової швидкості лежать в межах  $0,05 \dots 0,09 \text{ рад/с}$ . Довжина лопаті реактора складає  $70 \dots 80\%$  внутрішнього радіуса.

Також за допомогою нашої установки було отримано візуалізацію даного процесу, що також показано на відповідних рисунках.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Альтернативна енергетика: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів / [М. Д. Мельничук, В. О. Дубровін, В. Г. Мироненко, І. П. Григорюк, В. М. Поліщук, Г. А. Голуб, В. С. Таргоня, С. В. Драгнев, І. В. Свистунова, С. М. Кухарець]. – К.: Аграр Медіа Груп, 2011. – 612 с.
2. Кухарець С. М. Регулювання використання органічних ресурсів для виробництва біопалива / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб // Сільськогосподарські машини: зб. нук. ст. – Луцьк, 2013. – Вип. 24. – С. 187–194.
3. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України / [В. О. Дубровін, Л. Д. Романчук, С. М. Кухарець, І. Г. Грабар, Л. В. Лось, Г. А. Голуб, С. В. Драгнев, В. М. Поліщук, В. В. Кухарець, І. В. Нездвєцька, В. О. Шубенко, А. А. Голубенко, Н. М. Цивенкова]. – К.: Центр учбової літератури, 2014. – 335 с.
4. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обертовими реакторами / [Г. А. Голуб, О. В. Сидорчук, С. М. Кухарець, В. В. Гох, С. В. Осауленко, О. А. Завадська, Б. О. Рубан, Н. Л. Поліковська, Р. Л. Швець, В. В. Чуба, М. Ю. Павленко]. – К.: НУБіП України, 2014. – 106 с.
5. Кухарець С. М. Дослідження енергетичної ефективності обертових метантенків / С. М. Кухарець, В. Г. Спиридонов // Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212, ч. 2. – С. 248–253.
6. Кухарець С.М. Підвищення енергетичної автономності агроecosystem. Механіко-технологічні основи: монографія / С.М. Кухарець – Житомир: ЖНАЕУ, 2016. – 192 с.
7. Кухарець С. Н. Производство биометана в сельском хозяйстве / С. Н. Кухарець // AgroOne. – 2016. - №3 (5). – С.24–25.

8. Голуб Г. А. Газова автономія / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець // The Ukrainian Farmer. – 2016. - №3. – С. 181-182.
9. Кузьменко М. Фермерський біогаз / М. Кузьменко, Г. Голуб, С. Кухарець // The Ukrainian Farmer. – 2016. - №7. – С. 70-71.
10. Golub G., Chuba V., Lutak V., Yarosh Y., Kukharets S. Researching of indicators of agroecosystem without external energy supply. Journal of Central European Agriculture (JCEA), vol. 22 (2). 2021. p. 397-407 (DOI: 10.5513/JCEA01/22.2.3076, Scopus, Web of Science)
11. Golub G., Kukharets S., Zavadzka O., Marus O. Determination of the Rate of Organic Biomass Decomposition in Biogas Reactors with Periodic Loading. International Journal of Renewable Energy Research. Vol.9. No.4. 2019. P. 1741-1750. (Scopus, Web of Science).
12. N. Adouani, M.-N. Pons, R. Hreiz and S. Pacaud Dynamic modelling of an anaerobic digester for wastes at the territory level. 11th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems Including Biosystems DYCOPS-CAB 2016. IFAC-PapersOnLine, vol. 49, is. 7, DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.361, Trondheim, Norway, pp. 1169–1174, 6-8 June 2016, (Conference Paper)
13. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Підручник / С. О. Кудря // – К.: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2012. – 489 с.
14. K. E. Uçkun, K. Stamatelatos, G. Antonopoulou, and G. Lyberatos, Production of biogas via anaerobic digestion, Handbook of Biofuels Production, Second ed., Processes and Technologies, Athens, Greece: National Technical University of Athens, 2016, pp. 259–301. (Book)
15. Substantiation of motion parameters of the substrate particles in the rotating digesters / Golub G.A., Skydan O.V., Kukharets S.M., Marus O.A. INMATEH – Agricultural Engineering. 2019. vol. 57. no. 1. P. 179–186