

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри  
електротехніки, електромеханіки та  
електротехнологій

К.Т.Н., доцент ОКУШКО О.В.  
(підпис)

«                      » 2026 р.

**БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему: "Проектні рішення з підвищення енергоефективності біогазової  
установки"**

Спеціальність 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”

**Гарант освітньої програми**

доцент Синявський О.Ю.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

**Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи**

К.Т.Н., доцент Усенко С.М.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

**Виконав** Іваницький В.В.  
(підпис) (ПІБ)

**КИЇВ – 2026**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач

К.Т.Н., доцент

**ОКУШКО О.В.**

(підпис)

« \_\_\_\_\_ »

2026 р.

**З А В Д А Н Н Я**

**на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту  
Іваницькому Владиславу Васильовичу**

Спеціальність 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: “Проектні рішення з підвищення енергоефективності біогазової установки”

затверджена наказом ректора НУБіП України від "26" червня 2025 №2606 «С».

Термін подання завершеного проєкту на кафедру "15" Травняч 2026 р.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи:

- 1) Правила улаштування електроустановок (ПУЕ).
- 2) Правила будови електроустановок (електрообладнання спеціальних установок).
- 3) Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.
- 4) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
- 5) Правила користування електричною енергією.
- 6) Система ПЗР і ТО електрообладнання сільськогосподарських підприємств.

Перелік питань, які потрібно розробити:

- 1) Аналіз стану, перспектив і напрямків реалізації завдань, вирішуваних у проєкті.
- 2) Технологічна частина.
- 3) Електротехнічна частина проєкту.
- 4) Спеціальне завдання: «Підвищення енергетичної ефективності біогазової установки шляхом впровадження системи рекуперації теплоти».
- 5) Обслуговування і ремонт енергетичного обладнання.
- 6) Охорона праці.
- 7) Висновки. Список використаних джерел.
- 8) Додатки.

Перелік графічних документів:

Лист 1. Принципова електрична схема біогазової установки.

Лист 2. Принципова електрична схема керування системою —Кристал”.

Лист 3. Схема електричних з'єднань ящика керування біогазовою установкою.

Лист 4. Технологічна схема біогазової установки.

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 31 жовтня 2025 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ **Усенко С.М.**  
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ **Іваницький В.В.**  
(підпис) (ПІБ)

[illegible]

## ЗМІСТ

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                      | 8  |
| 1.ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА.....                                          | 10 |
| 1.1 Сучасний стан та стратегічні пріоритети розвитку біогазових технологій..... | 10 |
| 1.2 Характеристика об'єкта дослідження та його сировинної бази .....            | 10 |
| 1.3 Аналіз технологічних режимів роботи та їх енергетичної ефективності.....    | 11 |
| 1.4 Обґрунтування напряму досліджень з підвищення енергоефективності.....       | 12 |
| 2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....                                                    | 13 |
| 2.1 Теоретичний аналіз мікробіологічних стадій анаеробної ферментації.....      | 13 |
| 2.1.1 Стадія гідролізу .....                                                    | 14 |
| 2.1.2 Стадія ацидогенезу (кислотоутворення).....                                | 14 |
| 2.1.3 Стадія ацетогенезу .....                                                  | 14 |
| 2.1.4 Стадія метаногенезу .....                                                 | 14 |
| 2.1.5 Вплив температурного режиму на стабільність біоценозу .....               | 14 |
| 2.2 Характеристика та підготовка сировини для зброджування.....                 | 15 |
| 2.2.1 Аналіз властивостей субстрату.....                                        | 16 |
| 2.2.2 Процес підготовки сировини (Попередня обробка).....                       | 17 |
| 2.2.3 Вплив водневого показника (рН) на мікробіологічну стабільність .....      | 17 |
| 2.3 Дослідження динаміки виходу біогазу за різних режимів завантаження.....     | 18 |
| 3. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....                                                 | 25 |
| 3.1 Короткий опис функціональної кінематичної схеми.....                        | 25 |

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2 Розрахунок і побудова механічної характеристики робочої машини .....                                                                                        | 26 |
| 3.3 Попередній вибір електродвигуна за потужністю та частотою обертання .....                                                                                   | 29 |
| 3.4 Вибір електродвигуна за електричними модифікаціями, конструктивним виконанням, кліматичним виконанням, ступенем захисту від дії оточуючого середовища ..... | 29 |
| 3.5 Розрахунок і побудова механічної характеристики.....                                                                                                        | 30 |
| 3.6 Визначення тривалості пуску електродвигуна .....                                                                                                            | 32 |
| 3.7 Перевірка вибраного електродвигуна за тепловим режимом під час пуску .....                                                                                  | 34 |
| 3.8 Перевірка вибраного електродвигуна на перевантажувальну здатність .....                                                                                     | 35 |
| 3.9 Розробка (або вибір) схеми керування електродвигуном установки .....                                                                                        | 35 |
| 3.10 Вибір апаратів керування, інших елементів схеми автоматичного керування, а також вибір електропроводок .....                                               | 37 |
| 3.10.1 Вибір автоматичного вимикач з функцією захисту двигуна.....                                                                                              | 38 |
| 3.10.2 Вибір електромагнітного пускача.....                                                                                                                     | 38 |
| 3.10.3 Вибір низьковольтного комплектного пристрою НКП .....                                                                                                    | 39 |
| 3.10.4 Вибір запобіжника.....                                                                                                                                   | 39 |
| 3.10.5 Вибір кнопкового поста.....                                                                                                                              | 39 |
| 3.10.6 Вибір кабеля.....                                                                                                                                        | 39 |
| 3.10.7 Вибір перемикача.....                                                                                                                                    | 39 |
| 3.11 Перелік вибраного електрообладнання .....                                                                                                                  | 39 |
| 4. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ.....                                               | 40 |
| 4.1 Аналіз резервів енергозбереження та методів рекуперації теплової енергії.....                                                                               | 40 |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2 Розробка та обґрунтування технологічних схем теплоутилізації.....             | 41 |
| 4.2.1 Пряма рекуперація теплової енергії.....                                     | 41 |
| 4.2.2 Рекуперація теплової енергії з використанням термотрансформаторів.....      | 42 |
| 4.3 Удосконалення конструкції біореактора з рекуператором інтенсивної дії.....    | 44 |
| 4.4 Оцінка ефективності запропонованого конструктивного рішення.....              | 46 |
| 5. ЗАХОДИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ.....                              | 48 |
| 5.1 Організаційно-технічні заходи з енергозбереження на біогазовій установці..... | 48 |
| 5.2 Енергозберігаючий ефект від впровадження системи рекуперації теплоти .....    | 49 |
| 5.3 Зниження енерговитрат за рахунок мікропроцесорної автоматизації.....          | 49 |
| 6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТИХ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ .....             | 51 |
| 6.1 Розрахунок капітальних вкладень у модернізацію біогазової установки.....      | 51 |
| 6.2 Визначення річної економії від впровадження енергозберігаючих заходів.....    | 51 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                     | 52 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                   | 53 |

## ВСТУП

Біомаса являє собою акумульовану сонячну енергію, яка завдяки сучасним технологіям трансформується у тверді, рідкі або газоподібні види палива. Основною сировиною для її отримання слугують відходи агропромислового комплексу, залишки лісозаготівлі та органічні відходи підприємств.

Отримання енергії з біомаси найчастіше реалізується двома методами: прямим спалюванням (яке є менш ефективним) та біогазовою конверсією (газифікацією). Останній підхід є значно продуктивнішим, оскільки дозволяє отримувати універсальний енергоносіє — біогаз, придатний як для прямого забезпечення теплових потреб, так і для високоефективної генерації електроенергії.

За своєю природою біогаз є локальним відновлюваним джерелом енергії, що утворюється внаслідок анаеробного зброджування органіки. Його основу складає метан (50–80%) та вуглекислий газ (10–20%), з незначними домішками сірководню (близько 1%) й аміаку.

Спектр застосування біогазу надзвичайно широкий: від підігріву води для опалення приміщень і сушіння сільськогосподарської продукції до використання як пального для стаціонарних газових двигунів.

Такі двигуни внутрішнього згоряння, порівняно з традиційними паросиловими устаткуваннями, відзначаються вищим коефіцієнтом корисної дії та простотою експлуатації, дозволяючи генерувати електричну потужність в установках від 0,5 до 5 МВт.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 8    |

**Актуальність.** У сучасних умовах стрімкого зростання вартості традиційних енергоносіїв та необхідності зниження екологічного навантаження на довкілля, використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біогазових технологій, набуває стратегічного значення. Однак біогазові установки самі є споживачами значної кількості електричної та теплової енергії на власні технологічні потреби (підігрів субстрату, робота мішалок, перекачування насосами).

Підвищення загальної енергоефективності таких об'єктів за рахунок впровадження сучасного енергозберігаючого електрообладнання та систем автоматизації дозволяє суттєво збільшити частку корисного відпуску енергії.

**Мета дослідження** - обґрунтувати та розробити комплекс проєктних рішень щодо модернізації системи електрообладнання та засобів автоматизації біогазової установки для зниження її внутрішнього енергоспоживання та підвищення загальної енергоефективності.

**Об'єкт дослідження** - технологічні процеси функціонування та енергозабезпечення біогазової установки.

**Предмет дослідження** - система електрообладнання, засоби автоматизованого керування та режими їх роботи, що забезпечують підвищення енергоефективності біогазової станції.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     |      |

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА

#### 1.1 Сучасний стан та стратегічні пріоритети розвитку біогазових технологій

В умовах глобальної енергетичної трансформації та переходу до декарбонізованої економіки, біогазові технології посідають чільне місце серед відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Згідно з останніми аналітичними звітами [21], потенціал виробництва біогазу в Україні оцінюється у понад 7,8 млрд м<sup>3</sup> на рік, що зумовлено потужним аграрним сектором.

Основною перевагою біогазових станцій є їхня здатність працювати у базовому режимі, на відміну від сонячних чи вітрових електростанцій. Це робить їх критично важливими для стабілізації частоти та напруги в локальних електричних мережах. Проте, як зазначається у роботах [22, 23], ключовим бар'єром для ширшого впровадження залишається висока питома вартість енергії, що зумовлена значними витратами на власні потреби установки (до 20-30% виробленої енергії витрачається на підігрів та перемішування). Тому розробка проєктних рішень із підвищення енергоефективності є першочерговим завданням сучасної енергетики.

#### 1.2 Характеристика об'єкта дослідження та його сировинної бази

Об'єктом дослідження є біогазова установка фермерського типу, призначена для переробки відходів тваринництва (рідкого гною). Реактор установки має циліндричну форму із загальним об'ємом 51,3 м<sup>3</sup>. Ефективний робочий об'єм рідкої фази становить 40,8 м<sup>3</sup>. Конструкція передбачає систему завантаження сировини, метантенк із теплоізоляцією, перемішувальні пристрої та систему відбору біогазу.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     |      |

Сировиною для зброджування є гній ВРХ, який характеризується вмістом сухої органічної речовини (СОР) на рівні, достатньому для стабільного метаногенезу. Температурний режим у реакторі підтримується на позначці 32 °С, що відповідає мезофільному процесу. Такий вибір обумовлений кращою енергетичною окупністю порівняно з термофільним режимом, хоча він і вимагає довших термінів перебування сировини в реакторі.

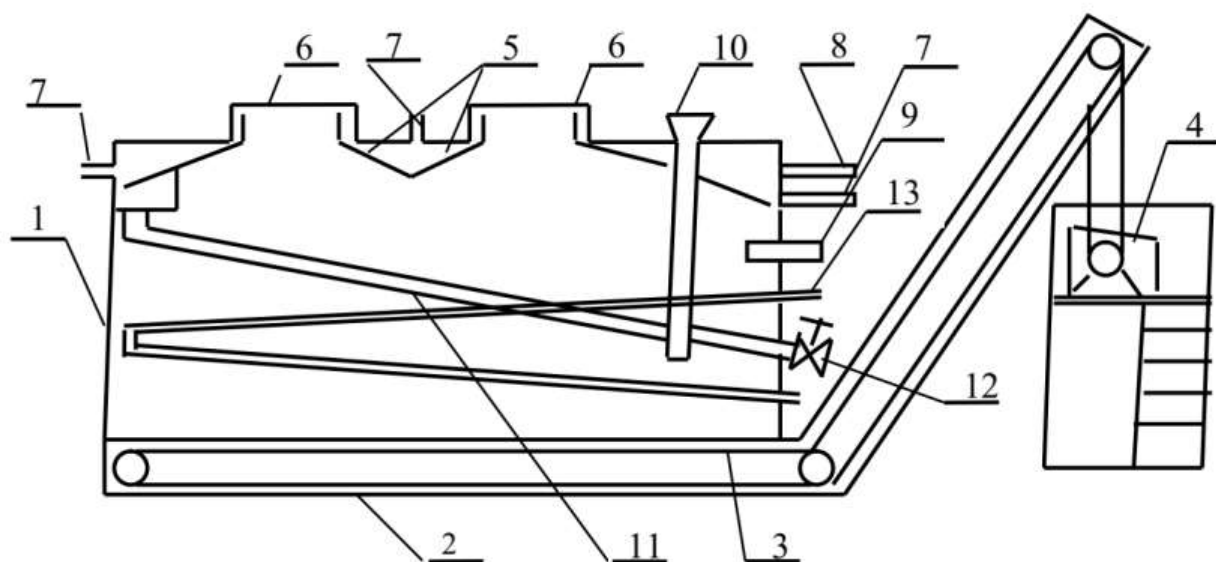


Рис.1.1 Конструктивна схема біогазової установки:

1 – корпус реактора; 2 – короб транспортера; 3 – скребковий транспортер; 4 – привод транспортера; 5 – пірамідальне перекриття реактора; 6 – газовий ковпак; 7 – патрубок для відбору біогазу; 8 – пристрій для підключення манометра; 9 – пристрій для установки термометра; 10 – завантажувальна горловина; 11 – труба для видалення рідкої фракції; 12 – засувка; 13 – теплообмінник

### 1.3 Аналіз технологічних режимів роботи та їх енергетичної ефективності

На основі експериментальних досліджень [21], було вивчено роботу установки в чотирьох режимах. Критичним показником ефективності є питомий вихід біогазу на одиницю завантаженої маси. Згідно з отриманими

даними, найбільш енергоефективним є режим II (завантаження 4 м³/добу), де питомий вихід сягає 7,1 м³/м³.

Однак, для максимізації загальної продуктивності установки при збереженні високих показників конверсії COP, рекомендовано використовувати режим III (5,5 м³/добу). Це дозволяє скоротити цикл бродіння до 7-10 діб. Саме ці параметри завантаження стають вихідними даними для розрахунку системи автоматизованого підігріву: необхідно забезпечити швидкий вихід свіжої порції субстрату (5,5 м³) на робочий температурний режим 32 °C без переохолодження основної маси реактора.

#### **1.4 Обґрунтування напряму досліджень з підвищення енергоефективності**

Аналіз роботи установки показує, що основні втрати енергії пов'язані з нерівномірним розподілом тепла в об'ємі реактора та інерційністю системи нагріву під час добового завантаження. Традиційні системи релейного типу призводять до температурних коливань, що пригнічує діяльність бактерій. Напрямом дослідження обрано розробку системи «розумної» автоматизації підігріву, яка на основі алгоритмів прогнозування тепловтрат та частотного керування циркуляційними насосами теплоносія дозволить знизити споживання електричної енергії на 10-15% та підвищити стабільність виходу біогазу.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     |      |

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 2.1 Теоретичний аналіз мікробіологічних стадій анаеробної ферментації

Анаеробне зброджування (метанове бродіння) — це складний багатоступеневий мікробіологічний процес розкладу органічних речовин за відсутності кисню. У результаті життєдіяльності різних груп мікроорганізмів складна високомолекулярна органіка перетворюється на біогаз та ефлюент (біодобрива). Для забезпечення високої енергоефективності установки необхідно розуміти внутрішню кінетику процесу, що поділяється на чотири послідовні фази.

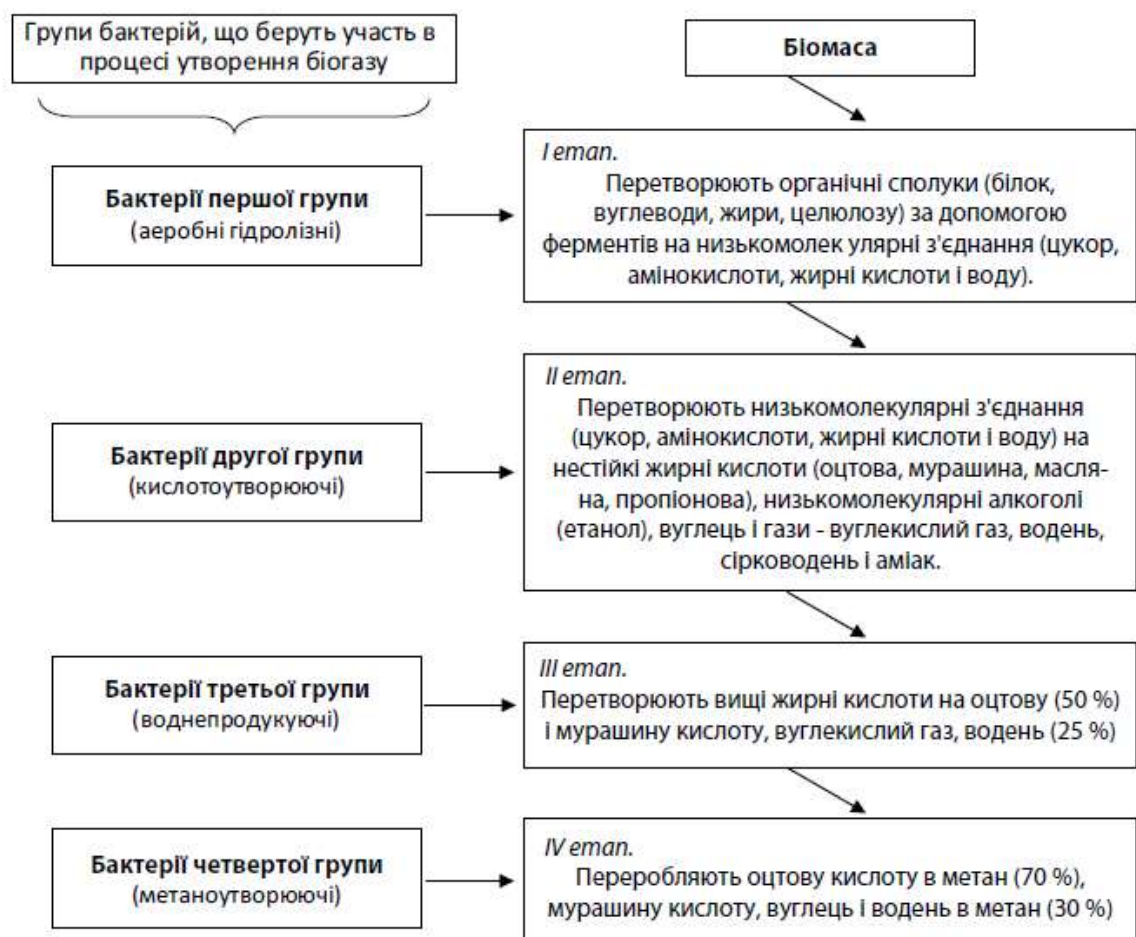


Рис 2.1 Етапи процесу анаеробного бродіння [25]

### 2.1.1 Стадія гідролізу

На цій початковій стадії складні органічні сполуки (вуглеводи, білки та жири), що містяться у гної ВРХ, під дією позаклітинних ферментів гідролітичних бактерій розщеплюються на простіші розчинні молекули: моносахариди, амінокислоти, гліцерин та жирні кислоти. Швидкість гідролізу часто є лімітуючим фактором для всього процесу, особливо при використанні сировини з високим вмістом лігніну або целюлози.

### 2.1.2 Стадія ацидогенезу (кислотоутворення)

Продукти гідролізу поглинаються ацидогенними бактеріями, які перетворюють їх на летючі жирні кислоти (оцтову, пропіонову, масляну), а також спирти, вуглекислий газ та водень. Саме на цій стадії формується рН-середовище реактора. Надмірне накопичення кислот може призвести до «закислення» реактора, що зупинить подальші стадії.

### 2.1.3 Стадія ацетогенезу

Ацетогенні бактерії переробляють продукти попередньої стадії (зокрема пропіонову та масляну кислоти) на оцтову кислоту, водень та вуглекислий газ. Ця стадія є критичним «містком» до фінальної фази, оскільки метаноутворюючі бактерії здатні використовувати лише обмежений набір субстратів.

### 2.1.4 Стадія метаногенезу

Це фінальна і найбільш енергетично важлива стадія. Метаногенні археї перетворюють оцтову кислоту, водень та  $\text{CO}_2$  безпосередньо в метан ( $\text{CH}_4$ ). Ці мікроорганізми є найбільш чутливими до зовнішніх факторів, зокрема до присутності кисню та різких змін температури.

### 2.1.5 Вплив температурного режиму на стабільність біоценозу

Вибір мезофільного режиму ( $32^\circ\text{C}$ ) в даному проєкті є технічно обґрунтованим компромісом між швидкістю реакції та стабільністю системи. На відміну від термофільного режиму ( $50\text{--}60^\circ\text{C}$ ), мезофільний поглинає менше енергії на власні потреби, що підвищує загальну енергоефективність установки. Однак, бактерії-метаногени мають вузький діапазон толерантності.

Навіть коливання температури у  $1\text{--}2^\circ\text{C}$  спричиняють термічний шок, що призводить до:

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     | 14   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     |      |

- уповільнення метаболізму бактерій;
- зниження виходу біогазу на 15–20%;
- накопичення кислот, що може призвести до повної зупинки реактора.

Таблиця 2.1

**Порівняльна характеристика температурних режимів анаеробного зброджування**

| Температурний режим | Робоча температура, °C | Орієнтовна тривалість бродіння, діб | Чутливість до температурних коливань | Характеристика енерговитрат на власні потреби (підігрів) |
|---------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Психрофільний       | 10-25                  | 30-100 і більше                     | Низька                               | Мінімальні або взагалі відсутні                          |
| Мезофільний         | 30-40                  | 15-30                               | Середня (1-2°C)                      | Помірні                                                  |
| Термофільний        | 50-60                  | 5-12                                | Дуже висока (0.5-1°C)                | Максимальні                                              |

## 2.2 Характеристика та підготовка сировини для зброджування

Ефективність метанового бродіння та питомий вихід газу безпосередньо залежать від якісного складу субстрату, його вологості та концентрації поживної органічної речовини. У даній роботі як основну сировину розглянуто рідкий гній великої рогатої худоби (ВРХ) фермерського господарства.

Для проведення енергетичних розрахунків та моделювання технологічного процесу було використано фізико-хімічні показники гною, отримані в ході лабораторних досліджень [21].

Гній ВРХ характеризується високою вологістю та значним вмістом сухої органічної речовини (COP), яка є безпосереднім джерелом живлення для метаногенних бактерій.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 15   |

**Фізико-хімічні характеристики гною ВРХ перед завантаженням у біореактор.**

| Найменування показника                          | Одиниця виміру <sup>+</sup> | Значення показника |
|-------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Вологість сировини (W)                          | %                           | 93,3               |
| Вміст сухої речовини (CP)                       | %                           | 6,7                |
| Вміст сухої органічної речовини (COP)           | %                           | 5,1                |
| Зольність сировини (A)                          | %                           | 1,6                |
| Густина субстрату (ρ)                           | кг/м <sup>3</sup>           | 1014,2             |
| Температура завантажуваної маси (середньорічна) | °C                          | 10 – 15            |

### 2.2.1 Аналіз властивостей субстрату

Аналіз даних Таблиці 2.2 дозволяє зробити висновок про придатність даної сировини для інтенсивного анаеробного зброджування. Показник вологості на рівні 93,3% забезпечує необхідну плинність субстрату, що дозволяє використовувати стандартні відцентрові або шнекові насоси для завантаження реактора.

Вміст сухої органічної речовини (5,1% від загальної маси) визначає потенціал газоутворення. Проте варто враховувати, що рідкий гній має відносно низьку концентрацію енергії порівняно з силосом або відходами харчової промисловості.

Це вимагає обґрунтованого вибору дози завантаження для підтримки теплового балансу, оскільки великий об'єм води у складі гною потребує значних витрат енергії на нагрів.

### 2.2.2 Процес підготовки сировини (Попередня обробка)

Для підвищення енергоефективності та інтенсифікації газоутворення, перед завантаженням у метантенк субстрат проходить стадію підготовки, яка включає:

1. Гомогенізація: механічне перемішування у приймальній ємності для створення однорідної структури та подрібнення великих включень. Це запобігає забиванню трубопроводів та утворенню осаду в реакторі.
2. Попередній підігрів (опціонально): у деяких схемах використовується теплообмінник для часткового нагріву холодної сировини за рахунок тепла відпрацьованого ефлюенту (шламу), що виходить із реактора.
3. Вирівнювання рН: за необхідності додаються лужні реагенти для стабілізації кислотності, хоча при роботі з гноєм ВРХ система зазвичай саморегулюється.

Особливістю даного об'єкта є порційне завантаження сировини один раз на добу. З точки зору автоматизації, це створює пікове навантаження на систему підігріву саме в момент надходження нової порції холодного субстрату.

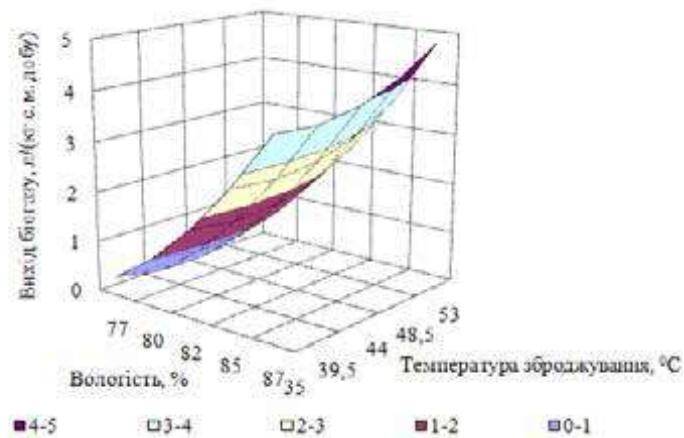


Рис. 2.2 Залежність виходу біогазу від температури зброджування і вологості біомаси

### 2.2.3 Вплив водневого показника (рН) на мікробіологічну стабільність

Критично важливим параметром, що визначає ефективність метанового бродіння, є рівень кислотності середовища (водневий показник рН). Для

стабільного протікання фінальної, найбільш вразливої стадії процесу — метаногенезу — оптимальний рівень рН знаходиться у вузькому нейтральному або слабколужному діапазоні від 6,8 до 7,5. Зниження цього показника нижче 6,5 (що часто трапляється при «закисленні» реактора внаслідок надмірного накопичення летючих жирних кислот на стадії ацидогенезу) призводить до швидкого пригнічення життєдіяльності та навіть загибелі метаноутворюючих архей.

Унікальною технологічною перевагою використання саме гною великої рогатої худоби (ВРХ) є його природна висока буферна ємність. Завдяки наявності у складі субстрату розчиненого аміачного азоту та бікарбонатів, такий гній здатен до саморегуляції: він природним чином нейтралізує надлишок кислот, що утворюються на перших етапах розкладу органіки, стабільно утримуючи рН у безпечних межах 6,8–7,2.

З інженерної точки зору ця властивість має принципове значення для проектування установки. Висока саморегулююча здатність субстрату ВРХ дозволяє повністю виключити з апаратурної схеми вузли хімічної корекції кислотності (насоси-дозатори лужних реагентів, ємності для зберігання хімікатів та додаткові датчики рН керування дозаторами).

Відсутність потреби у штучній хімічній корекції не лише спрощує експлуатацію станції, але й усуває споживання електроенергії додатковими приводами насосів-дозаторів, що цілком відповідає меті даного дипломного проекту — підвищенню загальної енергоефективності біогазового комплексу.

### **2.3 Дослідження динаміки виходу біогазу за різних режимів завантаження**

Визначення оптимальної дози добового завантаження є ключовим завданням при проектуванні біогазової станції. Від кількості свіжої сировини залежить не лише загальний обсяг виробленого енергоносія, але й стабільність мікробіологічного середовища. Занадто мала доза призводить до економічної неефективності (реактор працює "вхолосту"), а надмірна — до "вимивання" метаногенних бактерій та закислення реактора.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 18   |

Для аналізу було використано результати експериментальних досліджень [21] роботи біореактора (робочий об'єм 40,8 м<sup>3</sup>) у мезофільному режимі (32 °С при надлишковому тиску 0,005 МПа) за чотирма експлуатаційними режимами.

**Режим І: Низьке навантаження.** При добовій дозі завантаження 2,5 м<sup>3</sup>/добу гідравлічний час затримки (тривалість бродіння) становить 16 діб. Органічне навантаження дорівнює 1,75 кг СОР/м<sup>3</sup> реактора.

Таблиця 2.3

### Умови проведення випробувань

| №п/п | Показники                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Значення                                                                                                                                                                 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Характеристика тваринницького комплексу:<br>- спеціалізація<br>- тип годівлі тварин<br>- спосіб утримання тварин<br>- вид тварин<br>- кількість голів<br>- середньодобовий вихід гною, мЗ                                                                                                                                                                                                   | Виробництво молока<br>Силосно-сінажний<br>Комбінований<br>Корови<br>780<br>70–85                                                                                         |
| 2    | Характеристика гною, що надходить до реактора:<br>- вологість, %<br>- рН<br>- щільність, кг/мЗ<br>- вміст органічних речовин в асв, %<br>- вміст зважених речовин, мг/л<br>- середньозважений розмір частинок, мм<br>- вміст азоту, %:<br>аміачного<br>загального<br>- вміст фосфору, %<br>- вміст калію, %<br>- вміст водню, %<br>- відношення С : N<br>- вміст летких жирних кислот, мг/л | 95,6–96,4<br>7,3–7,9<br>1009–1033<br>73,9–78,8<br>24600–68800<br>1,52–3,90<br><br>0,05–0,07<br>0,08–0,12<br>0,09–0,10<br>0,13–0,15<br>0,88–1,07<br>9,8–13,4<br>1080–2260 |
| 3    | Характеристика умов навколишнього середовища:<br>- температура повітря, °С<br>- відносна вологість повітря, %                                                                                                                                                                                                                                                                               | 18–30<br>70–85                                                                                                                                                           |

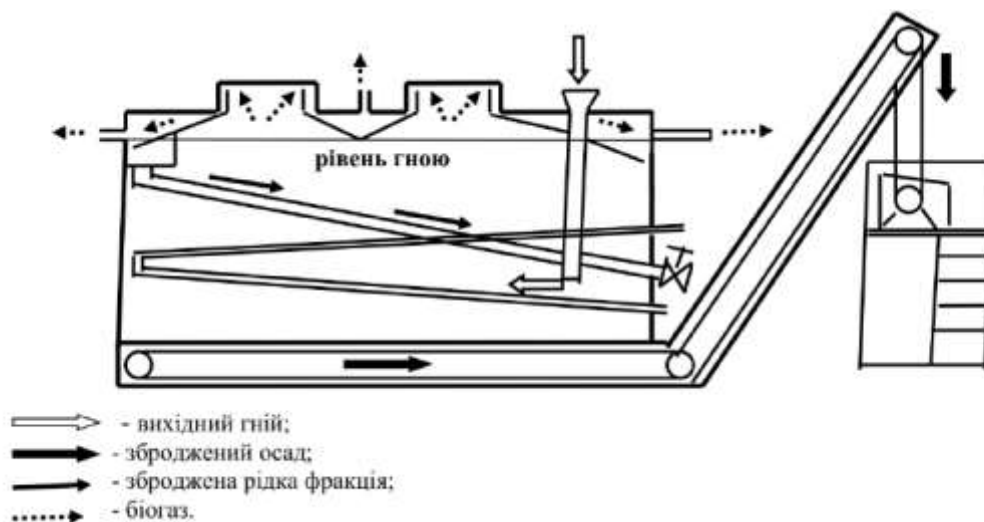


Рис.2.3 Технологічна схема мікробіологічного реактора

Аналіз Режиму I: Згідно з отриманими даними, фактичний вихід біогазу становить лише 16 м<sup>3</sup> / добу. Хоча ступінь розкладу органіки тут найвищий (вихід біогазу становить 0,22 м<sup>3</sup> / кг СОР), загальна продуктивність установки вкрай низька. З енергетичної точки зору цей режим є збитковим, оскільки енергія, що витрачається на підтримання температури 32 °С протягом 16 діб, може перевищувати енергію отриманого газу.

**Режим II: Оптимальне біологічне навантаження.** Дозу завантаження було збільшено до 4м<sup>3</sup>/добу, що скоротило час бродіння до 10 діб. Навантаження зросло до 3,19 кг СОР/м<sup>3</sup>

Таблиця 2.4

#### Планові показники для проведення дослідження біореактора

| № п/п | Показники                                | Значення |       |       |       |
|-------|------------------------------------------|----------|-------|-------|-------|
|       |                                          | I        | II    | III   | IV    |
| 1     | Режим роботи установки:                  | I        | II    | III   | IV    |
| 2     | Доза завантаження, м <sup>3</sup> / добу | 2,5      | 4,0   | 5,5   | 7,0   |
| 3     | Температура бродіння, °С                 | 32±1     | 32±1  | 32±1  | 32±1  |
| 4     | Надлишковий тиск біогазу в реакторі, МПа | 0,005    | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| 5     | Кратність завантаження, разів / добу     | 1        | 1     | 1     | 1     |
| 6     | Тривалість бродіння, діб                 | 16       | 10    | 7     | 6     |

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ

Арк.

20

Аналіз Режиму II: Спостерігається різкий стрибок продуктивності — добовий вихід газу зріс до 28,5 м<sup>3</sup>/добу. Цей режим демонструє найвищий питомий вихід біогазу з одиниці об'єму завантаженої маси (7,1 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>). Це свідчить про те, що мікроорганізми працюють у зоні максимального комфорту, встигаючи повністю переробляти субстрат без накопичення кислот.

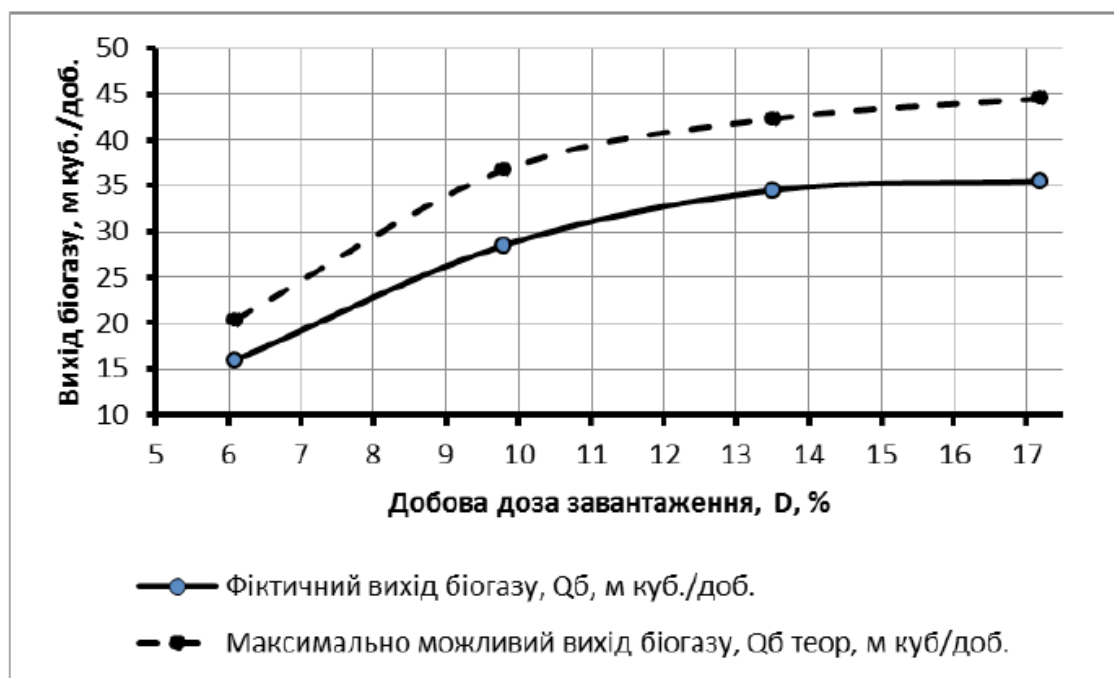


Рис. 2.4 Залежність виходу біогазу від добового завантаження реактора

### Режим III: Максимальна енергетична ефективність.

Подальша інтенсифікація процесу передбачала завантаження 5,5 м<sup>3</sup>/добу. Час перебування субстрату в реакторі скоротився до 7 діб, а доза СОР склала 4,18кг/м<sup>3</sup>.

Таблиця 2.5.

| №п/п | Показники                                          | Значення |      |      |      |
|------|----------------------------------------------------|----------|------|------|------|
| 1    | Режим роботи установки:                            | I        | II   | III  | IV   |
| 2    | Показники якості виконання технологічного процесу: |          |      |      |      |
|      | Продуктивність за вихідним гном, м3 / добу;        | 2,5      | 4,0  | 5,5  | 7,0  |
|      | Вихід біогазу, м3 / добу;                          | 16,0     | 28,5 | 34,5 | 35,5 |

|   |                                                                        |       |       |       |       |
|---|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|   | Питомий вихід біогазу з<br>одиниці об'єму завантаженої<br>маси, м3/м3; | 6,4   | 7,1   | 6,3   | 5,1   |
| 3 | Кількість гною після<br>анаеробного бродіння<br>Рідка фракція:         |       |       |       |       |
|   | - вологість, %;                                                        | 98,3  | 97,9  | 97,7  | 97,5  |
|   | - рН;                                                                  | 7,3   | 7,6   | 7,6   | 7,4   |
|   | - щільність, кг / м3;                                                  | 1030  | 1018  | 1016  | 1004  |
|   | - вміст органічних речовин в<br>асв, %;                                | 69,8  | 70,8  | 69,8  | 68,1  |
|   | - вміст зважених речовин, мг/л;                                        | 16120 | 37660 | 56680 | 27030 |
|   | - середньозважений розмір;<br>частин, мм;                              | 1,59  | 2,10  | 1,29  | 2,76  |
|   | - вміст азоту, % :                                                     |       |       |       |       |
|   | загального                                                             | 0,05  | 0,07  | 0,07  | 0,06  |
|   | аміачного                                                              | 0,07  | 0,07  | 0,06  | 0,06  |
|   | - вміст фосфору, %;                                                    | 0,03  | 0,09  | 0,08  | 0,09  |
|   | - вміст калію, %;                                                      | 0,10  | 0,10  | 0,12  | 0,13  |
|   | - вміст водню, %;                                                      | 0,34  | 0,44  | 0,50  | 0,48  |
|   | - вміст летких жирних кислот,<br>мг / л;                               | 680   | 1085  | 1610  | 825   |
|   | Осад:                                                                  |       |       |       |       |
|   | - вологість, %;                                                        | 88,4  | 87,8  | 87,8  | 88,0  |
|   | - рН;                                                                  | 7,6   | 8,0   | 8,1   | 7,8   |
|   | - щільність, кг / м3;                                                  | 1525  | 1520  | 1533  | 1539  |
|   | - вміст органічних речовин в<br>асв, %;                                | 70,1  | 71,1  | 69,2  | 68,4  |

|   |                     |      |      |      |      |
|---|---------------------|------|------|------|------|
|   | - вміст азоту, % :  |      |      |      |      |
|   | загального          | 0,10 | 0,11 | 0,13 | 0,16 |
|   | аміачного           | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,06 |
|   | - вміст фосфору, %; | 0,18 | 0,15 | 0,13 | 0,13 |
|   | - вміст калію, %;   | 0,15 | 0,14 | 0,15 | 0,10 |
|   | - вміст водню, %;   | 2,97 | 2,44 | 2,61 | 2,27 |
| 4 | Склад біогазу, %;   |      |      |      |      |
|   | - метан             | 61,4 | 59,8 | 57,6 | 55,1 |
|   | - вуглекислий газ   | 38,4 | 39,9 | 42,1 | 45,0 |

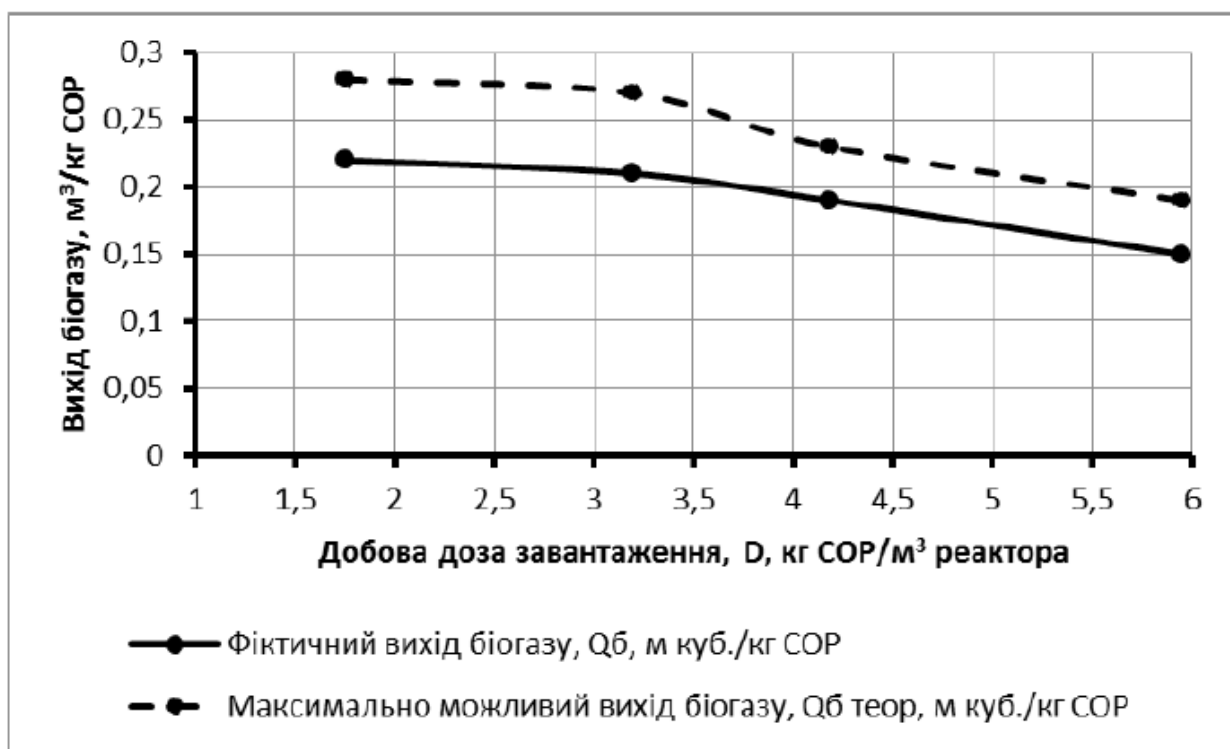


Рис. 2.5 Залежність виходу біогазу від дози сухої органічної речовини (COP) завантаження біореактора

Аналіз Режиму III: Добовий вихід газу досяг 34,5 м<sup>3</sup>/добу. Хоча спостерігається незначне зниження глибини переробки (вихід впав до 0,19 м<sup>3</sup>/кг COP), валова кількість отриманої енергії є оптимальною для живлення фермерського господарства. У цьому режимі досягається найкращий баланс між пропускнуною здатністю реактора та об'ємом виробленого енергоносія.

Режим IV: Перевантаження системи.

При максимальному завантаженні  $7 \text{ м}^3/\text{добу}$  тривалість бродіння впала до критичних 6 діб. Доза СОР зростає до  $5,95 \text{ кг/м}^3$ .

Таблиця 2.6

**Залежність виходу біогазу від дози завантаження біореактора**

| Режим роботи реактора                                                             | I    | II   | III  | IV   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| Добова доза завантаження, D, %                                                    | 6,1  | 9,8  | 13,5 | 17,2 |
| Фактичний вихід біогазу, $Q_b, \text{ м}^3/\text{доб.}$                           | 16,0 | 28,5 | 34,5 | 35,5 |
| Максимально можливий вихід біогазу, $Q_{b \text{ теор}}, \text{ м}^3/\text{доб.}$ | 20,4 | 36,7 | 42,3 | 44,5 |

Аналіз Режиму IV: Незважаючи на найбільший валовий об'єм ( $35,5 \text{ м}^3/\text{добу}$ ), цей режим є технологічно небезпечним. Питомий вихід різко обвалився до  $5,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$  завантаженої маси, а конверсія СОР впала до  $0,15 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Це класичний прояв "гідравлічного перевантаження" — бактерії просто не встигають розщепити органіку за 6 днів, і значна частина непереробленої енергії вимивається з реактора разом з ефлюентом. Крім того, подача  $7 \text{ м}^3$  холодної маси щодоби створює надмірне навантаження на систему підігріву.

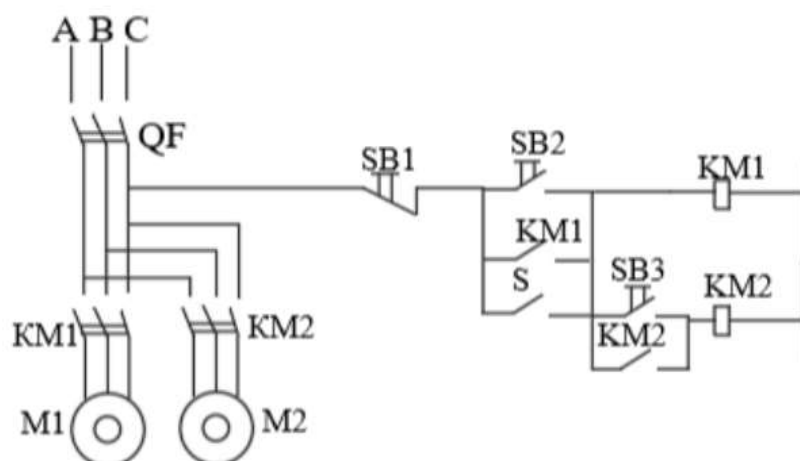
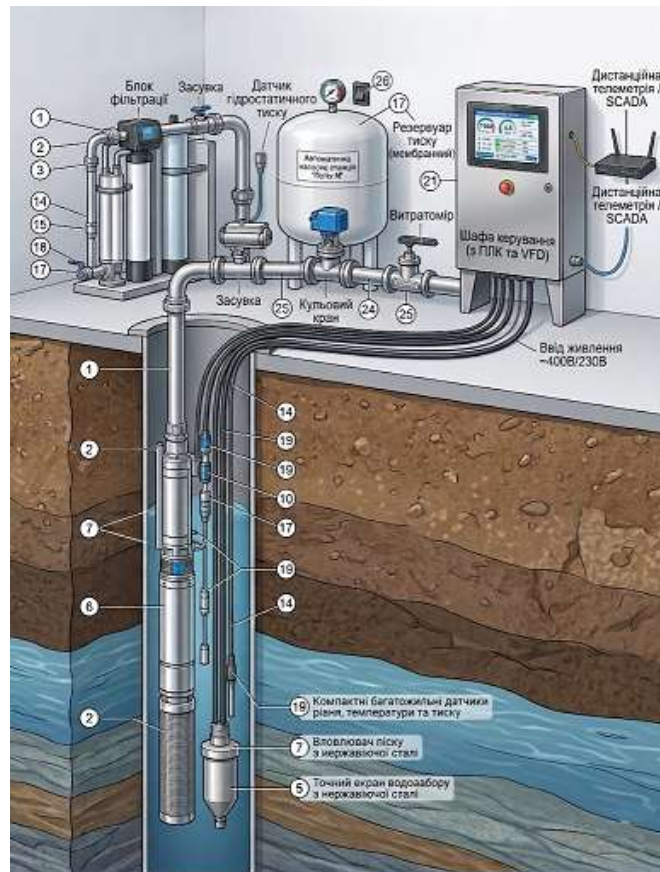


Рис. 2.6 Принципова схема керування системою завантаження та вивантаження

## ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

Водонасосна установка, показана нижче на рисунку, працює слідуєчим  
м:



1 — напірний трубопровід; 2 — магістральний сітчастий фільтр грубої очистки; 3 — автоматичний блок фільтрації та водопідготовки; 4 — герметичний оголовок свердловини з ущільнювальним сальником; 5 — свердловинний сепаратор піску; 6 — занурювальний трифазний асинхронний електродвигун герметичного виконання; 7 — багатоступінчастий відцентровий занурювальний насос; 8 — обсадна труба свердловини; 9 — кабельні стяжки; 10 — занурювальний датчик «сухого ходу»; 11 — гідродинамічний затвор; 12 — опорні елементи кріплення оголовка до фундаменту; 13 — опорна плита свердловини; 14 — силовий вологозахищений кабель живлення електродвигуна насоса; 15 — контрольний кабель передачі сигналів; 16 — триходовий кран під

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     |      |

манометр; 17 — гідроаккумулятор; 18 — дренажний вентиль; 19 — комплекс занурювальних аналогових датчиків; 20 — кабель підключення датчиків гідроаккумулятора та магістралі до шафи керування; 21 — шафа керування насосним агрегатом; 22 — збірний трубопровід подачі очищеної води до споживача або в загальну мережу; 23 — запірна арматура; 24 — електронний витратомір; 25 — проміжні кульові крани/зворотні клапани; 26 — головний автоматичний вимикач живлення.

### Технічні характеристики насоса марки 1ЭЦВ6-4-130

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 1. Подача, м <sup>3</sup> /год | 4   |
| 2. Напір, м                    | 130 |
| 3. Кількість ступенів          | 13  |
| 4. Маса, кг                    | 27  |
| 5. ККД, %                      | 60  |

### 3.2 Розрахунок і побудова механічної характеристики робочої машини

Механічна характеристика робочої машини описується рівнянням:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) * \frac{\omega}{\omega_n}, \quad (3.1)$$

де  $M_c$  — момент статичних опорів, Нм;

$M_0$  — момент зрушень, Нм;

$M_{сн}$  — момент статичних опорів при номінальній кутовій швидкості, Нм;

$\omega_n$  — номінальна кутова швидкість, об/хв;

$\omega$  — задана кутова швидкість, об/хв;

$x$  — показник степеня ( $x=2$ ).

Знаходимо момент статичних опорів при номінальній кутовій швидкості:

$$M_{сн} = 9550 * \frac{P_{р.м.н.}}{n_{р.м.н.}} \quad (3.2)$$

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     | 26   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     |      |

де  $P_{р.м.н.}$  – номінальна потужність робочої машини, кВт;

$n_{р.м.н.}$  – номінальна частота обертання (така як і у електродвигуна), об/хв.

У насосів  $n_{р.м.н.} = 2850$  об/хв.

Визначаємо  $P_{р.м.н.}$  з формули:

$$P_{р.м.н.} = \rho * g * H_{нас.} * \frac{Q_{нас.}}{\eta_{нас.}} * 3600 \quad (3.3)$$

де  $\rho$  – питома густина води, кг/м<sup>3</sup>. Для води  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>,  $g = 9,82$  м/с<sup>2</sup>;

$H_{нас.}$  – напір насоса, м. Для насоса марки 1ЭЦВ6-4-130 ( $H=130$ м);

$Q_{нас.}$  – подача м<sup>3</sup>/с. Для насоса 1ЭЦВ6-4-130 ( $Q_{нас.} = 4$  м<sup>3</sup>/с);

$\eta_{нас.}$  – коефіцієнт корисної дії насоса.

$\eta_{нас.} = 60\%$ .

Номінальна потужність робочої машини дорівнює:

$$P_{р.м.н.} = 1000 * 9,82 * 130 * \frac{4 * 10^{-3}}{0,6} * 3600 = 2,3 \text{ кВт}$$

Момент статичних опорів при номінальній кутовій швидкості дорівнює:

$$M_{сн} = 9550 * \frac{2,3}{2850} = 7,92 \text{ Н * м}$$

Номінальне значення кутової швидкості:

$$\omega = \frac{\pi * n_H}{30} = \frac{3,14 * 2850}{30} = 298,3 \text{ об/хв} \quad (3.4)$$

Для визначення  $M_c$  задається  $\omega$  від 0 до  $1,1 \omega_H$ .

Результати розрахунку записуємо до таблиці 3.1.

Табл. 3.1

### Механічна характеристика робочої машини

| $\omega, \text{с}^{-1}$ | 0     | 47    | 94    | 141   | 188   | 235   | 282 | 328,2 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| $M_c, \text{Нм}$        | 0,396 | 0,582 | 1,143 | 2,077 | 3,382 | 5,065 | 7,1 | 9,499 |

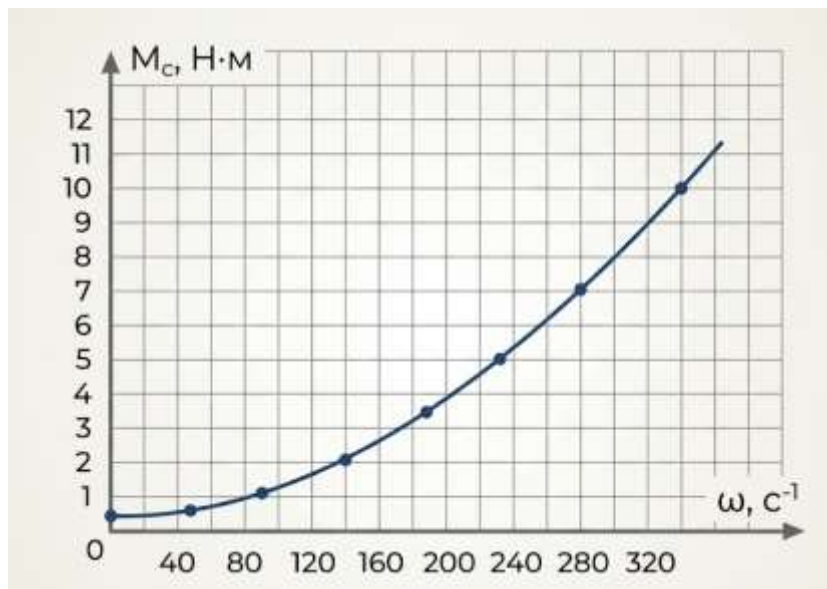


Рис. 3.2 Механічна характеристика робочої машини

Навантажувальна діаграма двигуна робочої машини має такий вигляд:

1ЭЦВ6 – 4 – 130

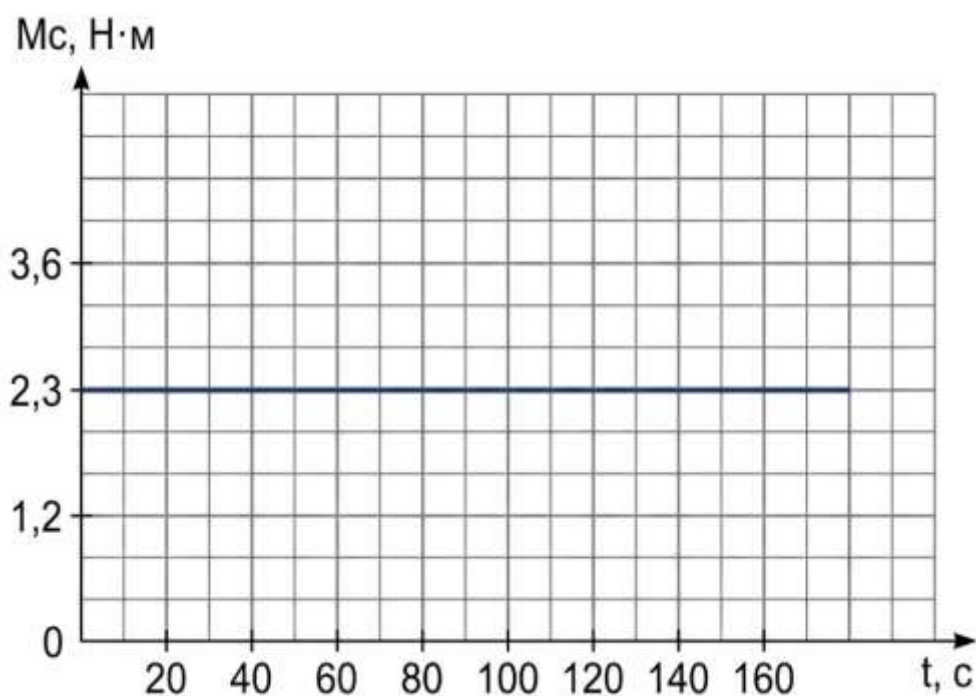


Рис. 3.3 Навантажувальна діаграма робочої машини

За навантажувальною діаграмою визначаємо режим роботи двигуна – S1 – тривалий з постійним навантаженням.

### 3.3 Попередній вибір електродвигуна за потужністю та частотою обертання

Попередньо обираємо двигун із умови:

$$P_{\text{н.дв.}} \geq P_{\text{с.}}$$

З довідника сільського електрика [1] обираємо двигун серії ПЭДВ. Режим роботи – S1.

Наводимо дані двигуна:

- Марка 7ПЭДВ – 2.8 – 140 ;
- Частота обертання  $n_{\text{н}} = 2850$  об/хв.;
- Номінальна потужність  $P_{\text{н.дв.}} = 2,8$  кВт.

### 3.4 Вибір електродвигуна за електричними модифікаціями, конструктивним виконанням, кліматичним виконанням, ступенем захисту від дії оточуючого середовища

Електродвигун марки 7ПЭДВ – 2.8 – 140 має такі електричні модифікації:

$P_{\text{н.дв.}} = 2,8$  кВт;  $n_{\text{н}} = 2850$  об/хв.;  $I_{\text{н}} = 7$  А; ККД = 74,5%;  $\cos\phi = 0,82$ ;

$I_{\text{пуск.}}/I_{\text{ном.}} = 6$ .

$$M_{\text{мах.}}/M_{\text{н.}} = 2; M_{\text{ін.}}/M_{\text{н.}} = 0,7; M_{\text{пуск.}}/M_{\text{н.}} = 1,0$$

Ступінь захисту від оточуючого середовища IP67.

де 6 – повний захист персоналу від випадкового дотику до струмоведучих та рухомих частин що знаходяться під оболонкою, і повний захист обладнання від потрапляння пилу.

7 – захист при зануренні у воду на час непередбачений стандартами або технічними умовами на окремі види електрообладнання.

Умовні позначення двигунів ПЭДВ розшифровуються так:

$$\begin{array}{ccccc} \underline{7} & \underline{\text{ПЭДВ}} & \underline{8} & \underline{140} & \underline{45} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{array}$$

де 1 – порядковий номер конструктивної роботи;

2 – тип двигуна: П – заглибний; ЭД – електродвигун; В – водозаповнений;

3 – номінальна потужність двигуна, кВт;

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     |      |

4 – зовнішній діаметр корпусу двигуна, мм;

У – помірний клімат;

5 – виготовлений виріб для роботи з підвищеною вологою.

За конструктивним виконанням і способом монтажу обираємо електродвигун: ІМ9031.

ІМ 9 – машини спеціального виконання за способом монтажу;

3 – вал вертикальний, кінець валу вгору;

1 – з одним циліндричним кінцем.

### 3.5 Розрахунок і побудова механічної характеристики

Механічну характеристику електродвигуна будуємо за п'ятьма точками.

Перша точка має координати:

$$S = 0; M = 0.$$

Друга точка має координати:

$$S_H = n_o - \frac{n_H}{n_o} = 3000 - \frac{2850}{3000} = 0,05 \quad (3.5)$$

$$M_H = 9550 * \frac{P_H}{n_H} = 9550 - \frac{2,8}{2850} = 9,38 \text{ Нм} \quad (3.6)$$

Третя точка має координати:

$$M_K = \mu_K * M_H = 2 * 9,38 = 18,76 \text{ Нм} \quad (3.7)$$

$$\mu_H = \frac{\mu_K}{M_{\text{пуск.}}} = \frac{2}{1} = 2 \quad (3.8)$$

$$S_K = \frac{S_H + \sqrt{S_H * \frac{\mu_K - 1}{\mu_1 - 1}}}{1 + \sqrt{S_H * \frac{\mu_K - 1}{\mu_1 - 1}}} = \frac{0,05 + \sqrt{0,05 * \frac{2 - 1}{2 - 1}}}{1 + \sqrt{0,05 * \frac{2 - 1}{2 - 1}}} = 0,22 \quad (3.9)$$

Четверта точка має координати:

$$S_{\text{мін.}} = 0,8; M_{\text{мін.}} = \mu_{\text{пуск.}} * M_H = 0,7 * 9,38 = 6,56 \text{ Нм} \quad (3.10)$$

П'ята точка має координати:

$$S_{\text{пуск.}} = 1; M_{\text{пуск.}} = \mu_{\text{пуск.}} * M_H = 1 * 9,38 = 9,38 \text{ Нм} \quad (3.11)$$

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     | 30   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     |      |

Побудова механічної характеристики двигуна з урахуванням допустимого відхилення моментів:

1.  $S = 0$ ;  $M' = 0$
2.  $S_H = 0,05$ ;  $M_H' = M_H = 9,38 \text{ Нм}$ ;
3.  $S_K = 0,22$ ;  $M_K' = 0,9 M_K = 0,9 \cdot 18,76 = 16,88 \text{ Нм}$ ;
4.  $S_{\min} = 0,8$ ;  $M_{\min}' = 0,8 M_{\min} = 0,8 \cdot 6,56 = 5,25 \text{ Нм}$ ;
5.  $S_{\text{пуск}} = 1$ ;  $M_{\text{пуск}}' = 0,85 \cdot M_{\text{пуск}} = 0,85 \cdot 9,38 = 7,97 \text{ Нм}$ .

Побудова механічної характеристики електродвигуна з урахуванням допустимого відхилення напруги:

1.  $S = 0$ ;  $M'' = 0$
2.  $S_H = 0,05$ ;  $M_H'' = 0,95^2 \cdot M_H = 0,95^2 \cdot 9,38 = 8,46 \text{ Нм}$ ;
3.  $S_K = 0,22$ ;  $M_K'' = 0,95^2 M_K' = 0,95^2 \cdot 16,88 = 15,23 \text{ Нм}$ ;
4.  $S_{\min} = 0,8$ ;  $M_{\min}'' = 0,95^2 M_{\min}' = 0,95^2 \cdot 5,25 = 4,73 \text{ Нм}$ ;
5.  $S_{\text{пуск}} = 1$ ;  $M_{\text{пуск}}'' = 0,95^2 \cdot M_{\text{пуск}}' = 0,95^2 \cdot 7,97 = 7,19 \text{ Нм}$ .

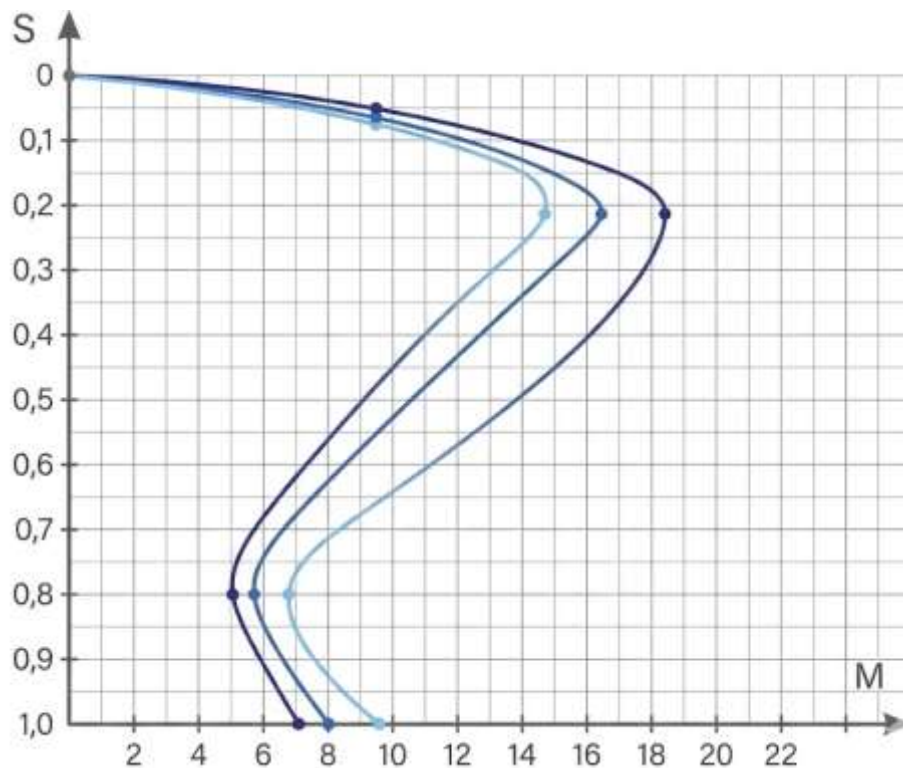


Рис. 3.4 а - механічна характеристика електродвигуна; в – механічна характеристика електродвигуна з урахуванням допустимого відхилення моментів; с – механічна характеристика електродвигуна з урахуванням допустимого відхилення напруги

### 3.6 Визначення тривалості пуску електродвигуна

Будуємо механічну характеристику двигуна за наступними розрахунковими даними.

Визначаємо кутову швидкість двигуна:

$$\omega_0 = \pi \frac{n_0}{30} = 3,14 * \frac{3000}{30} = 314 \text{ c}^{-1} \quad (3.12)$$

- $\omega = \omega_0 * (1 - S) = 314 * (1 - 0) = 314 \text{ c}^{-1}$
- $\omega_H = \omega_0 * (1 - S_H) = 314 * (1 - 0,05) = 298,3 \text{ c}^{-1}$
- $\omega_K = \omega_0 * (1 - S_K) = 314 * (1 - 0,22) = 244 \text{ c}^{-1}$
- $\omega_{\min} = \omega_0 * (1 - S_{\min.}) = 314 * (1 - 0,8) = 62,8 \text{ c}^{-1}$
- $\omega_{\text{пуск}} = \omega_0 * (1 - S_{\text{пуск.}}) = 314 * (1 - 1) = 0 \text{ c}^{-1}$

Дані для побудови запишемо в таблицю 3.2.

таблиця 3.2

**Дані для побудови механічної характеристики двигуна**

|                         |     |       |      |      |      |
|-------------------------|-----|-------|------|------|------|
| $\omega, \text{c}^{-1}$ | 314 | 298,3 | 244  | 62,8 | 0    |
| Мс, Нм                  | 0   | 8,44  | 15,2 | 4,72 | 7,17 |

Інтервал швидкостей визначається  $\Delta\omega_i$  для кожної з якої визначається середнє значення динамічного моменту  $M_{j\text{сеп}}$  і приріст часу:

$$\Delta t_i = \frac{I_{\text{дв}} \Delta\omega_i}{M_{j\text{сеп},i}} \quad (3.13)$$

Розрахункові дані заносимо в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3

**Розрахункові дані для побудови механічної характеристики двигуна**

|                          |        |     |       |       |       |       |     |      |       |       |
|--------------------------|--------|-----|-------|-------|-------|-------|-----|------|-------|-------|
|                          | 1      | 2   | 3     | 4     | 5     | 6     | 7   | 8    | 9     | 10    |
| $M_{j\phi j}, \text{Нм}$ | 8      | 4,5 | 4,2   | 5,3   | 6,5   | 7,8   | 9   | 9,6  | 7,6   | 3,3   |
| $\Delta t, \text{с}$     | 0,1125 | 0,2 | 0,214 | 0,169 | 0,138 | 0,115 | 0,1 | 0,09 | 0,118 | 0,272 |

$$\Delta\omega_i = 30$$

Визначимо час пуску  $t_{\text{пуску}}$

$$t_{\text{пуску}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i = 1,628 \text{ с} \quad (3.14)$$

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 32   |

Визначимо час пуску  $t_{\text{пуску}}$  графічним методом:

$$t_{\text{пуску}} = |\text{ОД}| * mt = 4,5 * 0,36 = 1,62 \text{ с} \quad (3.15)$$

де  $|\text{ОД}|$  - відрізок (по модулю), що береться з рис. 3.4.

$$\text{ОД} = 4,5$$

$mt$  – масштаб. Він визначається за формулою :

$$mt = \frac{Mj * m\omega}{m_m} = \frac{0,012 * 30}{1} = 0,36 \quad (3.16)$$

де  $Mj$  – динамічний момент. Він дорівнює:

$$Mj = \frac{I_{\text{дв}}}{|\text{ОА}|} = \frac{0,03}{2,5} = 0,012 \quad (3.17)$$

де  $|\text{ОА}|$  – відрізок що береться із рис. 3.4.

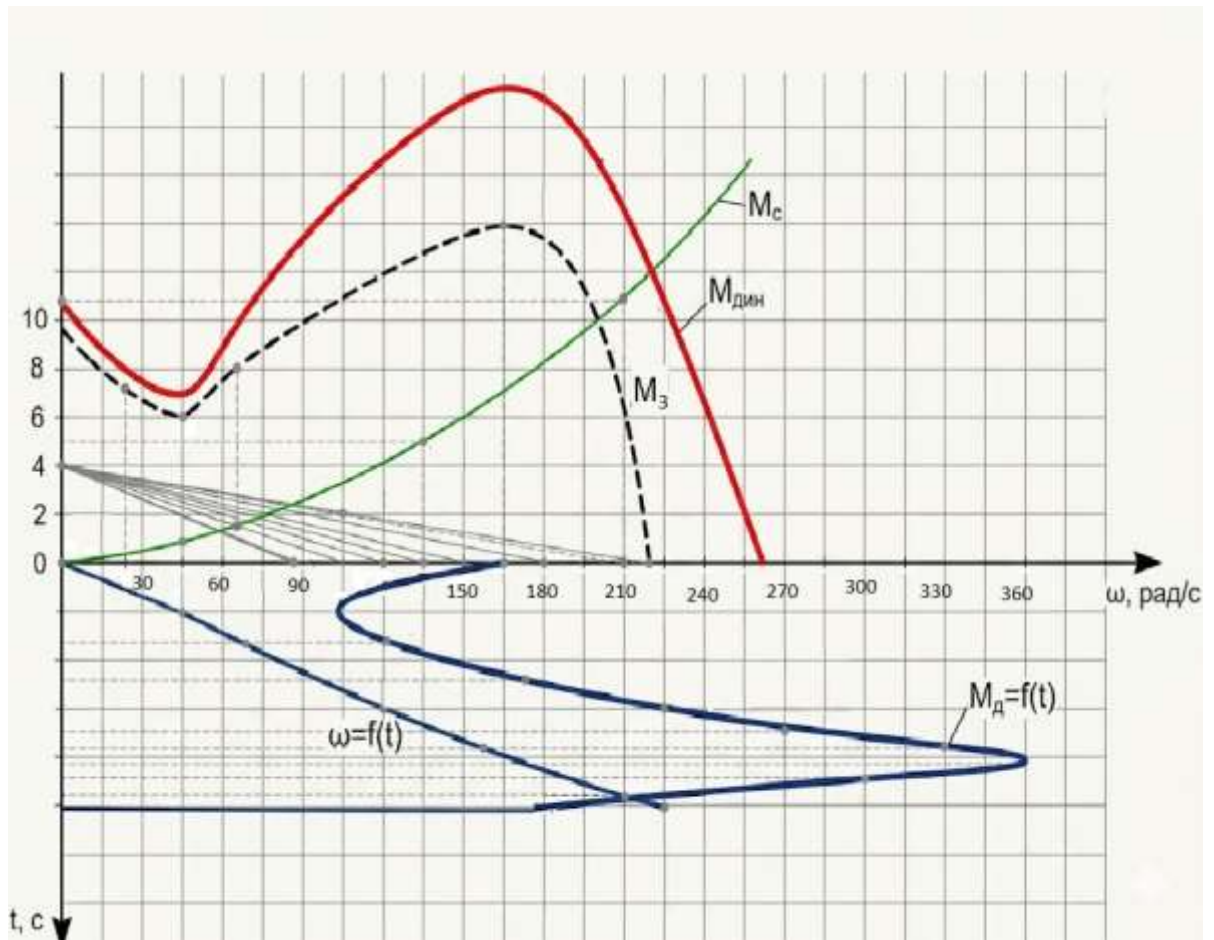


Рис. 3.4 Визначення тривалості пуску електродвигуна

### 3.7 Перевірка вибраного електродвигуна за тепловим режимом під час пуску

Перевищення температури двигуна визначається за формулою:

$$\tau_{\text{пуск}} = ut * t_{\text{пуск}} \quad (3.18)$$

де  $ut$  – швидкість нагріву двигуна,  $^{\circ}\text{C}/\text{C}$ ;

$t_{\text{пуск}}$  – час пуску, с.

Швидкість нагріву двигуна дорівнює  $ut = 7^{\circ}\text{C}/\text{C}$ , а  $t_{\text{пуск}}$  дорівнює:

$$\tau_{\text{пуск}} = 7 * 1,62 = 11,34^{\circ}\text{C}$$

Порівняємо перевищення температури двигуна з допустимими:

$$\tau_{\text{доп}} = Q_{\text{із}} - Q_{\text{ох.ср.}} \quad (3.19)$$

де  $Q_{\text{із}}$  – температура нагріву ізоляції, °C;

$Q_{\text{ох.ср.}}$  – температура охолоджуючого середовища, °C.

Для двигунів серії ПЭДВ  $Q_{\text{із}} = 70^{\circ}\text{C}$ ;  $Q_{\text{ох.ср}} = 40^{\circ}\text{C}$ .

Тоді  $\tau_{\text{доп}}$  дорівнює:

$$\tau_{\text{доп}} = 70 - 40 = 30^{\circ}\text{C}$$

Умова перевірки вибраного електродвигуна за тепловим режимом під час пуску:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{пуск}} &\leq \tau_{\text{доп}} \\ 11,34^{\circ}\text{C} &\leq 30^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Умова виконується.

### **3.8 Перевірка вибраного електродвигуна на перевантажувальну здатність**

Режим роботи електродвигуна S1 з постійним навантаженням, тому перевірку двигуна виконувати не потрібно.

### **3.9 Розробка (або вибір) схеми керування електродвигуном установки**

Нижче на рис. 3.5. показано електричну схему керування типу ПЕТ баштової насосної водокачки. Вона дозволяє в ручному і автоматичному режимах запускати електронасос, захищає двигун від коротких замикань, сигналізує за допомогою сигнальних ламп при ввімкнутому і вимкнутому стані насоса. Є також захист від перевантажень і обриву фаз.

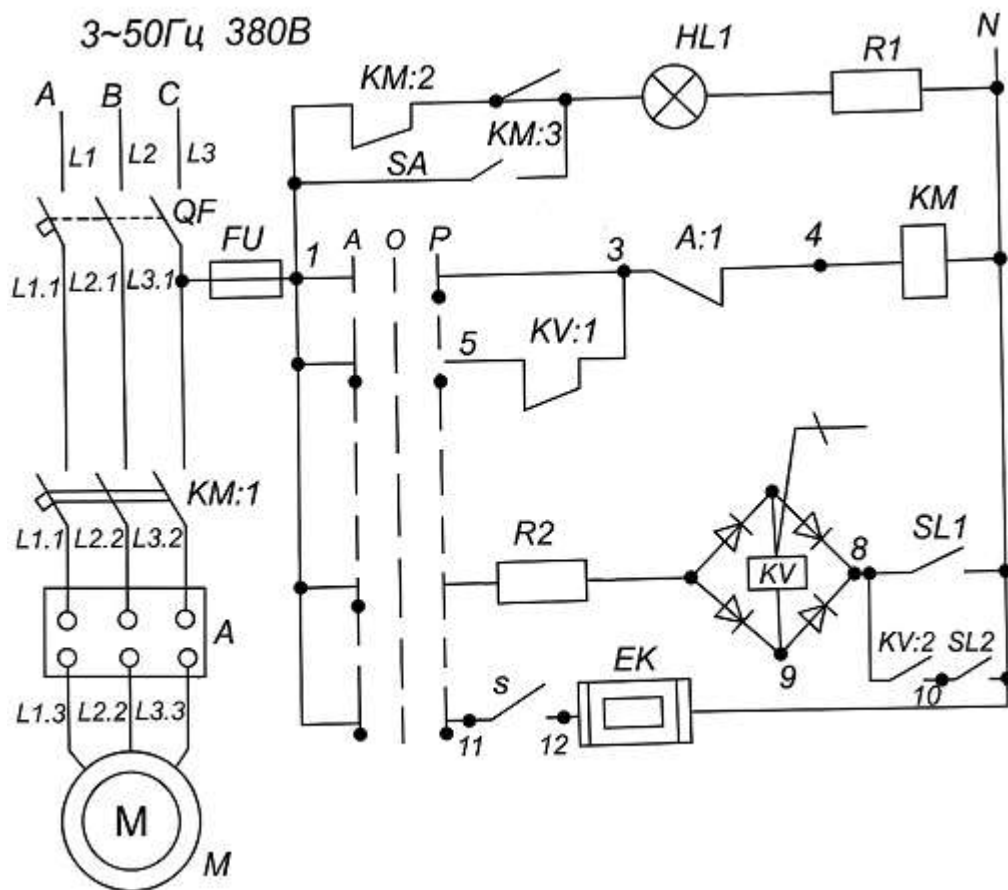


Рис. 3.5 Електрична схема керування типу ПЕТ баштової насосної водокачки

Автоматичний режим роботи задають перемиканням перемикача в положення А. Якщо в башті немає води то контакти (електроди) датчика верхнього SL1 та нижнього SL2 рівня розімкнені, відповідно контакти реле KV в колі котушки магнітного пускача KM замкнені. Магнітний пускач спрацьовує і вмикає електронасос М. По мірі набирання води в башті перекриваються водою спочатку контакти SL2 нижнього рівня, а потім SL1 верхнього рівня, і реле KV через воду отримує живлення контактами KV:1, воно розриває коло живлення магнітного пускача KM, і електронасос вимикається. Реле KV замикається ввімкнутим через контакти KV:2, SL1 і SL2. Воно вимкнеться тільки тоді, коли вода розімкне не тільки верхні контакти але і нижні. В цьому випадку KV:1 в колі магнітного пускача KM викликають повторне включення електронасосу М. Підключений стан насоса визначають по зеленій лампі HL1, а відключений по червоній HL2.

Захист двигуна здійснюється за допомогою теплових розчіплювачів магнітного пускача КМ, автомата QF, а також при допомозі пристрою ФУЗ(А). Це захист від перевантажень та обриву фаз.

В холодний період року вимикачем 5 вмикається електропідігрів ЕК датчика, що запобігає обледенінню та замерзанню електродів датчика рівня води в лід. Нижче на рис. 3.6. наведено монтажну схему.

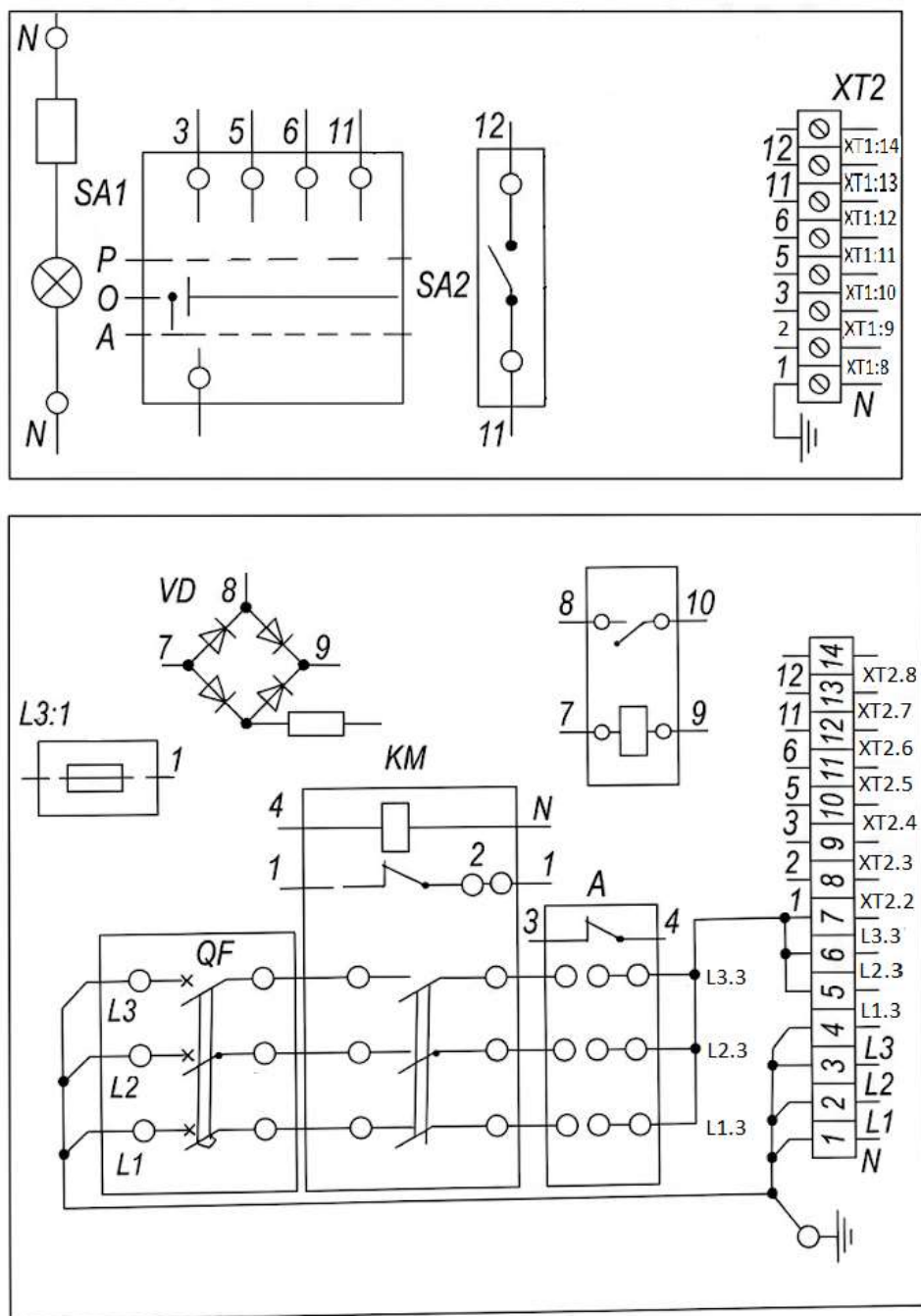


Рис. 3.5 Монтажна схема обладнання

### 3.10 Вибір апаратів керування, інших елементів схеми автоматичного керування, а також вибір електропроводок

### 3.10.1 Вибір автоматичного вимикач з функцією захисту двигуна

Умови вибору:

$$U_{\text{н.авт.}} \geq U_{\text{мережі}}; \quad 690\text{В} \geq 380\text{В} \quad (3.20)$$

$$I_{\text{н.авт.}} \geq I_{\text{н.дв.}}; \quad 10\text{А} \geq 7\text{А} \quad (3.21)$$

$$I_{\text{уст.}} \geq I_{\text{н.дв.}}; \quad 8\text{А} \geq 7\text{А} \quad (3.22)$$

$$I_{\text{відс}} \geq K_3 * K_{\text{р.ц.}} * K_I * I_{\text{н.дв.}} \quad (3.23)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт запасу,  $K_3 = 1,2$ ;

$K_{\text{р.ц.}} = 1,25$ ;

$K_I$  – кратність пускового струму ( $K_I = 6$ );

$I_{\text{н.дв.}} = 7\text{А}$ ;

$I_{\text{відс.}} = 130\text{А}$ .

Отже  $130\text{А} \geq 1,2 * 6 * 7\text{А} = 50,4\text{А}$

Вибираємо автоматичний вимикач – Schneider Electric GV2ME14.

Всі умови наведеним даним виконуються.

### 3.10.2 Вибір електромагнітного пускача

Умови вибору:

$$U_{\text{н.м.п.}} \geq U_{\text{мережі}}; \quad 380\text{В} = 380\text{В} \quad (3.24)$$

$$I_{\text{н.м.п.}} \geq I_{\text{н.дв.}}; \quad 10\text{А} \geq 7\text{А} \quad (3.25)$$

$$I_{\text{т.р.}} \geq I_{\text{н.дв.}}; \quad 15\text{А} \geq 7\text{А} \quad (3.26)$$

$$U_{\text{конт.}} = U_{\text{к.керув.}}; \quad 220\text{В} = 220\text{В} \quad (3.29)$$

Вибираємо електромагнітний пускач серії ПМЛ – 1100 04Б. Умова вибору виконується. Цей магнітний пускач комплектується контактною приставкою ПКЛ – 1104.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 38   |

3.10.3 Вибір низьковольтного комплектного пристрою НКП

Вибираємо НКП марки Я5111-2874 УХЛ4.

3.10.4 Вибір запобіжника

Вибираємо запобіжник марки ETI CH 10x38 gG 6A (Iуст = 6A).

3.10.5 Вибір кнопочового поста

Приймаємо кнопочовий пост Schneider Electric Harmony XALD213.

3.10.6 Вибір кабеля

Вибираємо кабель ВВГнг-LS 4х1,5, який має площу поперечного перерізу провoda 1.5мм<sup>2</sup>. Для цього виду кабелю Iтр.доп. = 19А.

3.10.7 Вибір перемикача

Вибираємо перемикач марки ETI CS 16 91 U.

3.11 Перелік вибраного електрообладнання

Таблиця 3.4

Перелік вибраного обладнання

| Позначення | Назва                                                     | Кількість | Примітка                    |
|------------|-----------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------|
| QF         | Schneider Electric GV2ME14                                | 1         | Iуст = 8А                   |
| KM         | Магнітний пускач<br>ПМЛ – 1100 – 04Б<br>ТУ16.644.001 – 83 | 1         | Uмаг = 220В<br>Ін.п. = 10 А |
| FU         | Запобіжник<br>ETI CH 10x38 gG 6A                          | 1         | Iуст = 6А                   |
| SA         | Перемикач ETI CS 16 91 U                                  | 1         | Ін. = 16А                   |

## РОЗДІЛ 4

### ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ

#### 4.1 Аналіз резервів енергозбереження та методів рекуперації теплової енергії

Виробництво біогазу є ефективною та інвестиційно-привабливою технологією, що обумовлено наявністю значного сировинного потенціалу, сприятливими умовами та екологічними перевагами переробки органічних відходів. Однак, незважаючи на позитивні ефекти анаеробної обробки гною в біогазових реакторах, серйозним гальмом їх широкого використання в сільському господарстві є відносно низька енергетична ефективність самого процесу. Практика експлуатації показує, що до 60% біогазу, який виділяється під час бродіння, може використовуватися установкою для власних потреб. Основна частина цієї енергії витрачається саме на нагрівання холодного субстрату до робочої температури зброджування.

Проведений аналіз витрат енергії на системи забезпечення процесу метаногенезу [26] дозволяє зробити висновок про те, що головну увагу при пошуку шляхів зниження енергоємності метанового зброджування слід приділяти системам рекуперації теплоти зброженого гною і оптимізації перемішування біомаси в біореакторах. Водночас теплота, що міститься у відпрацьованому ефлюенті, є значним додатковим резервом енергії. Цей резерв доцільно використовувати для підігріву завантажуваного субстрату та компенсації тепловтрат у реакторі, що дозволить зменшити частку біогазу, яка спалюється на власні потреби.

В сучасній інженерній практиці виділяють наступні основні методи підвищення енергоефективності систем генерації енергії на основі анаеробної обробки відходів тваринництва:

- Пряма рекуперація теплової енергії (субстрат/ефлюент).

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 40   |

- Рекуперація теплової енергії із використанням термотрансформаторів (теплових насосів).
- Попереднє аеробне нагрівання субстрату за рахунок природного виділення теплоти мікроорганізмами.
- Додаток до оброблюваних відходів високоенергетичних субстратів (зерно, силос, конюшинна суміш тощо) для інтенсифікації виділення газу.

Зважаючи на необхідність оптимізації процесів виробництва біогазу без суттєвих змін у базовому хімічному складі вхідної сировини, одним із ключових аспектів стає ефективне управління тепловими та масовими потоками. Впровадження продуманих систем теплообміну та використання енергоефективного обладнання допомагає зменшити споживання енергії в процесі виробництва біогазу. Саме тому подальший аналіз буде зосереджений на розробці та вдосконаленні технічних рішень для утилізації теплоти переробленої маси, що дозволить підвищити загальний коефіцієнт корисної дії біогазового комплексу.

## 4.2 Розробка та обґрунтування технологічних схем теплоутилізації

Для ефективного використання теплового потенціалу відпрацьованого ефлюенту в сучасній практиці застосовують декілька базових технологічних схем. Найбільш поширеними варіантами є системи прямої рекуперації та системи з використанням термотрансформаторів (теплових насосів).

### 4.2.1 Пряма рекуперація теплової енергії

Теплота, що міститься в ефлюенті, є резервом енергії, який можна використовувати для підігріву завантажуваного субстрату і компенсації тепловтрат у реакторі. Найпростішим інженерним рішенням є встановлення на лінії вивантаження ефлюенту з біореактора рекуперативного теплообмінника типу «інфлюент-ефлюент». Ця схема забезпечує використання теплоти збродженого субстрату для часткового підігріву інфлюенту, що безпосередньо скорочує витрати енергії на метанове збродження.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 41   |

Як теплообмінні апарати зазвичай застосовують спіральні теплообмінники. Однак існують схеми з простішим конструктивним рішенням, де інфлюент проходить безпосередньо через накопичувач ефлюента.

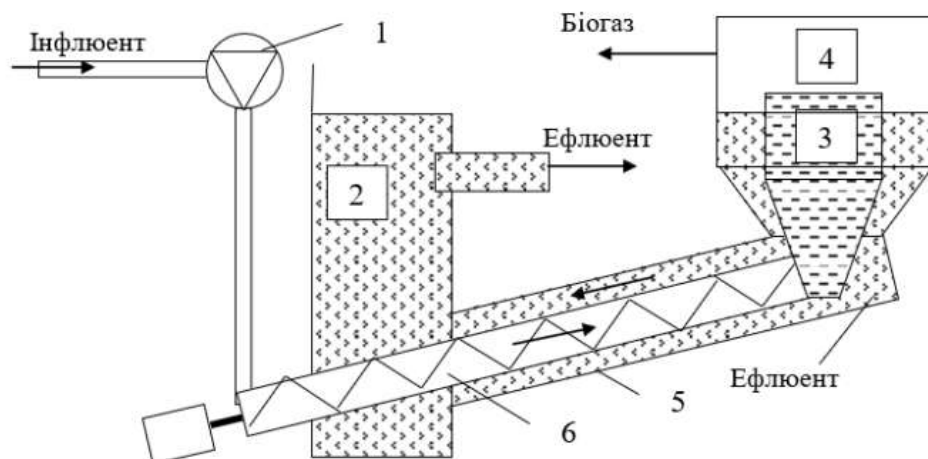


Рис. 4.1 Прямий підігрів інфлюенту за рахунок відкидної теплоти ефлюенту: 1 – насос; 2 – накопичувач ефлюенту; 3 – реактор; 4 – газовий простір; 5 – теплоізоляція; 6 – шнек

Незважаючи на простоту, пряма рекуперація має суттєві недоліки при роботі з сільськогосподарською сировиною. Тваринницькі органічні відходи мають значну липкість, в'язкість та є дуже різноманітними за дисперсним складом. Через це швидкість руху субстрату має бути не менше 3-5 м/с, що призводить до того, що теплота ефлюента просто не встигає ефективно передатися субстрату, який завантажується в метантенк. Крім того, наявні обмеження щодо температурних режимів, ризик замерзання або перегріву, а також високий ризик забруднення та корозії обладнання.

#### 4.2.2 Рекуперація теплової енергії з використанням термотрансформаторів

Більш технологічним підходом є використання теплових насосів. Вони працюють на принципі циклу, де низькотемпературне тепло відпрацьованої маси піднімається до вищої температури за допомогою відповідної робочої речовини (холодоагенту) та компресора.

У такій схемі субстрат, який пройшов анаеробний біореактор, подається до резервуара ефлюенту і в безперервному режимі проходить через теплообмінник-випарник теплового насоса. Теплова енергія передається

легкокиплячому теплоносію, її потенціал підвищується у компресорі і передається через теплообмінник-конденсатор назад до вихідного субстрату.

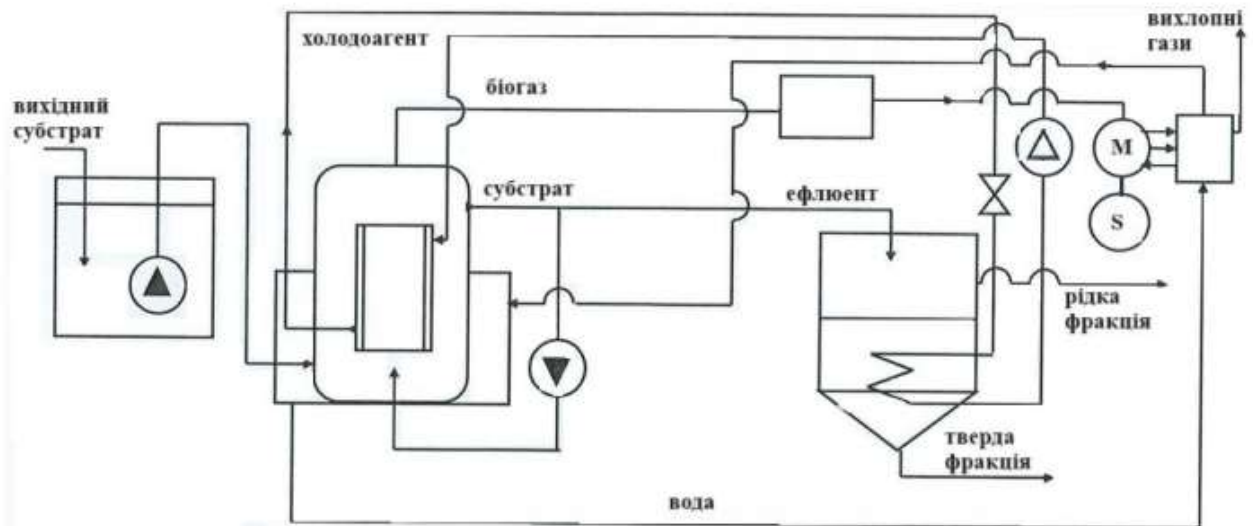


Рис. 4.2 Використання теплоти ефлюента за допомогою теплового насоса

Головною перевагою цього методу є високий коефіцієнт перетворення. За умови коефіцієнта перетворення теплового насоса від 4 до 5, на кожні 3...4 кВт теплової енергії, яка відводиться з біореактора, може бути отримано 4...5 кВт теплової енергії для нагріву вихідного субстрату (при витраті приблизно 1 кВт механічної потужності на привід компресора).

Проте основним недоліком даного технічного рішення є інтенсивне утворення відкладень на теплообмінних поверхнях з боку гною. Це призводить до суттєвих втрат теплової потужності та викликає необхідність значного збільшення дорогих поверхонь теплообміну. Іншим недоліком є низька інтенсивність основних процесів, які визначають загальну продуктивність технологічної лінії.

Аналіз наведених класичних схем показує, що їх використання ускладнюється специфічними властивостями біомаси. Це обґрунтовує необхідність пошуку та впровадження нових конструктивних рішень теплоутилізаторів, здатних ефективно працювати з в'язкими неньютонівськими рідинами без втрати інтенсивності теплообміну.

### 4.3 Удосконалення конструкції біореактора з рекуператором інтенсивної дії

Застосування типових теплообмінників для утилізації теплоти гною [27] має низку суттєвих складнощів: складна експлуатація через неньютонівський характер рідин, необхідність використання автономного насосного обладнання, а також технологічно обмежений час завантаження метантенка, що визначає потребу у великих об'ємах теплообмінних апаратів. Останнє призводить до тривалого знаходження гною в цих апаратах і, як наслідок, до великих амортизаційних витрат, що суттєво знижує ефективність їх застосування. З огляду на специфічні властивості гною, такі як висока в'язкість та схильність до адгезії, теплообмінну поверхню рекуператора в біогазових установках слід виконувати гладкою.

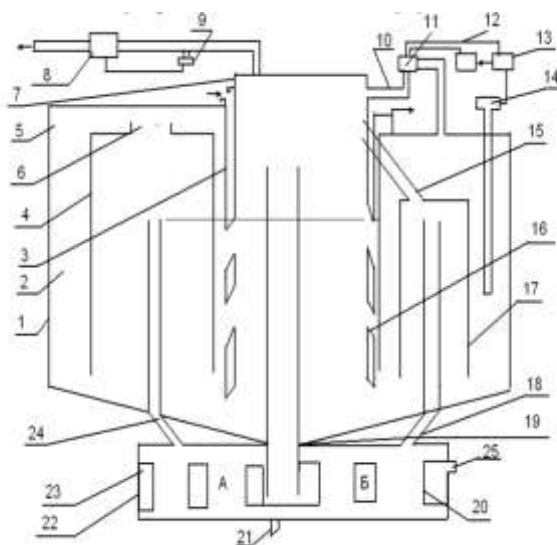


Рис. 4.3 Принципова схема біогазової установки з рекуператором теплоти переробленого гною: 1 – метантєнок; 2 – камера змішування; 3 – теплообмінник; 4, 17-витримувачі; 5 – газова порожнина; 6 – отвір; 7 – труба-розділювач; 8, 12 – вакуумні насоси; 9 – датчик розрядження; 10, 15 – патрубки; 11 – електромагнітний клапан; 13 – програмний пристрій; 14 – регулятор температури; 16, 20 – теплообмінні трубки; 18, 23 – трубопроводи завантаження; 19 – вивантажувальна труба; 21 – вхідний патрубок; 22 – рекуператор; 24 – вивантажувальний патрубок рекуператора; 25 – вивантажувальна труба для відпрацювання. А і В – трубний та міжтрубний простір рекуператора

З метою усунення недоліків відомих біогазових установок та інтенсифікації процесу тепловідбору пропонується вдосконалена конструкція біогазової установки з рекуператором інтенсивної дії. Оскільки механічне перемішування біомаси може негативно впливати на нормальне культивування метанових бактерій, необхідною умовою інтенсивного протікання метанового зброджування є вільний обмін речовин на поверхнях розподілу фаз. Шари біомаси повинні періодично переміщатися у метантенку в режимі ідеального витіснення за рахунок перепаду тиску біогазу, без змішування шарів між собою.

Запропонована установка включає вертикальний циліндричний метантенк, з коаксіально розташованими всередині нього камерою змішування, теплообмінником та витримувачами. Робочий процес починається з того, що вихідний (холодний) гній подається у трубний простір рекуператора. В останньому відбувається попереднє нагрівання вихідного гною за рахунок скидної теплоти переробленого (гарячого) гною, який надходить у міжтрубний простір після завершення циклу зброджування.

Головною інженерною особливістю цієї системи є використання принципу пульсації. За рахунок періодичного підключення рекуператора до вакуум-системи в його трубному і міжтрубному просторі здійснюється зворотно-поступальний рух біомаси зі змінною амплітудою.

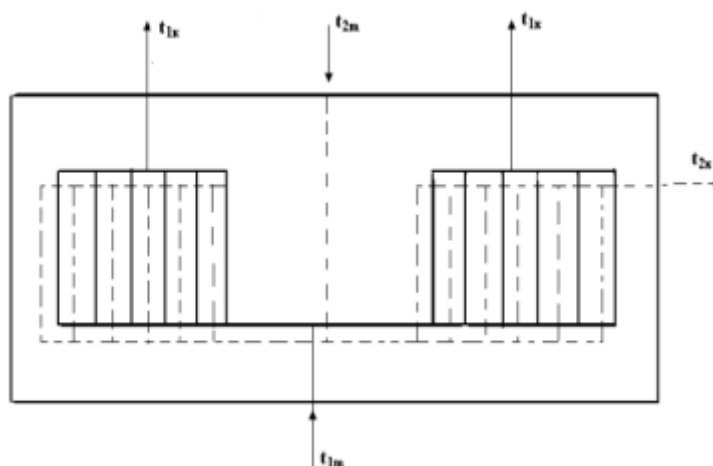


Рис. 4.4 Схема рекуператора, що працює в режимі зворотно-поступального руху фаз з пульсуючим завантаженням та вивантаженням біомаси

Одночасне перемішування теплоносіїв в обох порожнинах рекуператора здійснюється в пульсуючому режимі за допомогою вакуумного насосу. Повне обвалення вивантажуваного гною у вивантажувальній трубі та у рекуператорі до заданого рівня забезпечує підйом осілих твердих компонентів та значно збільшує ефективність тепловідбору. Такий пульсуючий режим роботи запобігає налипанню гною до стінок теплообмінних трубок та усуває утворення поверхневої кірки.

Крім того, для забезпечення високої ремонтпридатності в умовах фермерського господарства, в рекуператорі розташовані знімні трубки-теплообмінники. Їх можна замінювати незалежно одну від одної, не зупиняючи загальний процес зброджування в метантенку.

#### 4.4 Оцінка ефективності запропонованого конструктивного рішення

Забезпечення оптимального температурного режиму в метантенку є найбільш енергоємним технологічним процесом біогазового комплексу. При щодобовому завантаженні порції сировини об'ємом 5,5 м<sup>3</sup>, нагрівання цієї холодної маси від початкової температури навколишнього середовища до робочої температури вимагає значних витрат теплової енергії. Впровадження системи прямої рекуперації дозволяє покрити суттєву частину цієї потреби за рахунок відпрацьованого ефлюенту, що виводиться з реактора.

Запропонована в роботі удосконалена конструкція трубчастого рекуператора, що працює в режимі зворотно-поступального (пульсуючого) руху фаз, успішно вирішує головну експлуатаційну проблему — зниження інтенсивності теплообміну через неньютонівський характер рідини та її високу схильність до адгезії. Завдяки періодичному повному обваленню вивантажуваного гною у вивантажувальній трубі та рекуператорі запобігається налипання маси на стінки теплообмінних трубок. Це гарантує стабільно високий коефіцієнт теплопередачі протягом усього періоду експлуатації та зводить до мінімуму простої обладнання на технічне обслуговування.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 46   |

Зниження витрат енергії на систему підігріву (яка у традиційних схемах може споживати до 60% виробленого газу) безпосередньо призводить до збільшення частки товарного біогазу. Вивільнені обсяги енергоносія можуть бути перенаправлені на когенераційну установку для виробництва електроенергії або використані для інших господарських потреб ферми. Крім того, відмова від традиційних механічних перемішувальних пристроїв на користь переміщення фаз за рахунок перепаду тиску біогазу дозволяє створити ідеальні умови для життєдіяльності метанових бактерій (без інгібуючої дії перемішування шарів).

Отже, застосування інтенсивного способу обробки біомаси за допомогою пульсуючого завантаження та вивантаження є доцільним інженерним рішенням. Воно дозволяє інтенсифікувати процес тепловідбору збродженої маси, суттєво зменшити габарити теплообмінних апаратів та підвищити загальну енергетичну ефективність фермерської біогазової установки.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 47   |

## РОЗДІЛ 5

### ЗАХОДИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

#### 5.1 Організаційно-технічні заходи з енергозбереження на біогазовій установці

Підвищення загальної енергетичної ефективності біогазової установки досягається шляхом комплексної реалізації базових організаційних та технічних заходів. Головною метою є мінімізація витрат електричної та теплової енергії на власні потреби комплексу (робота насосного обладнання, систем підігріву, освітлення та автоматики), що дозволяє максимізувати вихід товарного біогазу.

Для фермерської біогазової установки з робочим об'ємом реактора 51,3 м<sup>3</sup> доцільно впровадити наступний комплекс рішень:

- Використання частотно-регульованого електропривода (ЧРП). Транспортування субстрату (добова доза завантаження становить 5,5 м<sup>3</sup>) вимагає використання потужних фекальних насосів. Прямий пуск електродвигунів супроводжується гідравлічними ударами та перевитратою енергії. Впровадження ЧРП дозволяє забезпечити плавний пуск, зменшити споживання електроенергії насосною групою на 20–30% за рахунок регулювання продуктивності відповідно до реальної потреби, а також гарантує точне дозування порцій сировини.
- Покращення теплової ізоляції. Для підтримки мезофільного режиму на рівні 32 °С необхідна мінімізація тепловтрат. Передбачається монтаж сучасної теплової ізоляції (пінополіуретану товщиною 100 мм) на зовнішніх стінках метантенка із захистом профільованим листом. Також обов'язковій теплоізоляції підлягають усі зовнішні трубопроводи теплоносія.
- Модернізація системи освітлення. Заміна застарілих джерел світла на технологічних майданчиках на сучасні промислові світлодіодні (LED) світильники зі ступенем захисту IP65. Встановлення датчиків

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 48   |

руху та реле освітленості дозволить оптимізувати роботу зовнішнього освітлення у темну пору доби.

- Організаційні заходи. Регулярне очищення теплообмінних поверхонь рекуператорів від органічних відкладень, оскільки біологічна плівка різко знижує коефіцієнт теплопередачі. Систематичний моніторинг показників енергоспоживання для своєчасного виявлення відхилень у роботі обладнання.

## **5.2 Енергозберігаючий ефект від впровадження системи рекуперації теплоти**

Нагрівання свіжої порції гною (5,5 м<sup>3</sup>/добу) від початкової температури до 32 °С є найбільш енергоємним етапом функціонування станції. Традиційно для цього спалюється частина виробленого енергоносія. Проте теплота, що міститься у відпрацьованому ефлюенті, є потужним резервом енергії, який використовується для компенсації тепловтрат реактора.

Впровадження трубчастого рекуператора, що працює в режимі зворотно-поступального руху фаз з пульсуючим завантаженням біомаси, дозволяє ефективно утилізувати скидну теплоту. Гарячий відпрацьований ефлюент віддає своє тепло холодному інфлюенту. Пульсуючий режим запобігає налипанню в'язкої маси на стінки теплообмінних труб, гарантуючи стабільно високий коефіцієнт теплопередачі.

У результаті сировина надходить до метантенка попередньо підігрітою. Це пропорційно зменшує теплове навантаження на основний водогрійний котел та стабілізує мікробіологічний процес, запобігаючи температурному шоку у метаногенних бактерій при порційному завантаженні холодної сировини.

## **5.3 Зниження енерговитрат за рахунок мікропроцесорної автоматизації**

Використання традиційних двопозиційних (релейних) систем керування підігрівом в умовах значної інерційності біореактора неминуче призводить до температурних коливань. Перегрів субстрату навіть на 1–2 °С вище технологічної норми спричиняє марнотратну перевитрату теплової енергії та може пригнічувати процес метаногенезу.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 49   |

Впровадження мікропроцесорної системи на базі ПД-регулятора усуває ці недоліки. Завдяки безперервному обчисленню ПД-складових, контролер динамічно реагує на падіння температури під час завантаження свіжої маси, плавно керуючи виконавчими механізмами (електроприводом клапана). Точність підтримання температури досягає  $\pm 0,5$  °С.

Усунення динамічної похибки та перерегулювання дозволяє знизити витрати теплової енергії на власні потреби реактора на 10–12%. Кожна заощаджена одиниця тепла автоматично конвертується у збільшення обсягів товарного біогазу, готового до реалізації або когенерації.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 50   |

**РОЗДІЛ 6**  
**ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТИХ**  
**ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ**

**6.1 Розрахунок капітальних вкладень у модернізацію біогазової установки**

Впровадження мікропроцесорної системи керування температурним режимом та трубчастого рекуператора інтенсивної дії потребує початкових інвестицій. Загальна сума додаткових капітальних вкладень визначається за формулою:

$$K_{\Sigma} = K_{\text{обл}} + K_{\text{монт.}} + K_{\text{інш.}} \quad (6.1)$$

де  $K_{\text{обл}}$  — витрати на придбання обладнання (ПЛК, термоперетворювачі, частотні перетворювачі для насосів, елементи рекуператора, теплоізоляційні матеріали), грн;

$K_{\text{монт}}$  — вартість будівельно-монтажних та пусконаладжувальних робіт (приймається на рівні 15–20% від вартості обладнання), грн;

$K_{\text{інш}}$  — інші непередбачені та транспортні витрати (5–7%), грн.

**6.2 Визначення річної економії від впровадження енергозберігаючих заходів**

Економічний ефект від модернізації формується за рахунок зниження поточних експлуатаційних витрат та збільшення виходу товарної продукції. Річний економічний ефект ( $E_{\Sigma}$ ) розраховується як сума:

$$E_{\Sigma} = E_{\text{ел.}} + E_{\text{тепл.}} + E_{\text{газ.}} \quad (6.2)$$

де  $E_{\text{ел}}$  — річна економія коштів завдяки впровадженню частотно-регульованого привода насосів (скорочення споживання на 20–30% через усунення пускових струмів та дроселювання), грн;

$E_{\text{тепл}}$  — економія теплової енергії за рахунок рекуперації скидної теплоти ефлюенту та ліквідації інерційного перегріву маси ПД-регулятором (зменшення навантаження на котельню на 10–12%), грн;

$E_{\text{газ}}$  — додатковий прибуток від збільшеного валового виходу газу завдяки стабілізації мезофільного режиму (32 °C), грн.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     | 51   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     |      |

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо підвищення енергетичної та економічної ефективності фермерської біогазової установки (з робочим об'ємом реактора 51,3 м<sup>3</sup> та щодобовим завантаженням 5,5 м<sup>3</sup> субстрату) шляхом модернізації теплотехнічного обладнання та впровадження мікропроцесорної системи автоматизації.

За результатами проведених досліджень та інженерних розрахунків зроблено наступні висновки:

1. Аналіз технологічного процесу показав, що найбільш енергоємним етапом виробництва біогазу є нагрівання холодної сировини та підтримання стабільного мезофільного режиму на рівні 32 °С. Традиційні методи керування та відсутність утилізації скидної теплоти призводять до того, що значна частина виробленого енергоносія витрачається на власні потреби комплексу, що знижує його загальну рентабельність.
2. Розглянуто мікропроцесорну систему керування температурним режимом на базі ПІД-регулятора. Встановлено, що перехід від двопозиційного (релейного) керування до ПІД-регулювання дозволяє ліквідувати інерційні перегріви маси та динамічні похибки, забезпечуючи точність підтримання температури в межах  $\pm 0,5$  °С. Це рішення знижує витрати теплової енергії на 10–12% та створює оптимальні умови для життєдіяльності метаногенних мікроорганізмів.
3. Удосконалено конструкцію системи теплоутилізації шляхом застосування трубчастого рекуператора інтенсивної дії, який працює в режимі зворотно-поступального (пульсуючого) руху фаз. Такий гідродинамічний режим запобігає налипанню в'язкого неньютонівського субстрату на теплообмінні поверхні, гарантує стабільно високий коефіцієнт теплопередачі та забезпечує безкоштовний попередній підігрів інфлюенту за рахунок скидної теплоти відпрацьованого ефлюенту.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                     | 52   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     |      |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Олійник В.С.: «Довідник сільського електрика», 3 – є видання перероблене і доповнене. – Київ «Урожай». 1989р.
2. Марченко О.С.: «Механізація та автоматизація у тваринництві та птахівництві». – Київ. 1995р.
3. Токарчук Д.М. Виробництво і використання біогазу в Україні: економічні і соціальні перспективи / Д.М. Токарчук, О.В. Яремчук // Збірник наукових праць Таврійського державного агротехнологічного університету (економічні науки). – 2013. – № 2. – С. 338 – 346.
4. Мірошник М. М. Перспективи використання біомаси для отримання теплової енергії в Україні. М. М. Мірошник, Я. І. Засядько // Земля України – потенціал економічної і екологічної безпеки держави: матеріали міжнар. наук-техн. конф, (м. Вінниця, 23-26 берез.) Вінниця, 2011 – С. 78-82.
5. Фесюк В. О. Оцінка перспектив добування біогазу з осадків стічних вод Луцьких міських комунальних очисних споруд/В. О. Фесюк // Природа Західного Полісся та прилеглих територій: зб. наук. пр. / Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки; [відп. ред. Ф. В. Зузук та ін.]. – 2010. – № 7. – С.84-90.
6. Гончаренко Б.М., Ладанюк А.П. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій: Підруч. — К.: НУХТ, 2014. — 530 с.
7. Гураль І.В., Дивак М.П. Біохімічний аналіз процесів в біогазових установках та його застосування в задачі макромодельовання процесів виробництва біогазу // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». — Хмельницький, 2014. — С.152-158.
8. Ігнатєва Т. Г. Виробництво біогазу як інноваційний напрям енергозбереження в аграрних підприємствах України: стан, проблеми та перспективи розвитку / Т. Г. Ігнатєва // Інноваційна економіка. – 2010. – № 5. – С. 19-23

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 53   |

9.

- 10.Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки: монографія / Ткаченко С. Й., Степанов Д. В.; Вінниц. нац. техн. ун-т. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 132 с.
11. Кузнецова А. Біогаз та „зелені тарифи” в Україні – чи вигідне інвестування? [Електронний ресурс] / А. Кузнецова, К. Куценко. — К. : Інститут економічних досліджень та політичних консультацій, 2010. – 40 с.
12. Майстренко О. Ю. Розробка математичної моделі процесів розвитку мікроорганізмів в рамках біоенергетики біомаси / О. Ю Майстренко, Ю. В. Куріс, Ю. С. Калінцева // Новини Енергетики. – 2010. – № 2. – С. 32–39.
- 13.Гелету́ха Г.Г. Перспективи виробництва та використання біометану в Україні. / Г.Г. Гелету́ха, П.П. Кучерук, Ю.Б. Матвеев // Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України. – 2014. – № 11. – 42 с.
14. Куріс Ю. В. Способи утилізації біогазу / Ю. В. Куріс, С. І. Ткаченко, Н. В. Семененко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. –2010. – № 7. – С. 20-30.
15. Гелету́ха Г. Перспективи розвитку технологій отримання біогазу в Україні. / Г. Гелету́ха, С. Кобзар, К. Копейкін // Зелена енергетика. – 2001. – № 3. – С. 12-14.
16. Екологізація енергетики: навч. Посібник / В. Я. Шевчук, Г. О. Білявський, Ю. М. Саталкін, В. М. Навроцький. – К.: Вища освіта, 2002.111 с.
17. Шиманський С.І. Розширення паливної бази автомобільного транспорту використанням біогазу як моторного палива / С. І. Шиманський, Р. В. Симоненко, М. Б. Назаренко, А. Г. Говорун // Автошляховик України. – 2013. – № 3. – С. 2-5.
18. Біоенергетичні системи в аграрному виробництві : навч. посіб. / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець, О. А. Марус, М. Ю. Павленко. — Житомир :

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 54   |

ЖНАЕУ, 2017. — 229 с.

19. Використання біогазу як моторного палива / С. І. Шиманський [та ін.] // Автошляховик України. – 2013. – № 6. – С. 13-15.
20. Марасін О.В. Розробка та дослідження пальникових пристроїв для спалювання біогазу в промислових котлах [Текст]: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.14.06 / Марисін Олексій Володимирович: НАН України, Інст газу. – Київ, 2015. – 22 с.
21. Сенчук М.М. Оптимізація технологічного процесу фермерської біогазової установки. Збірник наукових праць «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва», 2024. № 2. С. 68–78.
22. Goncharuk, I.V. (2020). Biogas production in the agricultural sector – a way to increase energy independence and soil fertility. Agrosvit, 15, pp. 18–29. (In English).
23. Калетнік Г.М., Здирко Н.Г., Фабіянська В.Ю. Біогаз в домогосподарствах – запорука енергонезалежності сільських територій України. Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2018. № 8. С. 7–22.
24. Kaletnik G., Lutkovska S. Innovative Environmental Strategy Sustainable Development. European Journal of Sustainable Development. 2020. № 9. 2. P. 89–98.
25. Дубровін В.О, Поліщук В.М., «Підвищення енергоефективності та стимулювання використання відновлюваної енергії в агро-харчових та інших малих та середніх підприємствах (МСП) України», 2015
26. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 2. 206 с
27. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 3. 208 с.

|      |      |          |        |      |                                     |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.02-БКР.2606«С».2025.10.30.005.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                     | 55   |