

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра процесів, машин і обладнання в агроінженерії

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

УДК 631.371: 620.92

ПОРИЦЬКИЙ Тарас Вікторович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Розроблення технологічних процесів енергоефективного
виробництва газоподібного біопалива в сільському
господарстві**

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

_____ Т. В. Порицький

Керівник роботи

Ярош Я.Д.

Доктор технічних наук, доцент

Житомир – 2020

АНОТАЦІЯ

Порицький Тарас Вікторович. Розроблення технологічних процесів енергоефективного виробництва газоподібного біопалива в сільському господарстві. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

В роботі перевірено гіпотезу, згідно з якою втрати енергії для обертових реакторів можуть бути зменшені, якщо обертовий реактор частково занурити у воді.

Отримані формули дозволяють визначити рівень опускання обертового реактора, коефіцієнт його наповнення залежно від геометричних параметрів реактора та щільності води, в яку занурений реактор для забезпечення плаваючого стану реактора.

Після аналізу проведених в роботі досліджень отримано, що для заповненого на 96% обертового реактора із внутрішнім об'ємом $0,08 \text{ м}^3$ (радіусом 0,2 м) необхідна мінімальна потужність становить 11,7 Вт для приводу при зануренні його у воду на 76 %. При цьому питома потужність приводу становитиме $0,18 \text{ кВт/м}^3$.

Ключові слова: реактор, біогаз, обертання, біомаса, рівень занурення, рівень заповнення

ANNOTATION

Porytsky Taras Viktorovych. Development of technological processes of energy efficient production of gaseous biofuels in agriculture. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering.
– Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

The paper hypothesizes that energy losses for rotating reactors can be reduced if the rotating reactor is partially immersed in water.

The obtained formulas allow to determine the level of lowering of the rotating reactor, the coefficient of its filling depending on the geometrical parameters of the reactor and the density of water in which the reactor is immersed to ensure the floating state of the reactor.

After analysis of the research conducted in the work, it was found that for a 96% filled rotary reactor with an internal volume of 0.08m^3 (radius 0.2 m), the required minimum power is 11.7W for the drive when immersed in water by 76%. The specific power of the drive will be 0.18 kW/m^3 .

Keywords: reactor, biogas, rotation, biomass, immersion level, filling level

Зміст

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИТЦВА ТА ВИКОРИСТАННЯ ГАЗОПОДІБНОГО БІОПАЛИВА В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ.....	7
Висновки до розділу 1	15
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	16
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	20
Висновки до розділу 3	25
ВИСНОВКИ.....	26
Список використаних джерел	27

ВСТУП

Виробництво газоподібного палива в сільському господарстві є утрудненим через значні енергетичні витрати в процесі виготовлення такого палива. Значна частина енерговитрат споживається для виконання перемішування біомаси в метантенках чи біореакторах. Проте це перемішування не дає необхідного ефекту через утворення зверху біомаси – кірки, а в нижній частині реактор – осаду. Проте, науковці Поліського національного університету пропонують використати перемішування біомаси в обертовому реакторі. Але питання щодо впливу параметрів реактора для цього перемішування на енергозатрати розкрито недостатньо.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження – забезпечити ефективне виробництво біогазу шляхом ефективного перемішування біомаси.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі **наукові задачі**:

- виконати аналіз особливостей виробництва та використання газоподібного палива в сільському господарстві;
- обґрунтування вибір установки для виробництва біогазу та способу перемішування субстрату, розробити методику експериментальних досліджень;
- виконати експериментальні дослідження впливу параметрів реактора на енергетичні витрати.

Об'єкт дослідження: технологічний процес перемішування біомаси в біогазовому реакторі.

Предмет дослідження: параметри реактора у взаємозв'язку із енергетичними витратами на перемішування біомаси.

Методи дослідження: Експериментальні дослідження виконувались згідно положень теорії імовірності та математичної статистики. В процесі проведення досліджень використовувалися стандартні та розроблені нами методики.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати дають змогу обґрунтувати енергетично ефективні параметри реактора для отримання біогазу.

Структура та обсяг. Магістерська робота викладена на 28 сторінках, складається із вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел із 18 найменувань, містить 13 рисунків, 1 таблицю.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ ГАЗОПОДІБНОГО БІОПАЛИВА В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Важливим напрямом відновлюваної енергії є виробництво біогазу [1]. В процесі виробництва біогазу можуть використовувати велику різноманітність сировини. Зокрема, виробництво біогазу можливе із рослинної біомаса [2] та відходи тваринництва [3] набули широкого поширення.

Досвід використання біогазових реакторів показав, що через три-чотири роки роботи [1] реактори вже наполовину наповнені осадом, який можна видалити лише екскаватором після повної зупинки процесу бродіння. Зверху утворюється ущільнена кірка, і також потрібно зупинити реактор для її видалення [4].

Таким чином, поліпшення роботи біогазового реактора забезпечують змішування шарів субстрату біомаси, що вимагає нових технічних рішень, одне з яких – змішування за допомогою обертання зрівноваженого реактора зануреного у воду. Розроблено і запатентовано кілька конструкцій модульних реакторів ротаційного типу [5], як інтенсивно перемішують біомасу; конструкція одного з таких зображена на рис. 1.1.

Ефективність виробництва біогазу залежить від характеристик біомаси (щільність, вміст сухої речовина, розмір частинок сухої речовини та характеристики мішалки (інтенсивність перемішування, геометричні розміри, характер розміщення лопатей, змішувачів і перегородок всередині реактора) [7]. Від цього залежить і ефективність експлуатації та контроль енергії, яку споживає біогазова установка [8]. Крім того необхідні дослідження інтенсивності перемішування компонентів субстрату, необхідної для забезпечення рівномірного розміщення компонентів біомаси в обертовому метантенку.

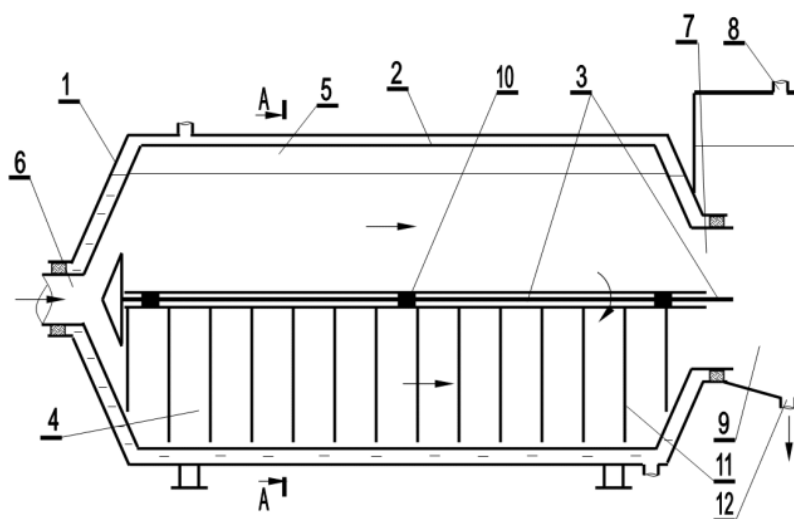


Рис. 1.1. Схема анаеробного реактора, зануреного в термостатичну рідину
 1 – горизонтальний зовнішній кожух, 2 - циліндричний реактор, 3 - поздовжня перегородка, 4, 5 – камери бродіння, 6, 7 – отвори для завантаження і видалення органічних речовин, 8 – труба для відбирання біогазу, 9 – розвантажувальна камера, 10 – стики, 11 – пальцеві мішалки, 12 – труба для видалення органічних речовин. Джерело [6]

На мою думку використання модульних обертювих біогазових реакторів є доречним для виробництва біогазу в сільськогосподарських підприємствах, однак дана конструкція потребує ретельного дослідження.

В агарному виробництві можна отримувати теплову та електричну енергію. Для отримання тепла із біогазу необхідний процес спалювання. Для спалювання газу з цією метою найкраще підходять котли. В котлах відбувається нагрів теплоносія, та підтримання заданої температури. Котли класифікують на побутові чи індивідуальні (діапазон потужностей яких складає від 10 до 100 кВт) та промислові потужністю до 50 МВт [16].

Конструкція котла не залежить від того який газ використовують чи природній газ, чи біогаз, проте це не стосується такого вузла, як – пальника. Тому що він слугує для змішування газу з повітрям та підтримання стабільності горіння.

Пальники є дифузні (рис. 1.2) (процес змішування газу із повітрям відбувається в процесі горіння) та інжекторні (рис. 1.3) (процес змішування із повітрям відбувається перед процесом горіння). При роботі газового котла необхідно враховувати склад газу (табл.1.1). Очевидно, що для згорання 1 м³ біогазу необхідно близько 5,7 м³ повітря, а для згорання природних газів: бутану - 30,9 м³ та пропану - 23,8 м³. Тому для роботи на біогазі пальники оснащують більшою кількістю жиклерів із збільшеним поперечним перерізом [16].

Таблиця 1.1. Склад природного газу (метану) та біогазу [9, 10]

Газ	Од.	Метан	Біогаз
CH ₄	%	85-95	55-
CO ₂	%	<1,0	20...45
N ₂	%	4...12	–
O ₂	%	<0,5	–
H ₂	%	-	<1,0
H ₂ S	мг/м ³	50-100	500...5000
Теплотворна здатність	МДж/м ³	32-35	20...29

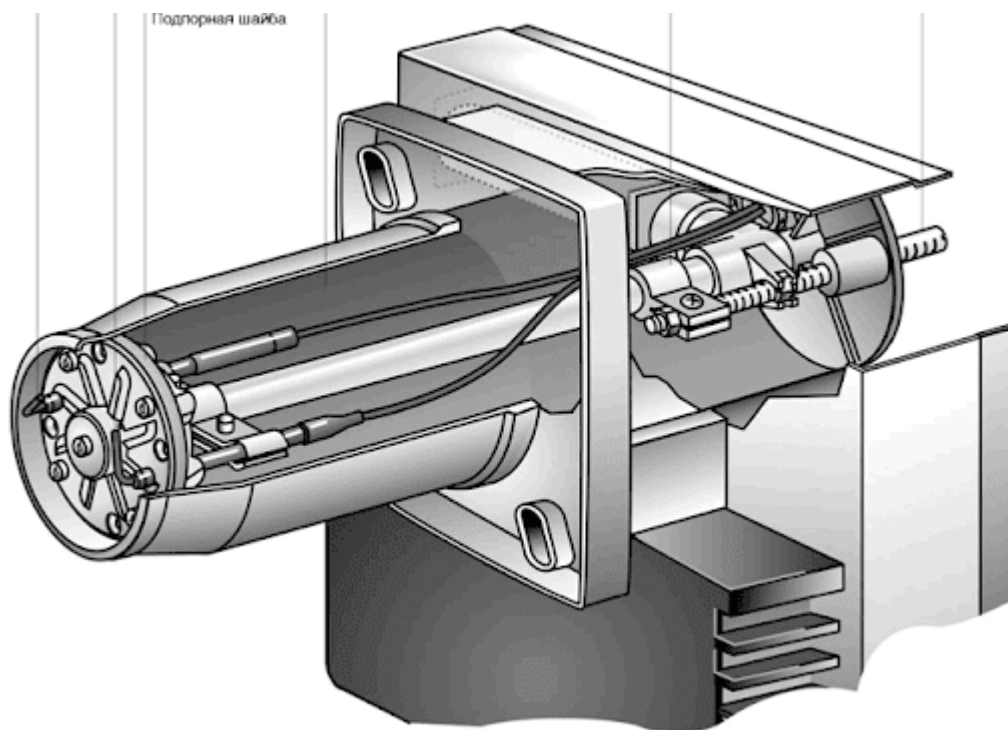


Рис. 1.2. Дифузійний пальник [11]

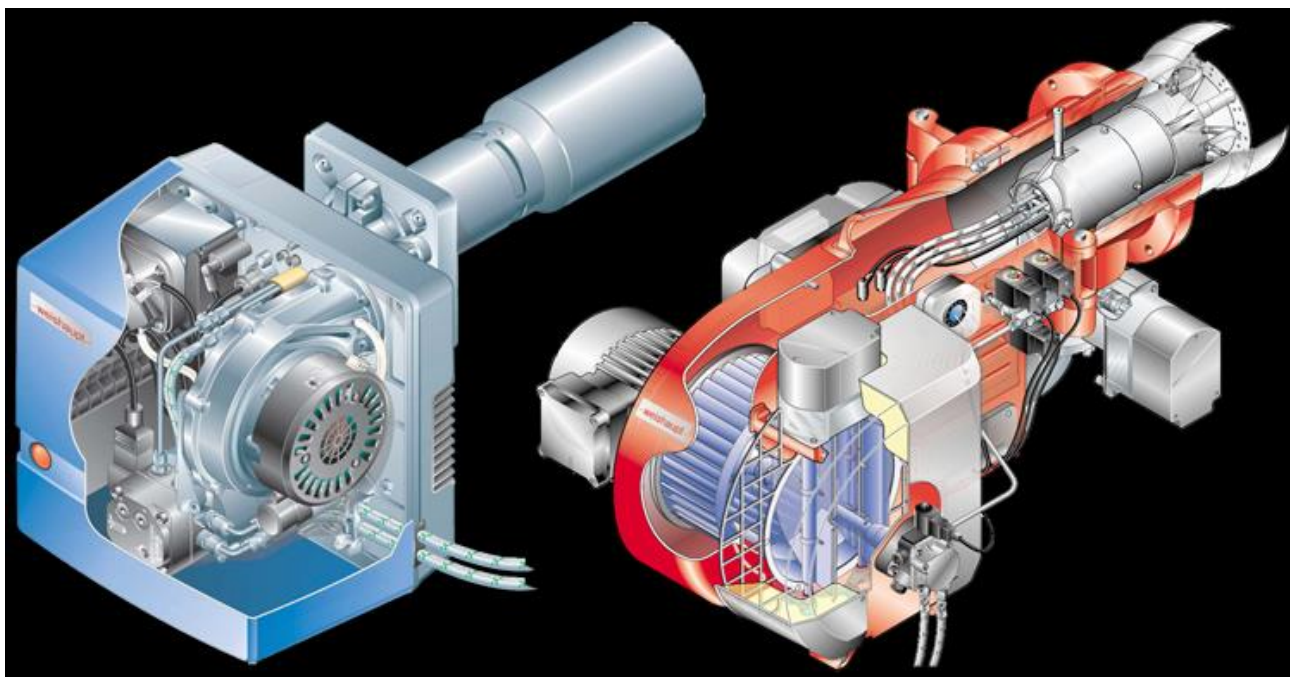


Рис. 1.3. Інжекторний пальник [9, 10, 12]

Також ефективним використання тепла отриманого із біогазу в процесах сушіння сільськогосподарської продукції.



Рис. 1.4. Сушарка сільськогосподарської продукції на біогазі на біогазі [13]

Сушарки, на біогазі фактично відрізняються від традиційних наявністю відповідного пальника.

Якщо розглядати сучасну схему використання біогазових установок (рис. 1.5) то біогаз може використовуватися для когенерації або подаватися при відповідному очищенні іта збагаченні в загальну газову мережу [16].

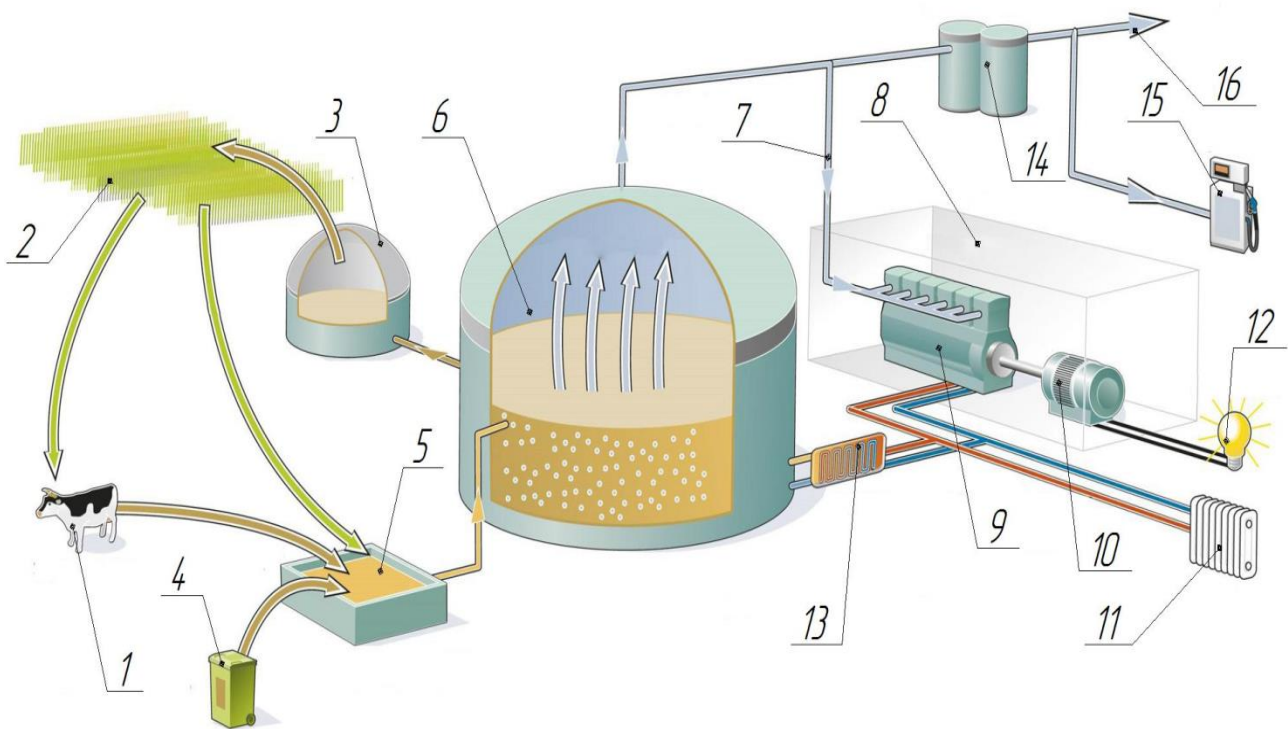


Рис. 1.5. Використання біогазу та біометану [9, 10, 14, 16]

1 – тваринницька галузь, 2 – рослинницька галузь, 3 – дигестат, 4 – харчові відходи, 5 – змішування субстрату, 6 – біогазова установка оснащена газовим резервуаром, 7 – біогазова мережа, 8 – когенераційна установка, 9 – ДВЗ, 10 – електричний генератор, 11 – виробництво теплової енергії, 12 – виробництво електричної енергії, 13 – тепла енергія для внутрішніх потреб установки, 14 – очистка та збагачення біогазу, 15 – заправочна станція, 16 – газова мережа

Необхідно також зауважити про використання біогазу чи біометану в когенераційних установках (рис. 1.6). Відомо, що когенерація це коли одночасно виробляється тепло та електрична енергія [9, 10]. Когенераційна установка складається газової турбіни чи поршневого двигуна, електричного генератора, теплообмінника і системи керування. Їх потужність варіюється від невеликою (0,5-2 МВт) для поршневих установок до значної (більше 20 МВт) для турбінних установок[16].

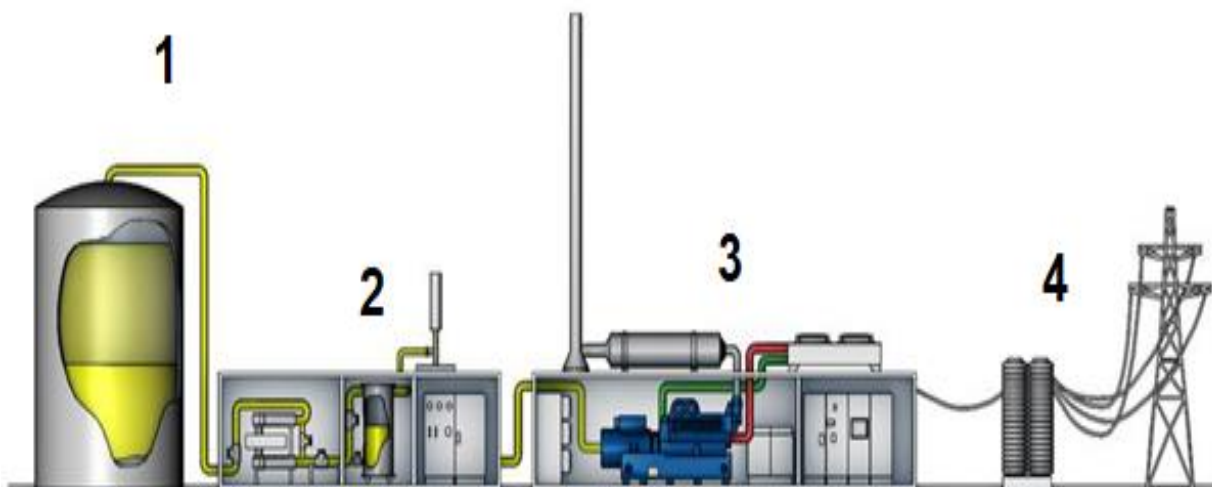


Рис. 1.6. Схема когенераційної установки: 1 – біогаз, 2 – очищення біогазу, 3 – когенератор, 4 – електрична мережа [15]

Для агарного виробництва доречним є використання поршневих когенераційних установок, які працюють від двигунів внутрішнього згоряння, паливом для яких служить біогаз. Електричний коефіцієнт корисної дії таких установок досягає 40 %, а тепловий – 50 %. Максимальна потужність таких установок становить до 5..7 МВт [16].

Дуже важливим фактором у виробництві біогазу є збирання суміші гною та підстилки з району тваринницьких будівель, поділ насосом та остаточне видалення (рис. 4). Біореактор використовується для анаеробного травлення для отримання біогазу. Для ввиробництва компосту використовують відпрацьований субстрат і підстилковий гній. Отриманий компост використовують як органічне добриво.

Для поділу на різні фракції, як правило, використовується конвеєр-сепаратор. Підготовка біомаси до бродіння метану проводиться в нагрівачі з подальшим анаеробним перетравленням біомаси. Після цього здійснюється анаеробне перетравлення біомаси. Процес переробки закінчується компостуванням посліду, гною та перетравленої біомаси. Отриманий компост

використовують як органічне добриво [4, 5, 17, 19].

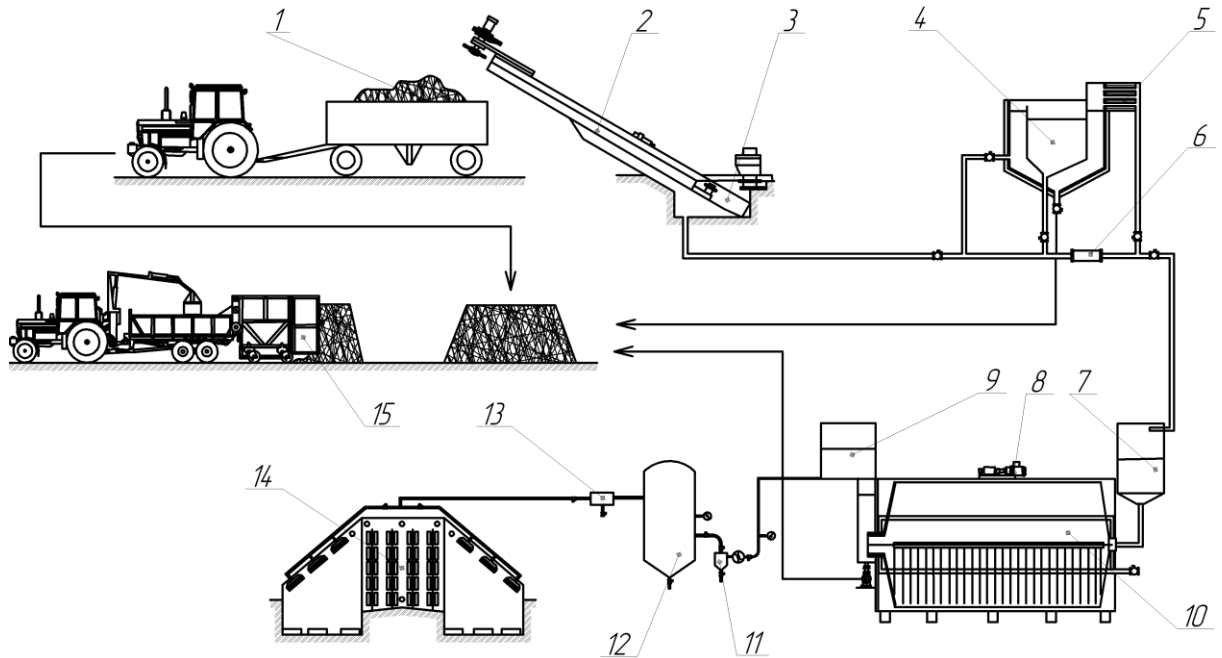


Рис. 1.7. Покращений технічний план утилізації та переробки гною
1 – гній; 2 – конвеєр-сепаратор; 3 – гноєзбірник; 4 – обігрівач; 5, 7 – теплообмінники; 6 – насос; 8 – станція приводу біореактора; 9 – інокулятор; 10 – біореактор; 11 – знезволожувач; 12 – газгольдер; 13 – газовий редуктор; 14 – теплиця; 15 – площа компостування [4, 5, 17, 19]

Науковцями Поліського національного університету [4, 5, 8, 17, 19] було розроблено нове технічне рішення для змішування субстрату в реакторі. Ідея заснована на зміні напрямку гравітаційних сил, що впливають на рух органічної та мінеральної фракцій біомаси. Корпус реактора виконаний у вигляді горизонтального циліндра, який обертається навколо горизонтальної осі. Реактор обертається в рідині, що знаходиться у спеціальній ванні. Ця конструкція створює підйомну силу для обертового реактора. Відтак тертя зменшується, а отже, зменшуються втрати енергії для обертання реактора та змішування біомаси. Конструкція біореактор також виключає можливість створення плаваючої кірки та

зануреного твердого осаду [4, 5, 17, 19].

Висновки до розділу 1

Досвід використання біогазових реакторів показав, що через три-чотири роки роботи реактори вже наполовину наповнені осадом, який можна видалити лише екскаватором після повної зупинки процесу бродіння. Зверху біомаси утворюється кірка, яка ущільнюється і також потрібно зупинити реактор для його видалення. Тому для уникнення цих недоліків ми пропонуємо використовувати обертовий реактор модульної конструкції.

Крім того, потрібно перевірити гіпотезу, згідно з якою втрати енергії для обертових реакторів можуть бути зменшені, якщо обертовий реактор частково занурити у воду.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою експериментального дослідження було перевірити нашу гіпотезу, згідно з якою втрати енергії для обертових реакторів можуть бути зменшені, якщо обертовий реактор частково занурити у воді. Для перевірки гіпотези був використаний експериментальний реактор. Першочерговою метою дослідження було оцінити різні умови роботи обертового реактора та описати оптимальні умови роботи в малих масштабах, а також встановити основні геометричні параметри. На основі встановленої та описаної кореляції модель може бути поширена в майбутньому на інші реактори.

В якості субстратів використовували гній великої рогатої худоби та свиней. Конструктивна модель обертового реактора показана на рис. 2.1.

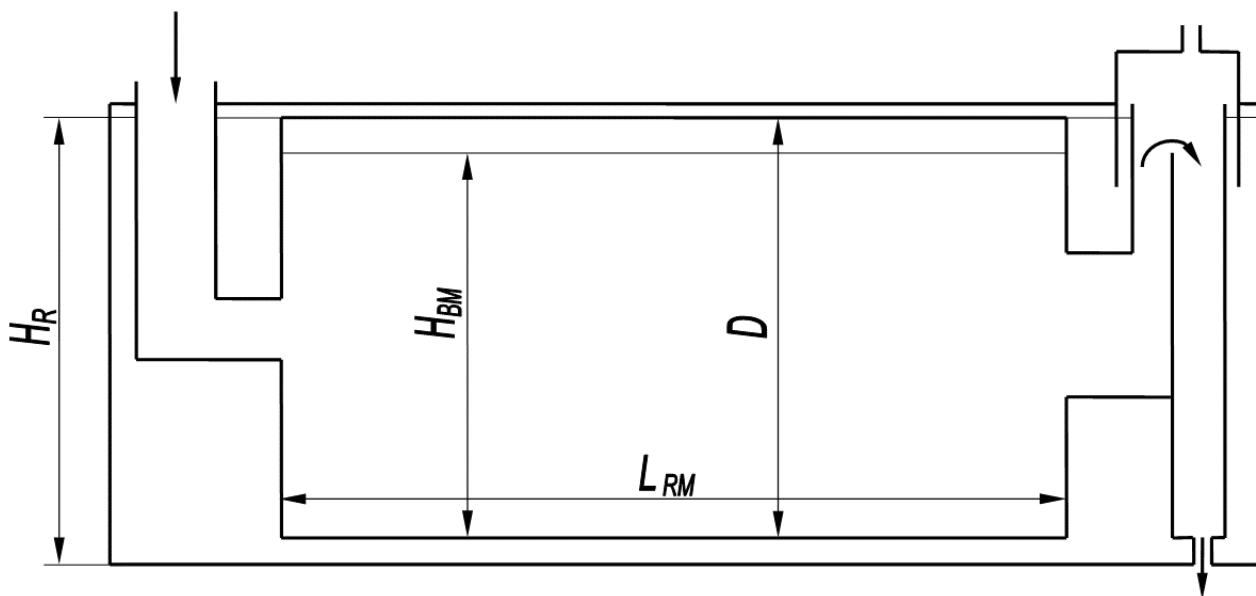


Рис. 2.1. Конструктивна модель обертового реактора для виробництва біогазу

Конструкція обертового реактора, яка використовується в дослідженнях, представлена на рис. 2.2. Для забезпечення обертання реактора необхідно застосувати обертальний момент, значення якого:

$$M_{об} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 - M_5 + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.1)$$

де $M_{об}$ – момент для забезпечення обертання, Н м;

M_1 – момент опору вузла підшипника, Н м;

M_2 – момент в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об воду, в яку занурений реактор, Н м;

M_3 – момент обертового тертя внутрішньої частини реактора об рідку біомасу всередині реактора, Н м;

M_4 – момент необхідний для забезпечення підйому біомаси у реакторі під час його обертання, Н м;

M_5 – момент, що генерується зниженням потоків біомаси всередині реактора під час його обертання, Н м;

J – момент інерції конструкції реактора на вісь його обертання, кг м²;

ω – кутове прискорення обертання реактора, рад/с².

Реально дослідна установка складалася (рис. 2.3) з обертового реактора – 1, ванни для занурення реактора (на рисунку не показано), перетворювача частоти – 2, ноутбука – 3 та приладу для контролю споживаної потужності – 4.

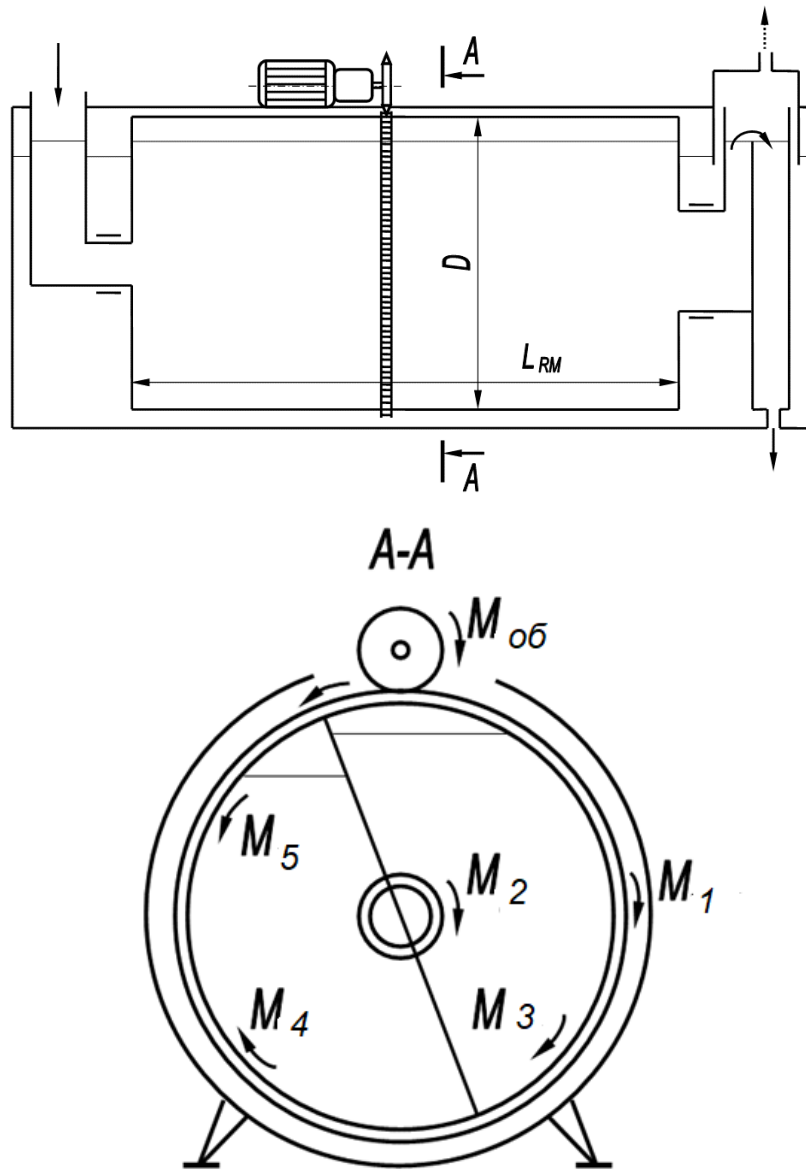


Рис. 2.2. Конструкція обертового реактора, яка використовується в дослідженнях:

$M_{об}$ – момент для забезпечення обертання, Н м; M_1 – момент опору вузла підшипника, Н м; M_2 – момент в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об воду, в яку занурений реактор, Н м; M_3 – момент в'язкого тертя внутрішньої поверхні реактора об рідку біомасу всередині реактора, Н м; M_4 – момент необхідний для забезпечення підйому біомаси у реакторі під час його обертання, Н м; M_5 – момент, що генерується зниженням потоків біомаси всередині реактора під час його обертання, Н м;

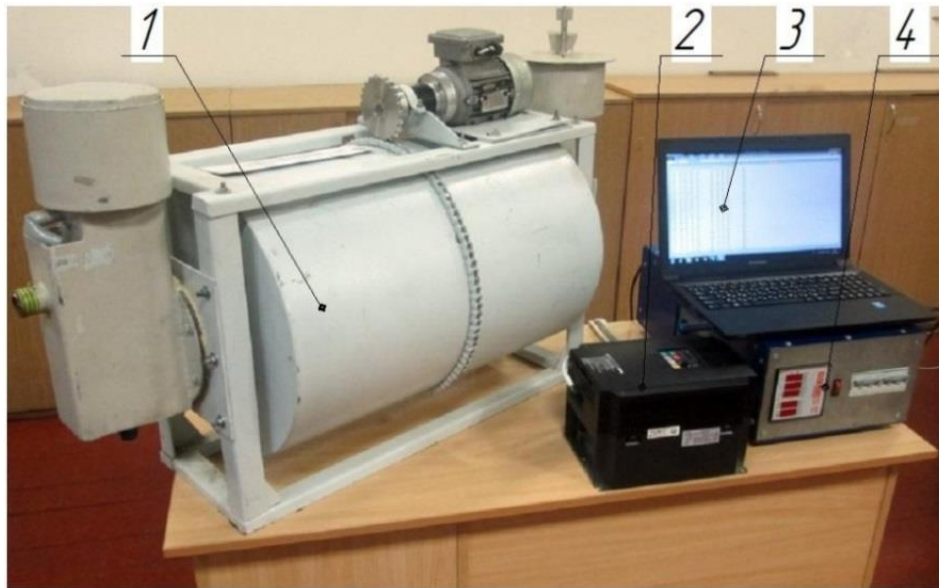


Рис. 2.3. Реальна конструкція дослідної установки: з обертовий реактор – 1, перетворювач частоти – 2, ноутбук – 3, прилад для контролю споживаної потужності – 4

Під час досліджень у ванну для занурення був встановлений реактор (із такими розмірами внутрішній діаметр $D=0,4$ м, робоча довжина $L_{RM}=0,6$ м, рис. 2.1), заповнений біомасою від 0 до 100%. Ванну заповнювали водою на рівні від 0 до 100%. Вага реатора варіювалась від 110 до 1020 Н. Частоту обертання приводного двигуна регулювали за допомогою перетворювача частоти, що дозволило отримати діапазон кутових швидкостей реатора від 0,05 до 0,5 рад/с. Потужність, споживану приводним двигуном, визначали за допомогою цифрового лічильника потужності і реєстрували за допомогою спеціального програмного забезпечення на ноутбуці. Для обертання реактора використовувався асинхронний однофазний двигун номінальною потужністю 100 Вт.

Оптимальне виробництво біогазу відбувається за таких умов: температура $36...38^{\circ}\text{C}$, кислотність субстрату $7\pm 0,5$ значень рН та вологість субстрату $95\pm 1\%$. Максимальний розмір твердих компонентів біомаси – до 20 мм.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Щоб забезпечити плавання реактора, необхідно дотримуватися принципу Архімеда:

$$\rho_6 V_3 = \rho_p V_p \delta = m_1 + m_2 + m_3, \quad (3.1)$$

де ρ_6 – щільність води, куди занурений реатор, кг/м³;

V_p – об'єм зануреного у воду реактора, м³;

V – весь об'єм реактора, м³;

$\delta = \frac{V_3}{V_p}$ – рівень занурення обертового реактора у воду, відносні одиниці;

m_1 – маса металу реактора, кг;

m_2 – маса органічного матеріалу в реакторі, кг; маса біогазу в обертовому варочному котлі, кг.

m_3 – маса біогазу в реакторі, кг

Після розділення компонентів рівняння (3.1) на величину занурення реактора у воду отримаємо:

$$\delta = \frac{m_1}{\rho_p V_p} + \frac{V_p \gamma \rho_p}{\rho_p V_p} + \frac{V_p (1-\gamma) \rho_6}{\rho_p V_p} = \frac{m_1}{\rho_p V_p} + \gamma \frac{\rho_p}{\rho_6} + (1-\gamma) \frac{\rho_p}{\rho_6}, \quad (3.2)$$

де γ – рівень заповнення реактора органічною біомасою, відносні одиниці;

ρ_P – щільність органічних матеріалів у реакторі, кг/м³;

ρ_B – щільність біогазу в реакторі, кг/м³.

Щільність рідини, куди занурений обертовий реактор, приблизно дорівнює щільності органічного матеріалу в реактора; щільність біогазу в реакторі менше щільності рідини, де занурений обертовий реактор, тому коефіцієнт занурення можна описати, як:

$$\delta = \frac{\rho_M V_M}{\rho_P V_P} + \gamma, \quad (3.3)$$

де ρ_M – щільність металу, кг/м³;

V_M – об'єм металу, що використовується для реактора, м³.

Множення кожного елемента формули (2.1) на кутову швидкість обертання реактора призводить до формули потужності:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - P_5 + J\omega \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.4)$$

де ω – кутова швидкість обертання реактора, рад/с;

P – потужність для забезпечення обертання реактора, Вт;

P_1 – потужність опору вузла підшипника, Вт;

P_2 – потужність в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора водою, в яку занурений реактор, Вт;

P_3 – сила в'язкого тертя внутрішньої поверхні реактора над рідкою біомасою, що міститься у реакторі, Вт;

P_4 – потужність для забезпечення підйому біомаси у реакторі під час його обертання, Вт;

P_5 – потужність потоку в біомасі, що знижується у реакторі під час його обертання, Вт.

Потужність, яку споживає приводний двигун від електромережі, або споживана потужність, становитиме:

$$P_{СП} = \left(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - P_5 + J\omega \frac{d\omega}{dt} \right) (\eta_{oe} \eta_{nid} \cos \phi)^{-1}, \quad (3.5)$$

де $P_{СП}$ – потужність, споживана приводним двигуном реактора від електромережі, Вт;

η_{oe} – коефіцієнт корисної дії електромотора, відносна одиниця;

η_{nid} – коефіцієнт продуктивності приводу, відносна одиниця;

$\cos \phi$ – частка активної потужності при номінальній потужності електромотора, відносна одиниця.

Рівняння (3.5) – це енергетичний баланс обертового приводу реактора. Постійне значення споживаної потужності можливе лише при повному заповненні внутрішнього обсягу реактора. Оскільки частина об'єму реактора заповнюється біогазом, внутрішні переливи води у реакторі призведуть до циклічних ударів, які порушать статичну рівновагу обертового реактора та призведуть до циклічних змін навантаження.

Фактична зміна спожитої електричної потужності, яка витрачається на привід експериментального реактора, заповненого на 95 %, із внутрішнім об'ємом 0,08 м³ (радіусом 0,2 м) і на рівні його занурення у воду на 80 %, наведена на рис. 3.1.

Ми експериментально визначили середню потужність, необхідну для прокручування обертового реактора, залежно від його рівня заповнення (рис. 3.2).

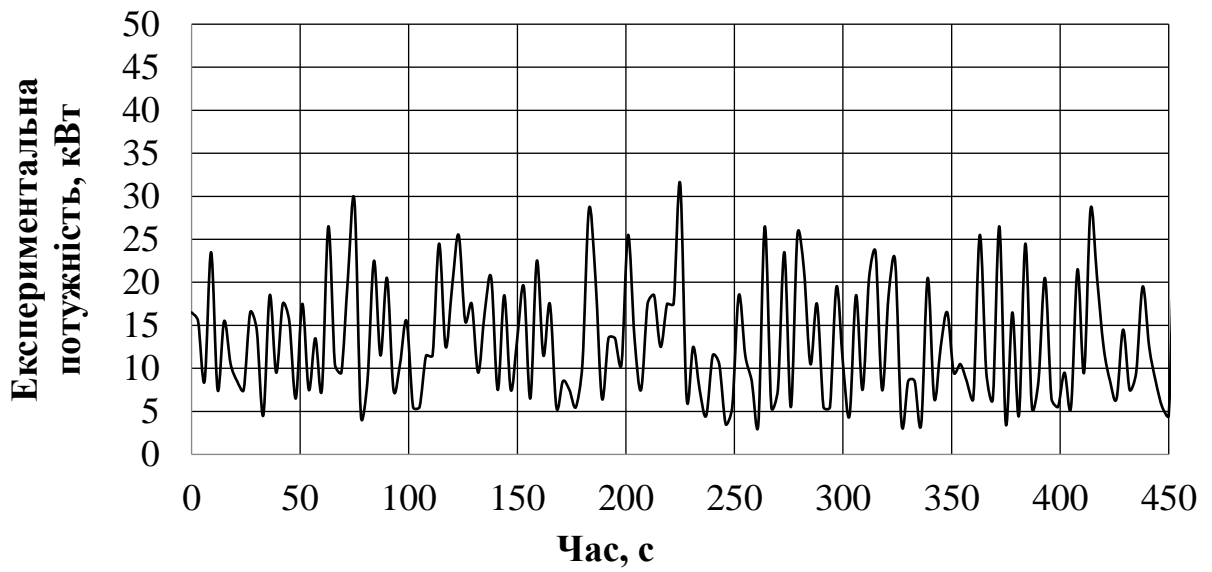


Рис. 3.1. Зміна енергоспоживання під час роботи обертового реактора

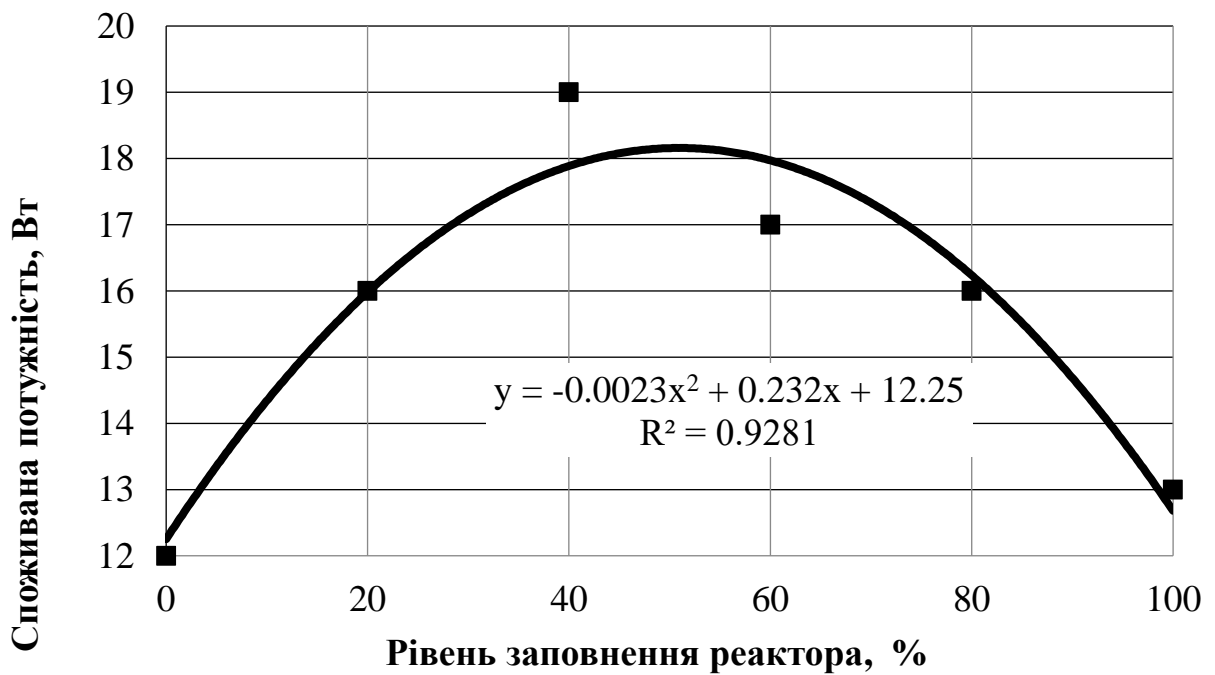


Рис. 3.2. Вплив коефіцієнта заповнення роторного реактора на потужність приводного механізму

Середнє споживання потужності, необхідної для прокручування обортового реактора, залежно від його рівня занурення, наведено на рис. 3.3.

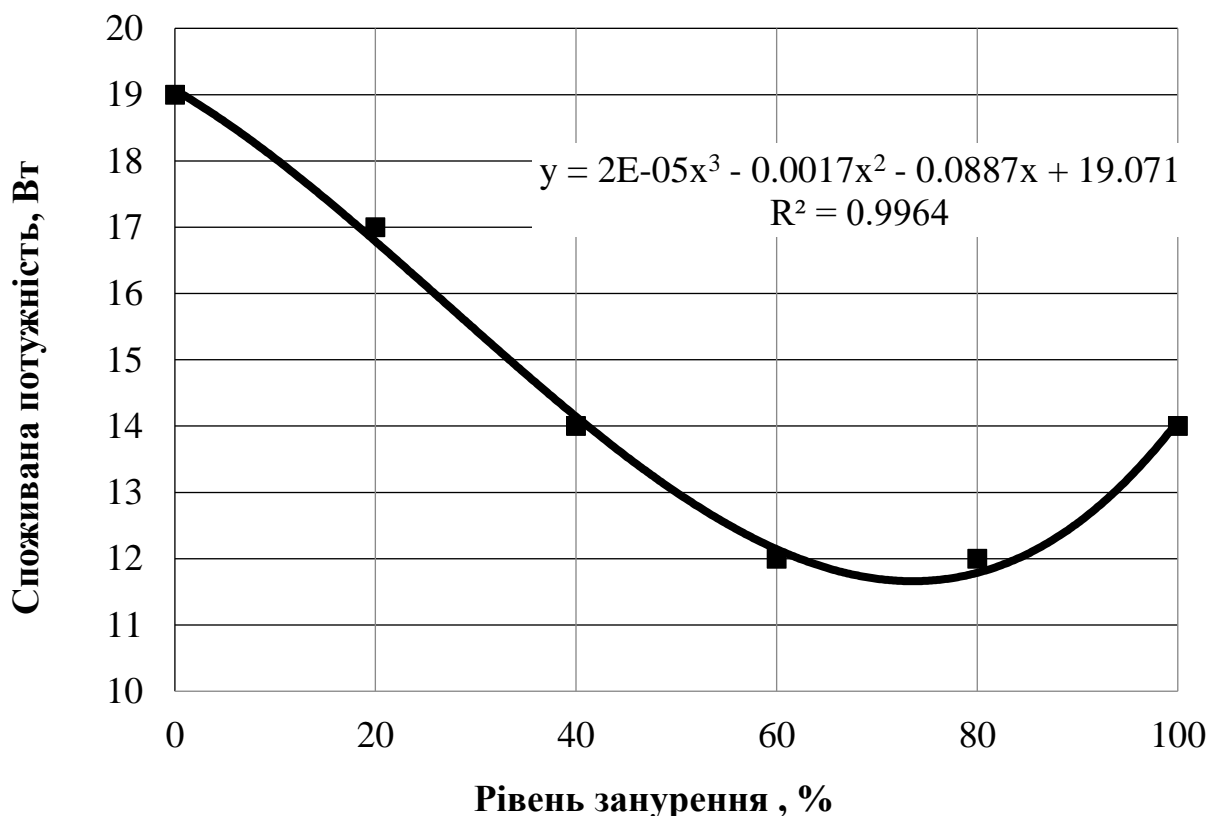


Рис. 3.3. Вплив рівня занурення заповненого реактора на потужність приводного механізму

Після аналізу отриманих в результаті дослідження даних ми можемо стверджувати, що для заповненого на 96% обортового реактора із внутрішнім об'ємом $0,08 \text{ м}^3$ (радіусом $0,2 \text{ м}$) необхідна мінімальна потужність $11,7 \text{ Вт}$ для приводу при зануренні його у воду на 76% . При цьому питома потужність приводного механізму з урахуванням обсягу біомаси в реакторі становитиме $0,18 \text{ кВт/м}^3$.

Висновки до розділу 3

Мінімальна необхідна потужність спостерігається для заповненого на 96% обертового реактора із внутрішнім об'ємом $0,08 \text{ м}^3$ (радіусом $0,2 \text{ м}$) і вона становить $11,7 \text{ Вт}$ для приводу при зануренні його у воду на 76% . При цьому питома потужність приводного механізму з урахуванням обсягу біомаси в реакторі становитиме $0,18 \text{ кВт/м}^3$.

ВИСНОВКИ

Досвід використання біогазових реакторів показав, що через три-чотири роки роботи реактори вже наполовину наповнені осадам, який можна видалити лише екскаватором після повної зупинки процесу бродіння. Зверху біомаси утворюється кірка, яка ущільнюється і також потрібно зупинити реактор для його видалення. Тому для уникнення цих недоліків ми пропонуємо використовувати обертовий реактор модульної конструкції.

Крім того, потрібно перевірити гіпотезу, згідно з якою втрати енергії для обертових реакторів можуть бути зменшені, якщо обертовий реактор частково занурити у воду.

Що стосується тваринницьких ферм, то управління гноєм, яке включає збір, обробку та подальше використання, є дуже важливим питанням ретельної організації виробництва. Відпрацьований в реакторі гній і підстилку можна використовувати як компостну сировину. Отриманий компостний матеріал, як покращував ґрунту, можна розносити на орні землі.

Після аналізу отриманих в результаті дослідження даних ми можемо стверджувати, що для заповненого на 96% обертового реактора із внутрішнім об'ємом $0,08 \text{ м}^3$ (радіусом $0,2 \text{ м}$) необхідна мінімальна потужність $11,7 \text{ Вт}$ для приводу при зануренні його у воду на 76% . При цьому питома потужність приводного механізму з урахуванням обсягу біомаси в реакторі становитиме $0,18 \text{ кВт/м}^3$.

Список використаних джерел

1. Кузьменко М. Фермерський біогаз / М. Кузьменко, Г. Голуб, С. Кухарець // *The Ukrainian Farmer*. – 2016. - №7. – С. 70-71.
2. Adouani N., Pons M.-N., Hreiz R., Pasaud S. 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. Vol. 49, Issue. 7, pp. 1169–1174.
3. Carrerea H., Antonopoulou G., Affes R. Review of feedstock pre-treatment strategies for improved anaerobic digestion: From lab-scale research to full-scale application, *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 199, pp. 386–397.
4. Виробництво і використання біопалив в агроєкосистемах. Механіко-технологічні основи : монографія / Голуб Г.А., Кухарець С.М., Чуба В.В., Марус О.А. Київ : НУБіП України, 2018. 254 с.
5. Пат. 110077 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 3/28. Метантенк / Голуб Г. А., Кухарець С. М. ; заявник і патентовласник Нац. ун.-т. біоресурсів і природокристування України. – № а201409259 ; заявл. 19.08.2014 ; дата публікації 10.11.2015, Бюл. № 21.
6. Golub, G. A., Kukharets, S. M., Yarosh, Y. D., Kukharets, V. V. Integrated use of bioenergy conversion technologies in agroecosystems. *ISB-INMA THE, Agricultural and Mechanical Engineering*. 2016. P. 145–154.
7. Satjaritanuna P., Khunatorna Y., Vorayosa N. Numerical analysis of the mixing characteristic for napier grass in the continuous stirring tank reactor for biogas production, *Biomass and Bioenergy*. 2016. Vol. 86, pp. 53–64.
8. Golub G., Kukharets S., Zavadska 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.

9. Біоенергетичні системи в аграрному виробництві: навчальний посібник / [Голуб Г.А., Кухарець С.М. Марус О.А. та ін.]; за ред. Г.А. Голуба. – К.: НУБіП України, 2017. – 229 с.

10. Скидан О.В., Голуб Г.А., Кухарець С.М. Ярош О.Д., Чуба В.В., Медведський О.В., Цивенкова Н.М., Соколовський О.Ф., Кухарець В.В. Відновлювана енергетика в аграрному виробництві. За ред. О.В. Скидна і Г.А. Голуба. Київ, НУБіП України. 2018. 338 с.

11. <http://oteplo.com/tehnicheskie-karakteristiki-gazovykh-gorelok/>

12. https://avtonomnoeteplo.ru/otopitelnye_kotly/310-gazovye-gorelki-dlya-kotlov.html

13. <https://stela.in.ua/photos/13029-strichkovi-susharki-dlya>

14. <https://www.unendlich-viel-energie.de/>

15. 7. http://ges-ukraine.com/maininfo_42.html

16. Порицький Т.В. Технології використання біогазу. Біоенергетичні системи: матеріали IV Міжн. наук.-практ. конф. Частина 2, 29 трав. 2020 р. Житомир : Вид.-во ПНУ, 2020. С. 114–118.

17. 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.

18. Особливості конструкції модульної біогазової установки з обертовим реактором / Г. Голуб, С. Кухарець, Б. Рубан // Техніка і технології АПК. 2014. № 9 (60). С. 10–14.