

**Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощев**

**БІОГАЗОВІ УСТАНОВКИ З  
ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ  
ЕНЕРГІЇ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ  
ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ БІОМАСИ**

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощев**

**БІОГАЗОВІ УСТАНОВКИ З  
ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ  
ЕНЕРГІЇ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ  
ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ БІОМАСИ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2017

УДК 662.767.2  
P25

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 26 листопада 2016 р.)

Рецензенти:

**В. М. Желих**, доктор технічних наук, професор

**С. Й. Ткаченко**, доктор технічних наук, професор

**Ратушняк, Г. С.**

P45 Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 110 с.

ISBN ....

Обґрунтовано напрямки підвищення енергоефективності біоконверсії шляхом зменшення енергетичних затрат на ферментацію біомаси за рахунок використання відновлюваних джерел енергії термостабілізації процесу анаеробного бродіння.

Запропоновано енергоефективні конструкторсько-технологічні схеми біогазових установок з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси. Проаналізовано вплив температурних режимів ферментації субстрату біомаси на продуктивність біогазової установки.

Розроблено математичні моделі управління енергоефективними технологічними процесами інтенсифікації виробництва біогазу з використанням для термостабілізації анаеробного бродіння відновлюваних джерел енергії.

**УДК 662.767.2**

ISBN -....

© Г. Ратушняк, О. Лялюк, І. Кощєєв, 2017

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>Розділ 1 ШЛЯХИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ТА ВТОРИННИХ ДЖЕРЕЛ НИЗЬКОПОТЕНЦІАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ БІОКОНВЕРСІЇ</b> .....	7
1.1 Енергоефективні засоби інтенсифікації ферментації субстрату в біогазовому реакторі .....	7
1.2 Використання сонячної енергії для термостабілізації та інтенсифікації процесу ферментації субстрату в біореакторі.....	11
1.3 Використання теплоти ґрунту та природної води з артезіанських свердловин та ґрунтової і відкритих водойм для термостабілізації процесу ферментації за допомогою теплових насосів.....	14
1.4 Використання тепла масиву полігону твердих побутових відходів для термостабілізації та інтенсифікації процесу ферментації субстрату в біореакторі.....	17
1.5 Особливості утилізації низькопотенціальних теплових вторинних ресурсів в системах інтенсифікації біоконверсії.....	20
1.5.1. Утилізація теплових викидів агропромислових та сільськогосподарських підприємств.....	20
1.5.2. Утилізація теплових викидів систем біоконверсії.....	23
<b>Розділ 2 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ КОНСТРУКТОРСЬКО- ТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК З АЛЬ- ТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ ПРО- ЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ БІОМАСИ</b> .....	28
2.1 Біогазові установки з використанням низькопотенціальної теплової енергії технологічного процесу біоконверсії.....	28
2.2 Біогазові установка з використанням відновлюваної сонячної енергії за допомогою сонячних колекторів та батарей.....	33
2.3 Біогазові установки з використанням низькопотенціальної теплової енергії для забезпечення процесу термостабілізації за допомогою теплових насосів.....	41
<b>Розділ 3 МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВ- НИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ</b> .....	51
3.1 Вплив температурних режимів ферментації субстрату на продуктивність біогазової установки.....	51
3.2 Моделювання процесу біоконверсії в біореакторі з відновлюваними джерелами енергії для термостабілізації з використанням нечіткої логіки.....	54

3.3. Енергетичні складові моделі енергоефективного біореактора з використанням відновлюваних джерел.....	65
3.4 Ефективність інноваційних проектів біоконверсії з альтернативними джерелами енергії.....	71
3.4.1 Енергоефективність інноваційних проектів біоконверсії з використанням геліоустановок для термостабілізації процесу виробництва біогазу.....	71
3.4.2 Економічна оцінка енергоефективності біоконверсії з використанням відновлюваних джерел енергії геліоустановок та теплового насоса.....	77
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>80</b>

## ВСТУП

Зростання вартості енергоносіїв стимулює до використання альтернативних відновлюваних джерел енергії. За рахунок продукції невеликих агропромислових підприємств, зокрема використовуючи відходи органічного походження в системах біоконверсії, можливо частково вирішити цю проблему. Законодавча база України сприяє поширенню енергозберігаючих технологій та альтернативних джерел енергії. Верховною Радою України було прийнято закон «Про альтернативні джерела енергії» та закон «Про розвиток виробництва та споживання біологічних видів палив», якими передбачено впровадження альтернативних джерел енергії з використанням біомаси. Загострення процесу забруднення довкілля органічними відходами та відходами продуктів життєдіяльності населених пунктів є також суттєвою мотивацією інтенсифікації науково-технічних розробок з удосконалення процесу виробництва біогазу.

Для досягнення високої ефективності роботи біореакторів та отримання максимальної кількості біогазу із органічних сільськогосподарських відходів необхідно створити оптимальні технологічні параметри в біореакторі. Незначне відхилення від оптимальних температурних режимів сприяє загибелі анаеробних бактерій, тобто зупинення або сповільнення процесу ферментації. Важливим аспектом стабільності теплового режиму в біореакторі є підігрівання субстрату та одночасна теплоізоляція стінок біореактора. Рентабельність таких установок пропорційна витратам енергії на процес термостабілізації. Процес ферментації біомаси потребує значних затрат енергії, що може призвести до збитковості процесу утворення біогазу в реакторі. Теплозабезпечення біореактора є ефективним вирішенням проблем повторного використання теплоти та зниження затрат на технологічний процес утворення біогазу.

В роботі наведено результати аналізу шляхів та особливостей використання відновлюваних та вторинних джерел низькопотенціальної теплової енергії в системах інтенсифікації біоконверсії. Альтернативними енергоефективними засобами теплозабезпечення термостабілізації процесу ферментації біомаси є використання сонячної та вітрової енергії, теплоти ґрунту та води за допомогою теплових насосів та

утилізації низькопотенціальних теплових вторинних ресурсів. Запропонована класифікація напрямків підвищення енергоефективності біоконверсії шляхом зменшення енергетичних затрат на ферментацію біомаси.

Розглянуто енергоефективні конструкторсько-технологічні схеми біогазових установок з альтернативними джерелами термостабілізації процесу ферментації. Реалізацію підвищення енергоефективності біогазових установок пропонується за допомогою використання низькопотенціальної теплової енергії технологічного процесу біоконверсії, відновлюваної сонячної енергії за допомогою сонячних колекторів та батарей, а також за допомогою перетворення низькопотенціальної теплової енергії тепловими насосами.

За результатами теоретичних досліджень виявлено залежності продуктивності біогазової установки від частоти обертання перемішувача і вологості субстрату для різних температурних режимів анаеробного бродіння. Запропоновано математичну модель з використанням нечіткої логіки та лінгвістичних змінних для визначення продуктивності біогазової установки з відновлюваними джерелами енергії для термостабілізації процесу ферментації. Визначено енергетичні складові моделі енергоефективного біореактора з відновлюваними альтернативними джерелами енергії. Розроблено структурно-логічну модель управління процесом з підвищення енергоефективності біоконверсії. За результатами чисельного моделювання визначено затрати енергії на забезпечення інтенсифікації та термостабілізації як приклад для природо-кліматичних умов Вінницької області.

**РОЗДІЛ 1**  
**ШЛЯХИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ**  
**ВІДНОВЛЮВАНИХ ТА ВТОРИННИХ ДЖЕРЕЛ**  
**НИЗЬКОПОТЕНЦІАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ**  
**В СИСТЕМАХ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ БІОКОНВЕРСІЇ**

В сучасній енергетичній стратегії України пріоритетна роль відводиться проблемі енергоефективності, вирішення якої потребує запровадження енергозберігаючих технологій та альтернативних відновлюваних джерел енергії [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Використання біогазових систем потребує значних витрат енергії для підтримання постійного температурного режиму ферментації, що є невід'ємною складовою ефективного процесу зброджування для отримання біогазу з органічних відходів [8–13]. Для цього використовуються традиційні та не традиційні джерела енергії [8, 14–19]. Обґрунтування шляхів підвищення енергоефективності біоконверсії та оцінка потенціалу використання нетрадиційних джерел енергії для термостабілізації процесу ферментації в біореакторах є актуальною науково-практичною задачею [18, 20, 21].

**1.1 Енергоефективні засоби інтенсифікації ферментації субстрату в біогазовому реакторі**

Енергоефективність – це ефективне раціональне використання енергетичних ресурсів, тобто використання меншої кількості енергії для забезпечення того ж рівня енергетичного забезпечення устаткування або технологічних процесів біоконверсії. На відміну від енергозбереження, головним чином спрямованого на зменшення енергоспоживання, енергоефективність – ефективне витрачання енергії.

Для підвищення енергоефективності процесу утворення біогазу необхідно враховувати недоліки існуючих малоєфективних біогазових реакторів. Це такі недоліки як недостатнє та нерівномірне прогрівання суміші біомаси, недостатнє перемішування суміші біомаси, неефективна теплова ізоляція, відсутність утилізації тепла з відпрацьованої суміші біомаси та біогазу, використання для термостабілізації ферментації нетрадиційних джерел енергії [22–24].



Зміни температури процесу термостабілізації ферментації допустимі з межах  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ , інакше вони впливають негативно на процес зброджування. Це спричиняє низьку ефективність виділення біогазу, тому що метаболічна активність анаеробних бактерій знаходиться в прямій залежності від температури середовища. Необхідно дотримуватись одного з температурних режимів процесу ферментації: кріофільного  $20^{\circ}\text{C}$ , мезофільного  $32\text{--}33^{\circ}\text{C}$ , термофільного  $52\text{--}54^{\circ}\text{C}$ . [10]. Недотримання температури одного з процесів і коливання полів температур більш ніж  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  може значно знизити ефективність утворення біогазу, а зменшення температури до  $+15^{\circ}\text{C}$  і нижче спричиняє зупинку активності метаболічних бактерій [10]. Для запобігання зупинці процесу утворення біогазу, необхідно забезпечувати рівномірне прогрівання суміші біомаси шляхом вибору оптимального способу прогрівання суміші біомаси. Доцільно використовувати такі способи прогрівання біомаси: непряме підігрівання, внутрішні і зовнішні системи підігрівання [25].

Непряме підігрівання реалізовується шляхом застосування теплообмінників, які розміщуються зовні чи всередині біогазового реактора. Внутрішнє підігрівання є ефективним технічним рішенням при достатньо великих розмірах теплообмінника, який має достатню міцність, щоб витримати перемішування біомаси [12, 24, 26–28]. Підігрівання з допомогою зовнішнього теплообмінника може бути виконане в вигляді нагрівальної сорочки навколо біогазового реактора [29], а також може застосовуватись теплообмінник для підігрівання біомаси при гідравлічному перемішування [30]. Ще один спосіб – проміжне підігрівання сировини, яке здійснюється у бункері підготовки біомаси, – але зазвичай він використовується з іншими способами. В якості джерела тепла для підвищення енергоефективності можуть використовуватись альтернативні джерела енергії [31–34].

Крім того значну роль у формування полів температур, в об'ємі біогазового реактора, відіграє спосіб перемішування суміші біомаси. Можуть бути застосовані різноманітні схеми розміщення теплообмінників та методи перемішування всередині біогазового реактора. Перемішування може здійснюватись такими основними способами: механічними мішалками, біогазом, що пропускається через суміш біомаси,

перекачуванням суміші біомаси з верхньої зони реактора до нижньої [11, 25, 35–38].

В горизонтальних сталевих реакторах використовується механічне перемішування, що здійснюється такими пристроями, як лопатеві, пропелерні, турбінні, шнекові, якірні, ремінні, дискові, скребкові перемішувальні пристрої. Ручне механічне перемішування може бути застосоване в біогазових реакторах невеликих об'ємів. При перемішуванні забезпечується розподілення температур по об'єму біогазового реактора, оскільки біля нагрівальних елементів накопичується перегріта суміш біомаси, то необхідність періодичного перемішування неможливо переоцінити. Крім того при перемішуванні руйнується суха кірка на поверхні суміші біомаси, яка заважає вивільненню біогазу. Також при застосуванні обертових перемішувальних пристроїв висуваються високі вимоги до форми реактора, оскільки вона повинна забезпечувати необхідні умови для зменшення утворення осаду та плаваючої кірки [39, 40].

Гідравлічне перемішування може бути реалізоване перекачуванням суміші біомаси і випускання через гідравлічні насадки струменя під тиском за допомогою циркуляційного насоса [25]. За допомогою насоса можна повністю перемішувати суміш біомаси при одночасному завантаженні і вивантаженні сировини. Застосування гідравлічних способів перемішування детально розглянуто в роботах [20, 22].

Пневматичне перемішування являє собою біогаз пропущений під надмірним тиском через барботер або трубку, що розташовується в нижній частині реактора. Проблемою таких систем може бути попадання біомаси в газову систему, що можна передбачити шляхом установлення системи клапанів. Цей спосіб дає хороший ефект в тому випадку, якщо зброджувана маса сильно розріджена і на поверхні не утворюється кірка [25]. Крім того можливе підігрівання субстрату шляхом подачі пари під тиском, але такий спосіб підвищує вміст вологи в біогазі, для усунення якої при підготовленні газу до використання необхідні додаткові заходи.

Ефективним способом підвищення енергоефективності біогазового виробництва є вібраційна інтенсифікація процесу анаеробного бродіння, якої можна досягти шляхом використання вібраційних процесів

оптимізації теплообміну [14, 41]. Для цього розділяють біогазовий реактор на секції та встановлюють віброактиватори. Така конструкція дає можливість позбавитись недоліків в існуючих біореакторах – застійні зони, значні площі теплообміну, недостатнє використання потенціалу сировини [26].

Коливання температур процесу бродіння в межах 4...5°C суттєво впливає на якість технологічного процесу, продуктивність біогазової установки та різко змінює активність анаеробних організмів. Вплив коливань температур можна зменшити шляхом підвищення термічного опору матеріалів захисних конструкцій біореакторів [14, 22, 41]. Чим більший опір теплопередачі ізоляції, тим незначніший перепад температур буде утворюватись в біореакторі та меншими будуть тепловтрати у зовнішнє середовище. Для зменшення тепловтрат у зовнішнє середовище доцільно застосовувати матеріали з низьким коефіцієнтом теплопровідності, а для зниження маси і вартості конструкції влаштовувати повітряні прошарки. Використання повітряного прошарку між біореактором та тепловою ізоляцією може підвищити загальний термічний опір конструкції в 1,4...1,8 разів, бо коефіцієнт теплопровідності повітря має досить низьке значення ( $\lambda=0,023\text{Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$  при  $t = 0^\circ\text{C}$ ). Ефективним способом є екранування, тобто покриття теплової ізоляції алюмінієвою фольгою, яка може зменшити тепловий потік у 20 разів [12, 20, 22].

Підвищити енергоефективність біогазової установки в цілому можна також застосовуючи рециркуляцію теплової енергії, тобто встановленням теплообмінників для відбору теплової енергії від утвореного біогазу і відпрацьованої біомаси та використання цієї енергії для підігрівання біомаси всередині біореактора [22]. Рециркуляцію теплової енергії рідко використовують у зв'язку зі збільшенням фінансових витрат, що обумовлено влаштуванням теплонасосного обладнання для відбору теплової енергії.

Одним із шляхів підвищення енергоефективності біоконверсії є раціональний вибір джерел тепlopостачання для забезпечення термостабілізації процесу ферментації, а саме – використання альтернативних джерел енергії. Використання альтернативних джерел енергії є більш економічно вигідним, але збільшує вартість біогазового вироб-

ництв та термін окупності, а також ускладнює систему виробництва біогазу. На сьогоднішній день здебільшого існують біогазові установки, які працюють завдяки традиційним джерелам енергії. Використання альтернативних джерел енергії для забезпечення термостабілізації процесу ферментації в біореакторі недооцінене та потребує науково-технічного обґрунтування [13, 42, 43]. Класифікацію напрямків підвищення енергоефективності біоконверсії шляхом зменшення енерговитрат на процес ферментації біомаси наведено на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Напрямки підвищення енергоефективності біоконверсії шляхом зменшення енергетичних затрат на ферментацію біомаси

## 1.2 Використання сонячної енергії для термостабілізації та інтенсифікації процесу ферментації субстрату в біореакторі

Сонячна енергія може використовуватись для безпосереднього нагрівання поверхні резервуара біогазової установки, а також отримання теплової та електричної енергії від сонячних колекторів й батарей для інтенсифікації процесу виробництва біогазу.

Ефективність нагрівання поверхні біогазової установки для інтен-

сифікації процесу ферментації біомаси розглядається в роботі В. М. Желиха та Ю. В. Фурдаса [24]. У ній наведено аналіз форм побутових біогазових установок і визначено, що енергоефективною формою для поглинання поверхнею сонячних променів є сферична з вершиною і низом в формі зрізаного конуса. В такому випадку буде відбуватись прогрівання органічної сировини в біореакторі шляхом прямого контакту сонячних променів з його поверхнею. Дослідження виконано для невеликого побутового реактора об'ємом  $1 \text{ м}^3$ , резервуар якого повністю виконаний з металу та пофарбований в чорний колір. Найефективніше така система буде працювати в теплий період року та при найбільших сонячних теплонадходженнях. Авторами запропоновано методику визначення кількості теплової енергії для біореактора та визначено, що кількість теплоти, отриманої від сонця, для такого біореактора складає не більше  $2700 \text{ кВт}\cdot\text{місяць}$  [24].

Забезпечення сонячною енергією біогазової установки запропоновано в роботах [18, 40]. Необхідна температура в біореакторі досягається використанням енергії Сонця за допомогою сонячних колектора і батареї таким чином, що підігрівання біомаси в реакторі здійснюється через теплообмінний радіатор або електронагрівач. За допомогою насоса воду прокачують через модулі-колектори сонячного колектора, які добре поглинають сонячне випромінювання і нагрівають воду до  $60\text{--}80^\circ\text{C}$ . В холодну пору року для одержання додаткового тепла в реакторі використовують електронагрівач, який живиться від акумулятора електричної енергії. При необхідності сонячний колектор через клапани може бути відключений від теплового акумулятора, що дозволяє заощаджувати енергію в темну пору доби, коли сонячний колектор не працює ефективно.

В роботі [28] розглянуто біогазову установку, що містить геліоустановку. В ній нагріта вертикальна стінка (мідна або алюмінієва) передає тепло жорстко закріпленому мідному або алюмінієвому трубчастому контуру, що заповнений рідким теплоносієм. Контур передає теплову енергію спіралі, яка в свою чергу нагріває біомасу.

Структурну схему використання сонячної енергії для термостабілізації та інтенсифікації процесу ферментації субстрату при виробництві біогазу наведено на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Структурна схема використання сонячної енергії для термостабілізації та інтенсифікації процесу ферментації субстрату

При термостабілізації процесу бродіння з використанням теплової енергії сонця на роботу частин біогазової установки з електроспоживанням витрачається електроенергія з мережі. Тому доцільним для підвищення енергоефективності біоконверсії перенесення теплової енергії від сонячного колектора до бака-акумулятора, з якого тепла енергія подається на термостабілізацію процесу ферментації в біореакторі, а сонячна батарея постачає електричним нагрівальним кабелем електричний струм до інвертора електричного струму. Інвертор електроенергії забезпечує електричним струмом роботу компресора, блока управління, терморегулятора, насосів та інші частини з електроспоживанням.

### **1.3 Використання теплоти ґрунту та природної води з артезіанських свердловин та ґрунтової і відкритих водойм для термостабілізації процесу ферментації за допомогою теплових насосів**

На сьогоднішній день використання біогазу є досить обмеженим, тому що недостатньо досліджена енергетична сторона біогазового виробництва, а саме великі теплові втрати на термостабілізацію для підігрівання субстрату та нераціональне використання біогазу. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є використання низькопотенціальних джерел енергії, а саме ґрунту й природної води відкритих водойм та ґрунтової [44–46].

Тепловий насос – це екологічно чиста компактна установка, що дозволяє отримувати теплову енергію за рахунок перетворення низькопотенціальної теплоти в енергію більш високого температурного потенціалу. Ці установки можуть виробляти в 3–7 разів більше теплової енергії ніж споживають електричної на привід компресора, тому є найбільш ефективними. До переваг теплових насосів можна віднести також те, що: немає проблем з придбанням палива, транспортними витратами, немає штату обслуговуючого персоналу, відсутнє забруднення навколишнього середовища, не потрібні значні землевідводи під територію котельні, вони практично безшумні в роботі, вибухо- та пожежобезпечні. Також теплові насоси довговічні, адже термін експлуатації ґрунтового зонда може досягати 100 років, необхідна лише заміна компресора по закінченню терміну служби (15 років). Порівняння коефіцієнтів використання палива для теплового насоса, а саме водойм, ґрунту, повітря, дає змогу оцінити ефективність використання кожного. Досить високу ефективність можна отримати з ґрунту, при цьому коефіцієнт COP (коефіцієнт перетворення теплової енергії) може сягати 4,2, залежно від різниці температур між низькопотенціальним джерелом тепла і температурою теплопостачання. Тобто з одиниці електричної енергії буде отримано до 4,2 одиниць теплової енергії. Тому важливим кроком в створенні енергоефективної біогазової установки буде застосування теплових насосів у термостабілізації процесу ферментації.

Система підігрівання субстрату з допомогою теплового насоса ти-

пу «вода–вода» полягає у застосуванні енергоефективних рішень, а саме зонда [45, 46]. Шляхом рекуперації тепла відпрацьованого шламу відбувається перша ступінь підігрівання свіжого субстрату, за якою йде друга ступінь підігрівання за допомогою теплового насоса типу «вода–вода». Відбір тепла при цьому здійснюється від відпрацьованого шламу після теплообмінника. Таке конструктивне вирішення процесу теплообміну в результаті дає коефіцієнт перетворення теплового насоса (COP) вищий 5.

Для термостабілізації процесу ферментації біомаси тепло доцільно використовувати в якості низькопотенціального джерела енергії ґрунт. В роботах [46, 47] пропонується для підвищення енергоефективності термостабілізації процесу ферментації біомаси комбіноване використання теплового насоса та сонячного колектора. За допомогою сонячного колектора здійснюється перетворення сонячної енергії в теплову, яка циркулює по замкненому контуру з використанням насоса і передається до теплообмінника. Тепловий насос споживає низькопотенціальну енергію ґрунту. У ґрунті розташовані технологічні свердловини, у які закладено трубопроводи з теплоносієм. Випарник та конденсатор теплового насоса перетворюють низькопотенціальну енергію у теплову, яка потрапляє по трубопроводах до теплообмінника. Далі тепла енергії з теплообмінника потрапляє до технологічного рукава, який знаходиться навколо біореактора та підігріває біомасу. Таким чином загальна енергоефективність, тобто ККД, біогазової установки підвищується. Недоліком є відсутність рекуперації відновлюваної теплової енергії біогазу та відпрацьованого шламу.

Отримання біогазу з процесу анаеробного бродіння за рахунок нагріву субстрату, що забезпечується тепловою енергією з теплообмінника, яка виробляється в тепловому насосі та сонячному колекторі розглянуто в роботах [43, 45]. Головна ідея використання альтернативних джерел енергії полягає у генерації тепла в денний час у сонячному колекторі за рахунок сонця і акумулювання її в бак акумулятор. Коли використання сонячного колектора стає невиконаним, то процес генерації тепла продовжується в тепловому насосі за рахунок зміни напрямку руху теплоносія за допомогою запірно-регулювальної армату-



ри, переважно в нічний час. При цьому в якості джерела первинної енергії для теплового насоса може бути використана теплота ґрунту тощо.

Згадування про використання різних джерел низькопотенціальної енергії можна зустріти у роботах [35, 48–50]. В них представлено порівняння енергетичної ефективності різних джерел тепла та їх орієнтовних споживачів (табл. 1.1). Найвигіднішими з них виявляються варіанти відбору тепла з водойм та зворотної води технологічних процесів. Отриманий коефіцієнт перетворення теплового насоса в такому разі може сягати 4–4,5 залежно від різниці температур низькопотенціального джерела тепла та споживача.

Забезпечення термостабілізації процесу ферментації біомаси в біореакторі потребує оптимальної температури в залежності від вибраного режиму: кріофільного 20 °С, мезофільного 32–33 °С, термофільного 52–54 °С. Тобто, при виборі температури мезофільного процесу анаеробного бродіння та відбору тепла водойм з температурою 5–15 °С коефіцієнт перетворення буде більший за 4,5 і навпаки меншим за 4,5 при виборі термофільного процесу (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Енергетична ефективність теплових насосів

Джерело низькопотенціальної енергії	Зворотна вода (15–25 °С)	Водойма (5–15 °С)	Стічні води (25–30 °С)	Відпрацьоване повітря (20–30 °С)	Атмосферне повітря
Температура отримана в тепловому насосі		(40–50 °С)	(25–31 °С)	(30–40 °С)	(20–25 °)
Коефіцієнт перетворення	4,0–4,2	4,2–4,5	4,5–5,0	3,1–3,3	3,5–3,7

Структурну схему використання низькопотенціальної теплової енергії ґрунту та природної води для підвищення енергоефективності біоконверсії шляхом зменшення затрат на термостабілізацію процесу ферментації біомаси наведено на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Структурна схема використання низько потенціальної теплової енергії ґрунту та природної води

#### **1.4 Використання тепла масиву полігону твердих побутових відходів для термостабілізації та інтенсифікації процесу ферментації субстрату в біореакторі**

Теплота масиву полігону твердих побутових відходів може бути використана як для прямого підігрівання біомаси всередині біореактора, так і для непрямого впливу на цей процес, наприклад, для забезпечення роботи теплового насоса, який постачає теплову енергію на підігрівання біореактора. Застосування такої системи запропоновано в конструкції біореактора авторів (рис. 1.4) [51]. Техніко-економічні переваги такого технічного вирішення полягають в тому, що при використанні системи утилізації біогазу та тепла масиву полігону твердих побутових відходів зникають витрати на проведення додаткових бурильних робіт зі збору та вилученню біогазу та тепла масиву, а також підвищується рентабельність процесу.

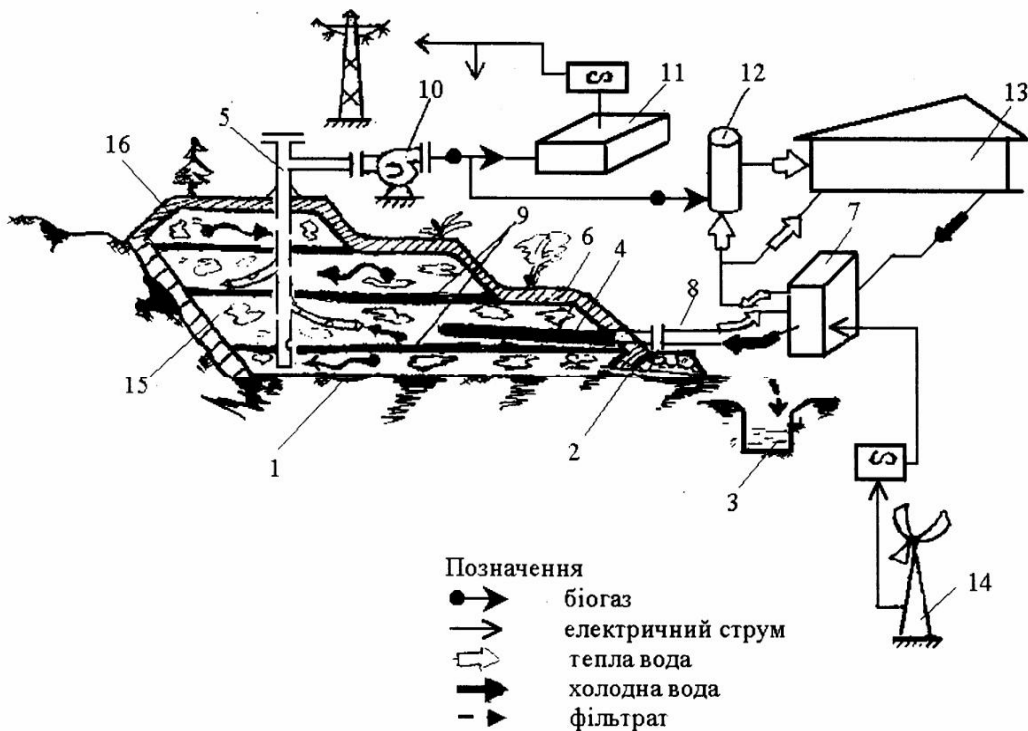


Рисунок 1.4 – Спосіб використання тепла твердих побутових відходів

Спосіб реалізують таким чином. На вибраній під будівництво полігону ТПВ ділянці на рельєфі з нахилом 7 % проводять геологічні та гідрогеологічні пошукові роботи: досліджують порядок напластування, потужність та склад порід в основі полігону, а також визначають рівень залягання ґрунтових вод. Визначають коефіцієнт фільтрації ( $k$ ) ґрунтів в основі полігону та приступають до формування базової гідронепроникної підстилки 1 (екрану). При  $k$  більше 0,00864 м/добу створюють водостійку основу, наприклад, з поліетиленової плівки товщиною 2 мм покладеної на вирівняний шар піску. Потім над плівкою по гравійній підстилці вздовж основи полігону з уклоном прокладають дренажні перфоровані труби 2 діаметром 200–300 мм. Труби покривають шаром ґрунту та з'єднують з фільтратозбірником 3, звідки шкідливий фільтрат в подальшому відкачують на утилізацію або повторно подають в масив полігону. На сформовану базову водостійку підстилку складують тверді побутові відходи, ущільнюючи їх механізмами. Ущільнення відходів зменшує їх об'єм в 3–4 рази та покращує експлуатацію полігону. При досягненні першого прошарку 4 відходів

висоти 2 м на їх поверхні прокладають горизонтальну систему дегазаційних труб та бурять свердловини 5 або шурфи-колодязі для відводу біогазу. Свердловини 5 та шурфи-колодязі в міру підсилення відходів нарощують. Одночасно на цьому рівні закладають систему збору низькопотенціального тепла масиву полігону твердих побутових відходів, для чого використовують тепловий насос. Така система є ефективною для утилізації тепла та дозволяє отримати 2,5–3,5 кВт корисного тепла на 1кВт затраченої електроенергії, що необхідна для роботи теплового насоса 5. Система збору тепла представляє собою ділянку полігону з прокладеними в масиві ГПВ реєстрами труб 6 теплообмінника та включає такі основні елементи:

- насос 7 для вимушеної циркуляції теплоносія в теплообміннику;
- ділянку теплотраси 8, яка з'єднує систему теплотбору з випарувачем теплового насоса.

В якості теплоносія використовують нетоксичний антифриз. Контроль за температурою, тиском, швидкістю руху теплоносія здійснюють на виході та вході системи збору тепла масиву. Реєстри 6 труб теплообмінника з'єднують в послідовно-паралельні групи та передбачають можливість їх автономної роботи. Таке виконання реєстрів труб 6 дає також можливість експлуатувати також одночасно одну групу модулів теплообмінника в режимі тепlopостачання, а іншу – в режимі холодopостачання. Після закладання дегазаційних труб та реєстрів труб 6 теплообмінника на них досипають шар відходів до досягнення проектної висоти – 2,5 м та здійснюють поверхневу ізоляцію першого прошарку 9. Для ізоляції використовують глину, яку укладають на висоту 0,2 м та утрамбовують. На цій стадії робіт в масиві відходів бурять також дегазаційну свердловину 5, гирло якої підключають до витяжного вентилятора 10. На поверхні поза площею складування відходів влаштовують також тепловий насос 7 та відповідні комунікації для утилізації енергії масиву складування.

Технологічну лінію дегазації масиву під'єднують до блока 11 силової установки. Біогаз подають компресором на спалювання і при витраті біогазу, наприклад, 120 м<sup>3</sup>/год, установка вироблятиме протягом експлуатації полігону 15–20 років до 1 млн кВт електроенергії. Частину газу спалюють у водогрійному котлі 12, отримуючи теплу воду, яку подають, наприклад, у теплицю 13. Технологічну лінію використання тепла масиву підключають до теплового насоса 7. Тепло

передається скраплювачем до споживача тепла – теплиці 13. В процесі скраплювання теплоносії відбирає тепло із джерела – масиву твердих побутових відходів. Для роботи теплового насоса 7 необхідну енергію для споживання отримують від електричного газогенератора, що працює на біогазі, який отримують при дегазації полігону. Одночасно для електричного живлення теплового насоса підключають вітровий генератор 14 електричного струму, роботу якого корегують із роботою контейнерної електростанції, що працює на біогазі. В залежності від потреб споживача тепловий насос 7 переводять також в режим роботи холодопостачання. Наприклад, коли влітку теплиці 13 використовують як овочесховища, їх приміщення служать для насоса 7 джерелом тепла.

Після завершення формування першого прошарку 4 відходів приступають до складування наступного ярусу 15. Операції формування полігону повторюють. При досягненні відходами проектної висоти складування приступають до завершальних етапів робіт, що передбачають рекультивацію території з її екологічним окультуренням. Для цього на поверхні масиву створюють газогідронепроникний настил 4 із шару утрамбованої глини висотою 0,5 м. Поверх насипають родючий шар ґрунту.

## **1.5 Особливості утилізації низькопотенціальних теплових вторинних ресурсів в системах інтенсифікації біоконверсії**

### **1.5.1 Утилізація теплових викидів агропромислових та сільськогосподарських підприємств**

Щоб тепла енергія відходів агропромислових та сільськогосподарських господарств не втрачалась необхідно використовувати її для отримання біогазу в біореаторах. Тому для утилізації теплових викидів агропромислового та сільськогосподарського виробництва необхідно спочатку створити і впровадити ефективний технологічний спосіб анаеробного перероблення сільськогосподарських відходів з урахуванням специфічної тривалості циклу бродіння окремих компонентів. Анаеробна переробка органічних відходів тваринництва, рослинництва фермерських та переробних підприємств в біогаз і добрива дає найбільший вихід біогазу. Приблизні значення виходу біогазу при використанні різних відходів наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Вихід біогазу і вміст у ньому метану при використанні різних видів відходів

Вихідна сировина	Вихід біогазу на 1кг сухої речовини, л/кг	Вміст метану (CH <sub>4</sub> ), %
Гній великої рогатої худоби	200 - 300	50
Гній свинячий	340 – 480	60–75
Кінський гній із соломою	250	56–60
Бадилля картопляне	420	60
Стебла кукурудзи	420	53
Солома пшенична	342	58
Лузга соняшникова	300	60
Силос	250	84
Трава свіжа	360	52
Буряк	430	84
Відходи моркви	250	60
Тирса деревини	220	51
Твердий осад стічних вод	570	70
Фекальний осад	250 – 310	60
Домашні відходи і сміття	600	50

При утилізації сільськогосподарських відходів необхідно враховувати низку факторів. Оскільки різні відходи мають свій хімічний склад, то тривалість циклу бродіння у них різна. Це може бути причиною неповного зброджування окремих компонентів. Запропоновано біогазову установку з врахуванням специфічної тривалості бродіння окремих компонентів [52]. На рис. 1.5 показано конструктивний варіант біореактора, який використовує органічні відходи різного хімічного складу.

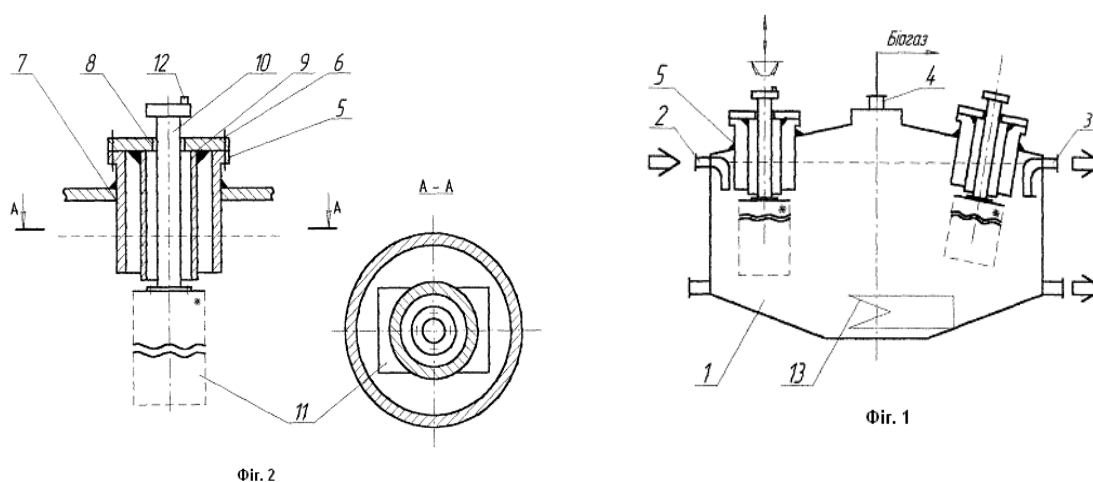


Рисунок 1.5 – Біореактор біогазової установки

Реактор 1 через завантажувальний пристрій 2 заповнюється рідкими органічними відходами або рідкою фракцією з анаеробними бактеріями. Проникні знімні контейнери 11 завантажуються порізно відходами, головним чином, твердими, які попередньо згруповані за природною, фізико-хімічною однорідністю і однаковою технологічною тривалістю циклу зброджування.

Контейнер 11 з'єднується з валом 10, який проходить через отвір 8 кришки 6 всередині трубчастого елемента 9, що щільно з'єднаний з кришкою 6. Зібраний вузол розміщується через люк 5 у патрубку гідрозатвора 7, при цьому контейнер 11 занурений в рідину реактора 1. Люк 5 закривається герметично кришкою 6, вал 10 з'єднується з приводом обертання 12. Рідка і активна біомаса проникає до компонентів в контейнерах 11 і засіває їх анаеробами та зволожує, що прискорює процеси біодеструкції і бродіння. Субстрати всіх відходів, що знаходяться в реакторі 1 та в контейнерах 11, зброджуються. Біогаз, що утворюється, накопичується і через патрубок для виходу газу 4 відводиться та використовується споживачем. Періодично, згідно з технологічним регламентом, завдяки приводу обертання 12 контейнери 11, що виконані у формі паралелепіпеду, обертаються і перемішують зброджувану масу рідини в реакторі 1, поліпшуючи масо-, тепло-, газообмінні процеси метаболізму і метангенерації.

Тривалість перебування кожного контейнера з відходами в реакторі не перевищує технологічного циклу бродіння окремих відходів. Після завершення терміну «повного» зброджування цього виду відходів проводиться виймання відповідного контейнера 11 та нове завантаження його свіжим субстратом і розташування у патрубку гідрозатвора 7. Періодична заміна контейнерів проводиться без призупинення роботи реактора. Рідка біомаса зливається через вивантажувальний пристрій 3. Зброджуванні відходи використовуються як високоякісне біодобриво. Для інтенсифікації анаеробного бродіння в реакторі 1 завдяки теплообміннику 13 можливе підігрівання субстратів до заданого температурного режиму зброджування.

Локалізація твердих включень у контейнерах знижує можливість утворення кірки, засолення і перерв в роботі, підвищуючи технологічну надійність установки в цілому. Зростання загального виходу біога-

зу досягається за рахунок покращення масообмінних процесів і умов життєдіяльності бактерій, оптимізації використання газового потенціалу органічного субстрату, а також більш раціонального використання робочого об'єму реактора шляхом періодичної завантаження контейнерів свіжим матеріалом.

Іншим способом утилізації теплових сільськогосподарських викидів може бути відбір теплової енергії відходів з допомогою теплового насоса, контур якого буде безпосередньо контактувати з ними.

### **1.5.2 Утилізація теплових викидів систем біоконверсії**

В системах біоконверсії утилізація тепла може значно підвищити енергоефективність біогазової установки в цілому. Можна здійснювати рециркуляцію теплової енергії, встановивши теплообмінники для відбору теплової енергії від утвореного біогазу і відпрацьованої біомаси та повертати її для підігрівання суміші біомаси всередині біореактора.

Установку утилізації теплових викидів системи біоконверсії наведено на рис. 1.6 [53].

Ця установка працює таким чином. Свіжий субстрат завантажується з приймальної посудини 9 у змішувач 2 насосом, де він змішується із рідкою фракцією, що надходить з розділювача зброженого субстрату 3 під дією насоса рециркуляції рідкої фракції 10, та водою, яка надходить із бака-акумулятора гарячої води 6. Підготовлений у змішувачі 2 субстрат завантажується в біореактор 1. Вода, що нагрівається у теплогенераторі 8, який працює на органічних відходах та зброженому субстраті, циркулює через зовнішню порожнину змішувача 2, теплообмінник 35 біореактора 5 та змішувач бака-акумулятора 6 під дією циркуляційного насоса 7. Зброжений субстрат відводиться у розділювач 3, звідки відділена рідка фракція за допомогою насоса рециркуляції 10 повертається в змішувач.

Згущений субстрат відводиться у внутрішню порожнину теплоутилізатора 11 для нагрівання свіжої води, що подається трубопроводом 13 під дією насоса. Отриманий біогаз за допомогою компресора 14 подається у газгольдер 15 через гідрозатвор 4, осушувач отримано-



го біогазу 12, який охолоджується свіжою водою з трубопроводу 13, та фільтр для очищення від сірководню 17. Частина біогазу іде на абсорбційну холодильну машину 16, що виробляє теплову енергію та холод. Свіжа вода після теплоутилізатора 11 підігрівається в теплообміннику абсорбційної холодильної машини 16 і подається в бак-акумулятор гарячої води 6. Частина зброженого субстрату з теплоутилізатора 11 відводиться для спалювання в теплогенераторі 8.

Використання запропонованої біогазової установки сприяє зменшенню витрат електроенергії у літній період та техногенного навантаження на навколишнє середовище від спалювання надлишків біогазу, а також підвищенню енергетичної ефективності установки за рахунок утилізації надлишків.

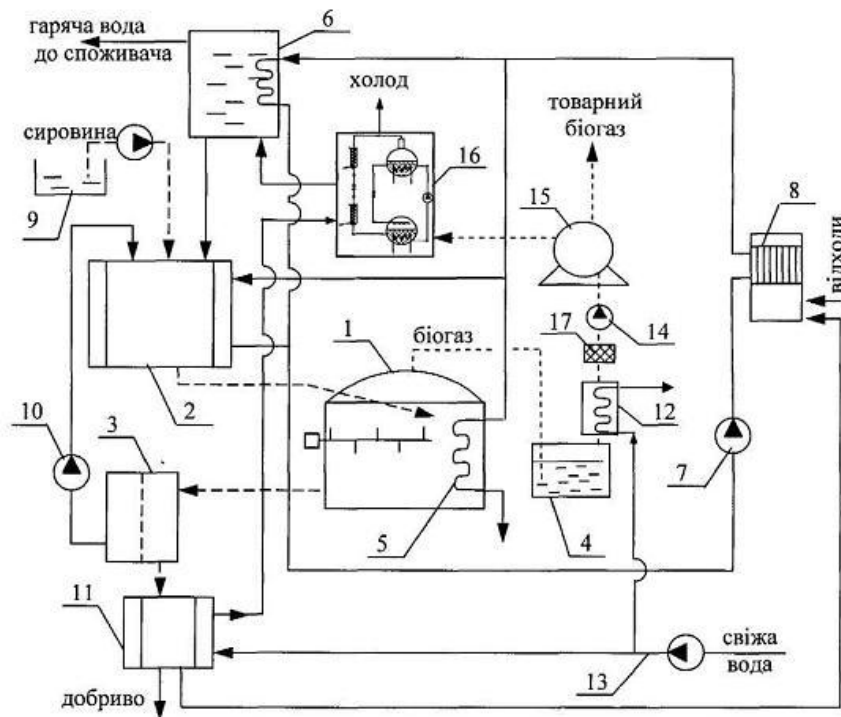


Рисунок 1.6 – Установка для виробництва енергоносіїв з органічних відходів

Утилізація тепла біогазу і шламу розглядається в роботі [34], де в установці за рахунок введення двох теплообмінних контурів пропонується збільшити енергоефективність анаеробного бродіння субстрату.

Біогазова установка з системою утилізації тепла працює таким чином (рис. 1.7). В середині метантенка 1 субстрат перемішується за допомогою турбінної мішалки 4, з механічним приводом 6. Субстрат рі-

вномірно підігрівається завдяки спіралеподібному змійовику 5, в якому проходить теплоносії. Біогазова суміш, отримана в результаті процесу зброджування, надходить через штуцер відведення біогазу 7 до системи газопостачання споживача через тепловий насос 8. Відпрацьована порція біомаси через отвір для відвантаження 3 видаляється з метантенка. При запуску метантенка теплоносії нагрівається в пусковому теплогенераторі 16. Робота біогазової установки характеризується стабільним виходом біогазу, який надходить з метантенка з температурою, що дорівнює температурному режиму зброджування (35–45 °С).

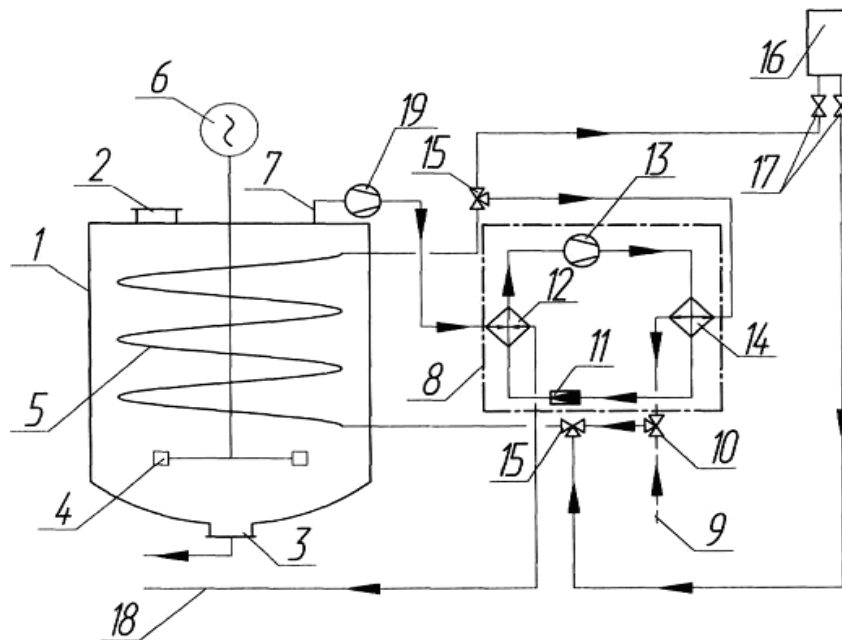


Рисунок 1.7 – Біогазова установка з системою утилізації тепла

В результаті застосування теплового насоса 8 біогаз за допомогою компресора 13 надходить по газопроводу, проходить через випарник теплового насоса 12, де віддає свою теплоту холодоагенту. Охолоджений у випарнику 12 біогаз надходить до системи 18 газопостачання споживача. Після випарника холодоагент надходить в компресор 13 теплового насоса, а далі – в конденсатор 14, де віддає теплоту високопотенційному теплоносію, що подається в спіралеподібний змійовик 5, для підігрівання зброджуваної маси. Охолоджений холодоагент надходить через дросель 11 теплового насоса 8 у випарник 12, цикл по-

вторюється. Для початкового пуску метантенка та скорочення часу початку зброджування для підігрівання високопотенційного теплоносія використовується теплогенератор 16, що використовує традиційне органічне паливо. Підживлення гріючого теплоносія виконується із водопроводу 9. Переключення джерела тепlopостачання здійснюється за допомогою триходових кранів 10 та 15. Наявність теплового насоса у біогазовій установці, що використовує біогаз для підігрівання теплоносія, дозволить максимально утилізувати теплоту отриманого біогазу, який є низькотемпературним джерелом теплоти. Також це дозволяє заощадити ресурси, які використовувались для нагріву теплоносія в теплогенераторі. Використання теплового насоса у біогазовій установці, що утилізує теплоту отриманого біогазу, дозволяє за рахунок зменшення використання паливно-енергетичних ресурсів зменшити обсяг шкідливих викидів в приземний шар атмосфери.

В конструктивно-технологічній схемі (рис. 1.8) використано теплообмінники, що забирають теплоту відпрацьованого субстрату та

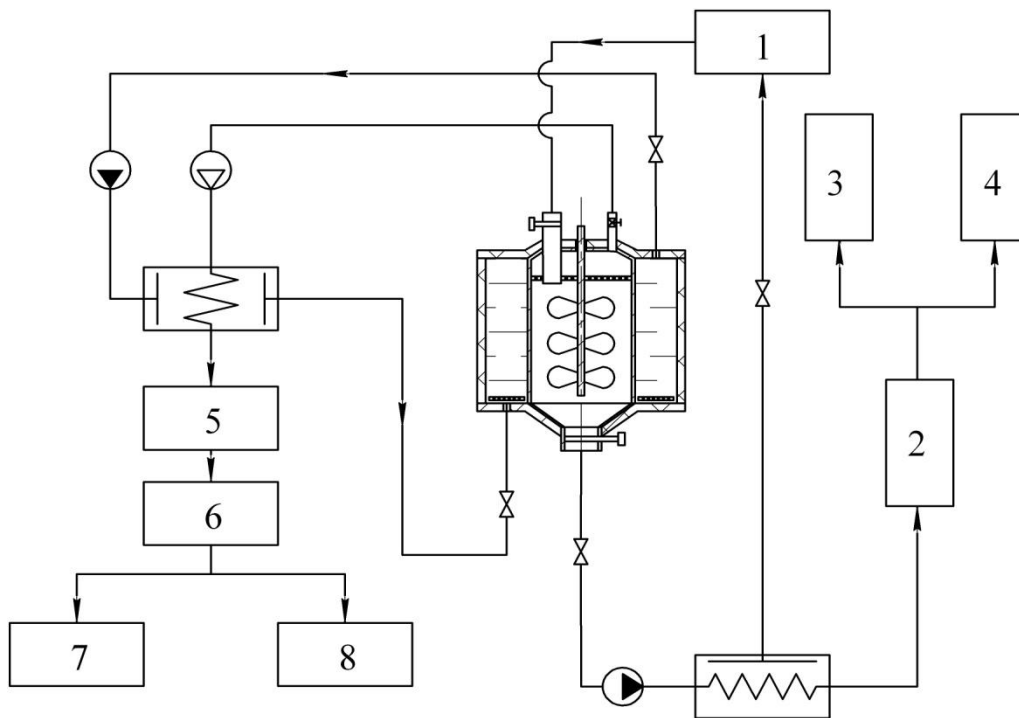


Рисунок 1.8 – Конструктивно-технологічна схема біогазової установки з двома теплообмінними контурами та гідравлічною нагрівальною сорочкою

утвореного біогазу в результаті анаеробного бродіння органічної маси, а також направляють її на повторне використання в процесі біоко-

нверсії. Як нагрівач використано нагрівальну сорочку з перфорацією. Інтенсифікація процесу досягається вертикальним лопатевим перемішуванням. Теплообмінники дозволяють повторно використовувати теплоту, яка виділяється із продуктами біоконверсії.

В результаті процесу анаеробного бродіння відпрацьований субстрат перекачується за допомогою фекального насоса через теплообмінник, в якому відібрана теплота передається в блок підготовки біомаси 1 та надходить до блока сепарації субстрату 2. В цьому блоці субстрат розділяється на фази та надходить відповідно у склад рідкого добрива 3 та склад твердого добрива 4. Утворений в результаті анаеробного бродіння біогаз за допомогою компресора проходить через теплообмінник, віддаючи теплоту на потреби нагрівальної сорочки біогазової установки, і надходить у газгольдер 6 після очищення в блоці очищення біогазу 5. Згодом частина біогазу витрачається на потреби біогазової установки 7, а основна – на потреби споживача 8.

## РОЗДІЛ 2

### ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ КОНСТРУКТОРСЬКО- ТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ БІОМАСИ

#### 2.1 Біогазові установки з використанням низькопотенціальної теплової енергії технологічного процесу біоконверсії

Інтенсивність ферментації визначається суттєво температурними режимами та потребує затрат додаткової енергії, що може призвести до зниження рентабельності біоконверсії. Тому важливим заходом є використання енергоефективних методів та устаткування для підтримання оптимального теплового режиму в біоконверсії [12, 3, 14]. Дослідженнями [49–52, 54] встановлено доцільність підігріву субстрату за допомогою теплообмінників, які використовують альтернативні відновлювані джерела теплової енергії, в тому числі технологічного процесу біоконверсії або інших технологічних процесів агропромислового комплексу.

На рис. 2.1 зображено загальну конструктивно-технологічну схему біогазової установки, що містить теплообмінник для утилізації низькопотенціальної теплової енергії з метою термостабілізації та інтенсифікації процесу ферментації субстрату [55].

Установка містить резервуар 1, який зверху накритий утеплювачем 2. Всередині резервуара 1 встановлено гідромеханічний розкручувач потоку субстрату 16. У верхній частині резервуара 1 вмонтовано захисну газорозподільну решітку 3, а також бункер завантаження 6 із шиберною засувкою 7 та трубою споживача біогазу 4 з краном 5. В нижній частині резервуара 1 розташовано отвір для видалення відпрацьованого субстрату, який закрито кришкою 15 із шиберною засувкою 14. До резервуара 1 підведено трубопровід транспортування субстрату 12 із краном 11, 18, 19, теплообмінником 8 та циркуляційним насосом 10, що з'єднані послідовно, а також трубопровід відведення шламу 13 із краном 20, 21, циркуляційним насосом 10, що з'єднані послідовно. Трубопровід подачі теплової енергії від відновлюваного джерела 9

з'єднаний з теплообмінником 8.

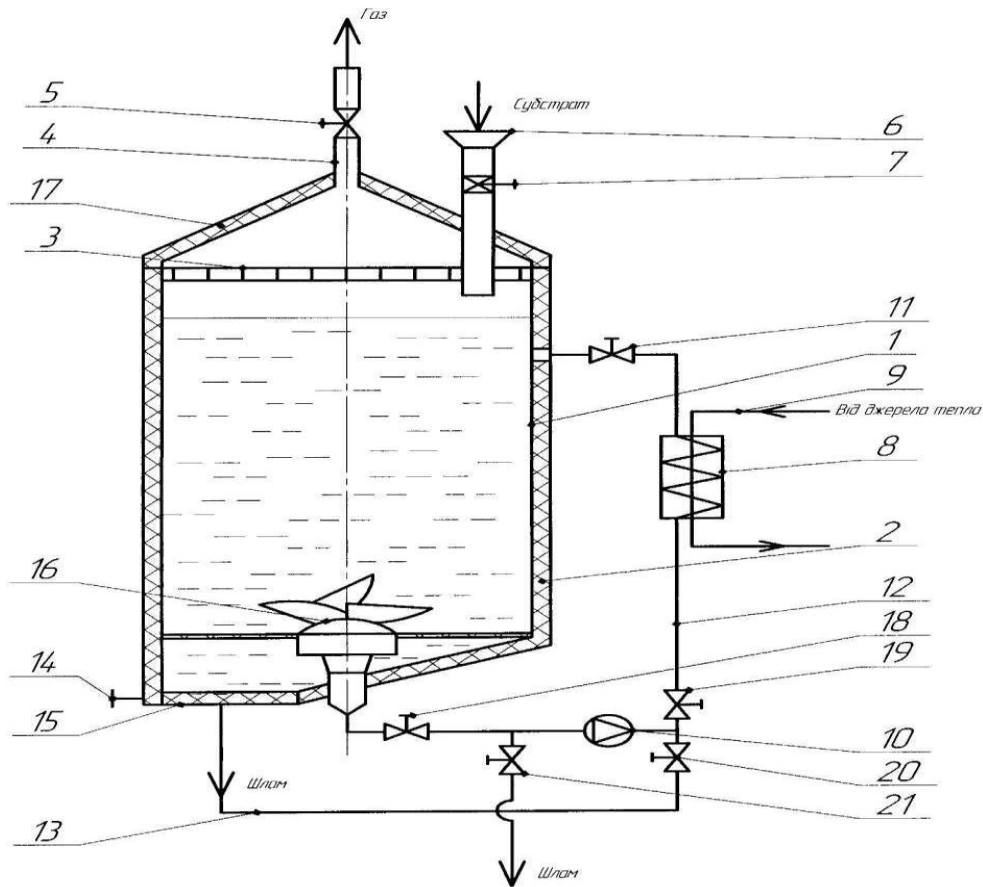


Рисунок 2.1 – Біогазова установка з теплообмінним контуром для забезпечення термостабілізації ферментації субстрату з використанням відновлюваних джерел низькопотенціальної теплової енергії

Установка працює таким чином.

Субстрат через бункер завантаження 6 при відкритій шибєрній засувці 7 надходить до резервуара 1, який вкритий утеплювачем 2. Із резервуара 1 субстрат переміщується трубопроводом транспортування субстрату 12 за допомогою циркуляційного насоса 10 через теплообмінник 8, до якого надходить тепла енергія трубопроводом подачі теплової енергії 9. Підігрітий субстрат надходить в нижню частину резервуара до гідромеханічного розкручувача потоку субстрату 16. При перемішуванні субстрату гідромеханічним розкручувачем потоку субстрату 16 створюється рівномірне температурне середовище, зменшується седиментація твердих частинок в нижній частині резервуара та руйнування кірки в верхній частині резервуара. Відпрацьований

субстрат відводиться трубопроводом відведення шламу 13 за допомогою циркуляційного насоса 10. Функції циркуляційного насоса 10 по переміщенню субстрату змінюються перекриттям кранів 11 для відведення шламу або перекачування субстрату. Утворений біогаз, переміщуючись крізь захисну газорозподільну решітку 3, надходить до труби споживача 4, при регулюванні краном 5.

На рис. 2.2 показано загальну конструктивно-технологічну схему біогазової установки з теплообмінним контуром для підігрівання субстрату та термостабілізації анаеробного бродіння субстрату шляхом підключенням електричного кабельного елемента [57].

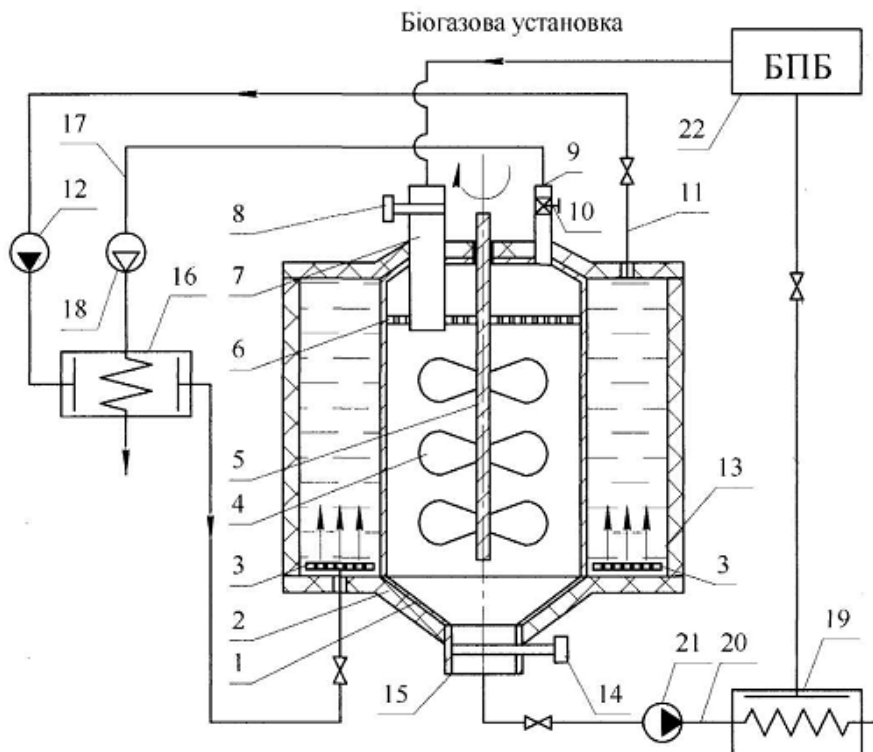


Рисунок 2.2 – Біогазова установка з використанням низькопотенціальної теплової енергії технологічного процесу біоконверсії для забезпечення термостабілізації анаеробного бродіння в біогазовому реакторі

Установка містить резервуар 1, всередині якого на пустотілому валу 5 встановлено вертикальну пропелерну мішалку 4. У верхній частині резервуара 1 над захисною газорозподільною решіткою 6 розміщено бункер завантаження біомаси 7 із першою шиберною засувкою 8, а також трубу споживача 9 із краном 10. У нижній частині резервуара 1 розташовано отвір 15 для видалення відпрацьованого субстрату із другою шиберною засувкою 14. Резервуар 1 обгорнуто на-

грівальною сорочкою 13, яку вкрито утеплювачем 2. Нагрівальна сорочка 13, до якої під'єднано трубопровід рециркуляції рідини 11 із насосом 12, оснащена перфорацією 3. До труби споживача 9 приєднано газопровід 17, на якому розміщено компресор 18 та теплообмінник 16, який з'єднано із трубопроводом рециркуляції рідини 11. Отвір 15 для видалення відпрацьованого субстрату з'єднано із теплообмінником 19 через фекальний насос 21, а також із блоком підготовки біомаси 22 та бункером завантаження біомаси 7.

Установка працює таким чином.

Субстрат надходить до резервуара 1 через бункер завантаження біомаси 7, коли відкрито першу шиберну засувку 8. В середині резервуара 1 вертикальна пропелерна мішалка 4, що розміщена на пустотілому валу 5, переміщує субстрат. По завершенню процесу анаеробного бродіння органічна маса видаляється через отвір 15 для видалення відпрацьованого субстрату при відкритій другій шиберній засувці 14. Утворений в результаті бродіння біогаз піднімається у верхню частину резервуара 1 крізь захисну газорозподільну решітку 6 та при відкритому крані 10 надходить до труби споживача 9. Резервуар 1 обгорнуто нагрівальною сорочкою 13, заповненою рідиною, яка рухається по трубопроводу циркуляції рідини 11 за допомогою насоса 12. Рідина проходить крізь стиснені перфорацією 3 отвори та нагрівається силами тертя. Внаслідок цього нагрівальна сорочка 13, що вкрито утеплювачем 2, передає теплоту субстрату всередині резервуара 1, нагріваючи його рівномірно по всьому об'єму.

В результаті введення першого теплообмінного контуру біогаз, рухаючись по газопроводу 17 за допомогою компресора 18, проходить через теплообмінник 16 та віддає йому теплоту. Ця теплота за допомогою теплообмінника 16 надається рідині, що рухається по трубопроводу рециркуляції рідини 11 за допомогою насоса 12. Після завершення процесу бродіння органічна маса по трубопроводу відпрацьованого субстрату 20 рухається з використанням фекального насоса 21 до теплообмінника 19 другого теплообмінного контуру. Теплота відпрацьованого субстрату подається в блок підготовки біомаси 22, яка потім надходить до резервуара 1 біогазової установки через бункер завантаження біомаси 7.



В результаті створення біогазової установки із двома теплообмінними контурами досягається енергоефективність процесу біоконверсії за рахунок утилізації теплоти вихідних речовин бродіння.

На рис. 2.3 показано загальну конструктивно-технологічну схему біогазової установки з використанням низькопотенціальної теплової енергії біоконверсії з двома теплообмінними контурами для нагрівання біомаси в блоці підготовки субстрату [56].

Установка містить резервуар 1, який зверху накритий утеплювачем 2. В середині резервуара 1 на пустотілому валу 4 розміщено вертикальну пропелерну мішалку 3. У верхній частині резервуара 1 вмонтовано бункер завантаження 7 з першою шиберною засувкою 8 та захисною газорозподільною решіткою 11, а також трубу споживача біогазу 9 із краном 10. Між резервуаром 1 та утеплювачем 2 біогазова установка обмотана електричним нагрівальним кабелем 5 із терморегулятором 6. В нижній частині резервуара 1 міститься отвір 14 для видалення відпрацьованого субстрату із другою шиберною засувкою 13. До труби споживача біогазу 9 приєднано газопровід 17, на якому розміщено компресор 16 та теплообмінник 18, який поєднано із блоком підготовки біомаси 20. Отвір 14 для видалення відпрацьованого субстрату з'єднано із теплообмінником 19 через фекальний насос 12, а також із блоком підготовки біомаси 20, який з'єднано з бункером завантаження біомаси 7 через насос 21.

Установка працює таким чином.

При відчиненій першій шиберній засувці 8 через бункер завантаження 7 субстрат надходить до резервуара 1, який накритий утеплювачем 2 для зменшення виходу теплоти в навколишнє середовище. В середині резервуара 1 субстрат перемішується за допомогою вертикальної пропелерної мішалки 3, що розміщена на пустотілому валу 4, а також рівномірно підігрівається завдяки електричному нагрівальному кабелю 5, параметри якого регулюються терморегулятором 6. Біогазова суміш, утворена внаслідок процесу бродіння, надходить через захисну газорозподільну решітку 11 до труби споживача 9 та регулюється краном 10. Відпрацьований субстрат видаляється із біогазової установки через отвір для видалення відпрацьованого субстрату 14 із другою шиберною засувкою 13. В результаті введення першого теплообмінного

контуру біогаз, рухаючись по газопроводу 17 за допомогою компресора 16, проходить через теплообмінник 18 та віддає йому теплоту. Після завершення процесу бродіння органічна маса по трубопроводу відпрацьованого субстрату 15, рухається з використанням фекального насоса 12 до теплообмінника 19 другого теплообмінного контуру. Теплота відпрацьованого субстрату та біогазу подається в блок підготовки біомаси 20, яка потім надходить до резервуара 1 біогазової установки через бункер завантаження біомаси 7 за допомогою насоса 21.

В результаті створення біогазової установки із двома теплообмінними контурами збільшується енергоефективність анаеробного бродіння субстрату, що підвищує економічну ефективність процесу виробництва біогазу.

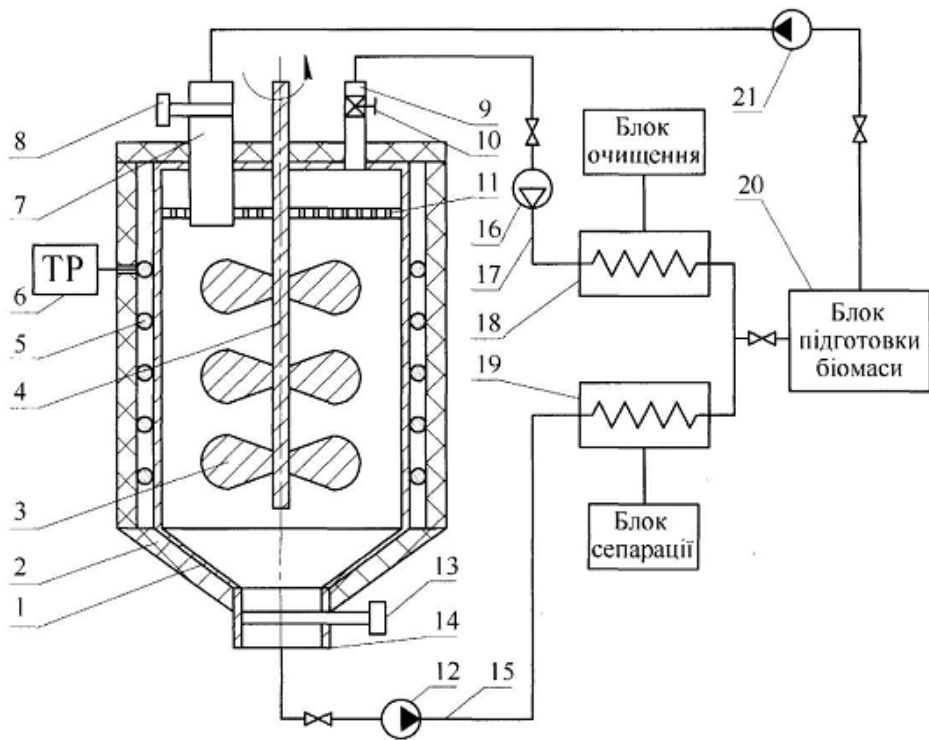


Рисунок 2.3 – Біогазова установка з використанням низькопотенціальної теплової енергії технологічного процесу біоконверсії з теплообмінним контуром для нагрівання біомаси в блоці підготовки субстрату

## 2.2. Біогазові установка з використанням відновлюваної сонячної енергії за допомогою сонячних колекторів та батарей

Один із шляхів підвищення енергоефективності біоконверсії є зменшення тепловтрат через стінки біореактора [22]. Для забезпечення енергоефективності термостабілізації процесу ферментації в біоре-

акторі необхідно забезпечити вирівнювання полів температур по об'єму установки. Дотримання температурних режимів при автоматизованому контролі та управлінні параметрами температурних режимів потребує додаткових затрат теплової та електричної енергії. З цією метою доцільно використовувати відновлювану сонячну енергію за допомогою сонячних теплових колекторів та електричних батарей.

На рис. 2.4 показано загальну конструктивно-технологічну схему біогазової установки з комбінованою системою термостабілізації для підігріву субстрату відновлюваною тепловою енергією від технологічного процесу біоконверсії та сонячним тепловим колектором [58].

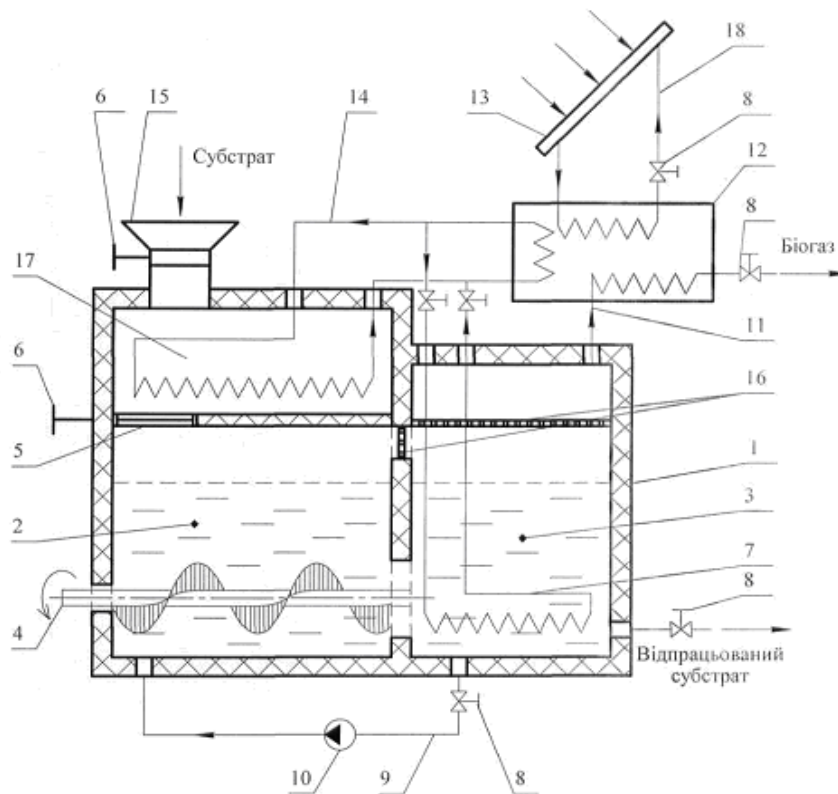


Рисунок 2.4 – Біогазова установка з комбінованою системою теплозабезпечення для підігрівання біомаси, що використовує відновлювану теплову енергію від сонячного колектора та технологічного процесу біоконверсії

Установка містить резервуар 1, який розділений на камеру бродіння 2 та камеру доброжування 3, всередині камери бродіння 2 встановлено горизонтальний шнековий перемішувач 4. У верхній частині резервуара 1 над горизонтальною перегородкою 5, яка містить шиберну засувку 6, розміщено контур догрівання нової порції біомаси 14, який розміщений у камері підігрівання 17 та бункер завантаження біомаси

15 із шиберною засувкою 6. У нижній частині камери доброжування 3 розташовано другий контур підігрівання біомаси 7. В нижній частині камера бродіння 2 та камера доброжування 3 резервуара 1 з'єднані циркуляційним контуром біомаси 9, який містить запірно-регулювальну арматуру 8 та циркуляційний насос 10, а в верхній частині камери доброжування 3 розміщено перфоровані решітки для виходу біогазу 16, при цьому вихід біогазу забезпечений контуром вихідного біогазу 11. Теплообмінник 12 містить контур догрівання нової порції біомаси 14, другий контур підігрівання біомаси 7, теплообмінний контур 18 сонячного колектора 13 та контур вихідного біогазу 11.

Установка працює таким чином.

Субстрат надходить до камери підігрівання 17 резервуара 1 через бункер завантаження біомаси 15 при відкритій шиберній засувці 6 горизонтальної перегородки 5, де здійснюється догрівання біомаси за допомогою контуру догрівання нової порції біомаси 14, після чого при відкритті шиберної засувки 6 біомаса переміщується до камери бродіння 2 резервуара 1, де здійснюється перемішування за допомогою горизонтального шнекового перемішувача 4 і переміщення біомаси до камери доброжування 3. В камері доброжування 3 відбувається підігрівання біомаси за допомогою другого контуру підігрівання біомаси 7 і виділення біогазу, який проходить крізь перфоровані решітки для виходу біогазу 16 і відбирається через контур вихідного біогазу 11, причому надлишки теплової енергії біогазу відбираються в теплообміннику 12. Для попередження утворення кірки на поверхні біомаси здійснюється перемішування за допомогою горизонтального шнекового перемішувача 4 та циркуляція біомаси циркуляційним контуром біомаси 9, який містить циркуляційний насос 10 та запірно-регулювальну арматуру. Теплообмінник 12 здійснює функцію передачі теплової енергії контуру догрівання нової порції біомаси 14 та другому контуру підігрівання біомаси 7. Додаткова теплота отримується шляхом відбору надлишку теплової енергії з контуру вихідного біогазу 11 та теплообмінного контуру 18 сонячного колектора 13, що містить запірно-регулювальну арматуру 8.

На рис. 2.5 показано загальну конструктивно-технологічну схему біогазової установки з сонячним колектором для нагрівання субстрату

та сонячною батареєю для забезпечення електроенергією нагрівального кабелю [59].

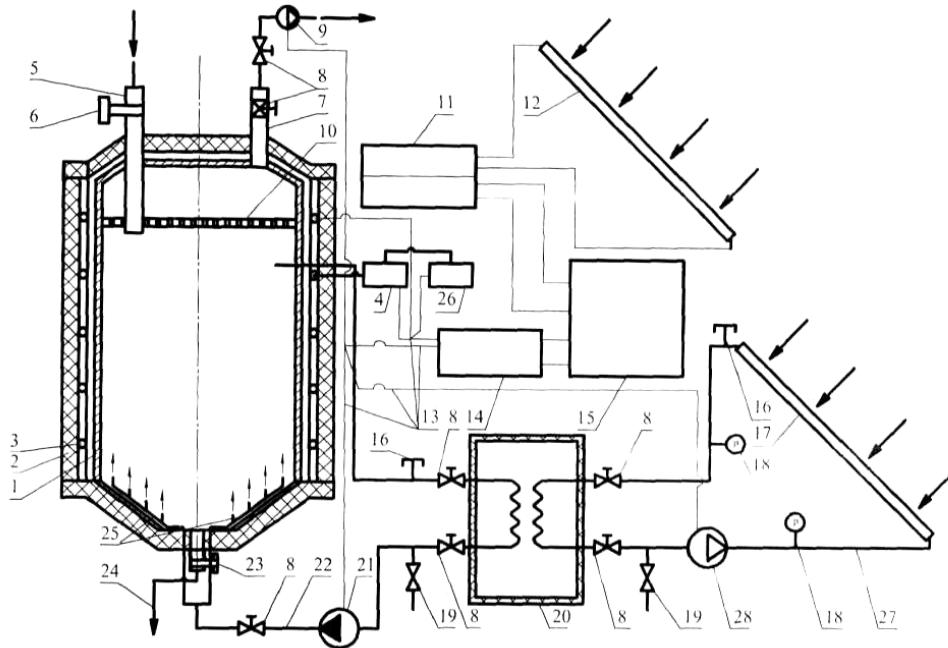


Рисунок 2.5 – Біогазова установка з комбінованою системою теплозабезпечення, яка отримує теплову енергію від сонячного колектора та сонячною батареєю, для забезпечення енергією нагрівальний кабель

Установка містить резервуар 1, який зверху накритий утеплювачем 2. У верхній частині резервуара 1 вмонтовано бункер завантаження біомаси 5 з першою шиберною засувкою 6 та захисною газорозподільною решіткою 10, а також трубу споживача біогазу 7 із запірно-регулювальною арматурою 8. Резервуар 1 обмотано електричним нагрівальним кабелем 3 із терморегулятором 4, який послідовно з'єднаний з блоком управління 26. В нижній частині резервуара 1 знаходяться гідравлічний перемішувач 25 та трубопровід відпрацьованого субстрату 24 з другою шиберною засувкою 23. Трубопровід циркуляції субстрату 22, який містить повітроспускник 16, бак-акумулятор 20, спускник 19, фекальний насос 21. Трубопровід циркуляції теплоносія 27 містить манометр-барометр 18, повітроспускник 16, спускник 19, запірно-регулювальну арматуру 8 та насос 28 служить для перенесення теплової енергії від сонячного колектора 17 до бака-акумулятора 20. Сонячна батарея 12 з'єднана послідовно електричним кабелем 13 з

контролером акумуляторної батареї 11, акумуляторною батареєю 15 та з інвертором електричного струму 14. При цьому інвертор електричного струму 14 з'єднаний з компресором 9, блоком управління 26, терморегулятором 4, електричним нагрівальним кабелем 3, насосом 28 та фекальним насосом 21.

Установка працює таким чином.

Субстрат біомаси подається до резервуара 1, який зверху накритий утеплювачем 2. У верхній частині резервуара 1 вмонтовано бункер завантаження біомаси 5, для подачі нової порції біомаси, перекриття якої забезпечується першою шиберною засувкою 6, а також трубу споживача біогазу 7 для відбирання біогазу із запірно-регулювальною арматурою 8. Резервуар 1 обмотано електричним нагрівальним кабелем 3 із терморегулятором 4, які забезпечують підтримання необхідного температурного режиму бродіння, а блоком управління 26 здійснюється контроль температур через терморегулятор 4. При цьому відбувається вивільнення біогазу, який проходить крізь захисну газорозподільну решітку 10 до труби споживача біогазу 7. В нижній частині резервуара 1 знаходяться гідравлічний перемішувач 25, який здійснює перемішування біомаси у резервуарі 1 при подачі з допомогою фекального насоса 21 трубопроводом циркуляції субстрату 22 біомаси. Також в нижній частині знаходиться трубопровід відпрацьованого субстрату 24 з другою шиберною засувкою 23 для звільнення резервуара 1 від відпрацьованої біомаси. Трубопровід циркуляції субстрату 22 служить для переміщення біомаси через повітроспускник 16, бака-акумулятор 20, спускник 19 та фекальний насос 21 до гідравлічного перемішувача 25. При цьому здійснюється відбір теплової енергії з бака-акумулятора 20, необхідної для підігрівання біомаси в резервуарі 1. Трубопровід циркуляції теплоносія 27, який містить манометр-барометр 18, повітроспускник 16, спускник 19, запірно-регулювальну арматуру 8 та насос 28, служить для перенесення теплової енергії від сонячного колектора 17 до бака-акумулятора 20. Сонячна батарея 12, забезпечує електричним струмом електричний нагрівальний кабель 3. Сонячна батарея з'єднана послідовно електричним кабелем 13 з контролером акумуляторної батареї 11, акумуляторною батареєю 15 та з інвертором електричного струму 14. При цьому інвертор електрично-

го струму 14 забезпечує роботу компресора 9, блока управління 26, терморегулятора 4, електричного нагрівального кабелю 3, насоса 28 та фекального насоса 21 електричним струмом.

На рис. 2.6 показано загальну конструктивно-технологічну схему біогазової установки з сонячною батареєю для забезпечення електроенергією нагрівального електрокабеля управління технологічним процесом біоконверсії [60].

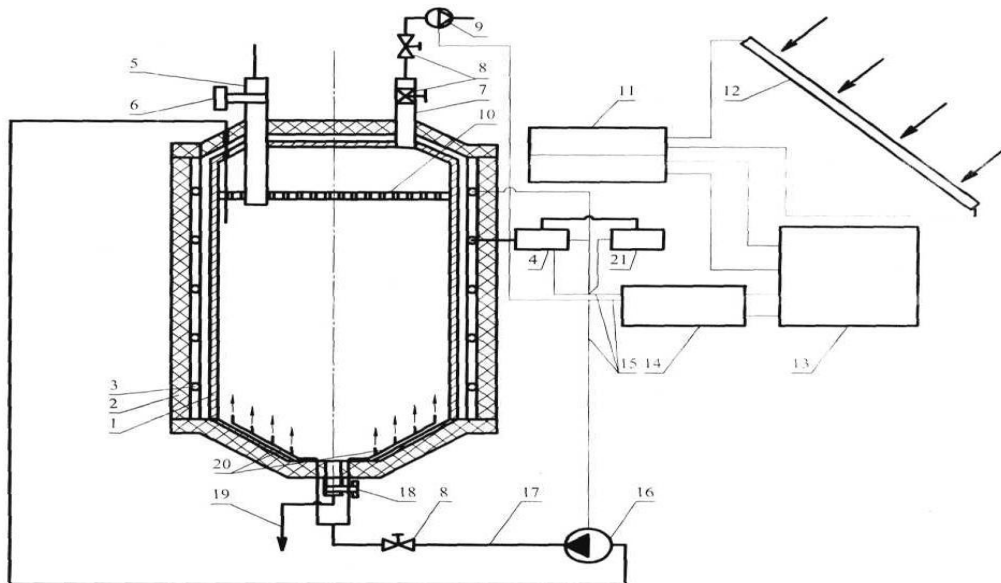


Рисунок 2.6 – Біогазова установка з сонячною батареєю для забезпечення електроенергією нагрівального електрокабеля, що дозволяє забезпечити термостабілізуючі процеси в біореакторі

Установка містить резервуар 1, який зверху накритий утеплювачем 2. У верхній частині резервуара 1 розміщений бункер завантаження біомаси 5 з першою шиберною засувкою 6 та захисною газорозподільною решіткою 10, а також труба споживача біогазу 7 із краном 8 та компресором 9. Резервуар 1 обмотано електричним нагрівальним кабелем 3 із терморегулятором 4. Для забезпечення автоматичного управління температурним режимом субстрату біомаси передбачено терморегулятор 4, який з'єднаний з блоком управління 21. Сонячна батарея 12 з'єднана електричним кабелем 15 з контролером акумуляторної батареї 11, акумуляторною батареєю 13 та інвертором електричного струму 14. Сонячна батарея 12 забезпечує електричною енергією компресор 9, фекальний насос 16, блок управління 21 та терморегулятор 4.

гулятор 4. В нижній частині резервуара 1 знаходяться гідравлічний перемішувач 20 та трубопровід відпрацьованого субстрату 19 з другою шиберною засувкою 18. Фекальний насос 16 служить для переміщення біомаси трубопроводом циркуляції субстрату 17 до гідравлічного перемішувача 20.

Установка працює таким чином.

Субстрат біомаси подається до резервуара 1, який зверху накритий утеплювачем 2. У верхній частині резервуара 1 вмонтовано бункер завантаження біомаси 5 з першою шиберною засувкою 6, для завантаження нової порції біомаси, та захисною газорозподільною решіткою 10, а також трубу споживача біогазу 7 із краном 8 та компресором 9 для видалення біогазу. Резервуар 1 обмотано електричним нагрівальним кабелем 3 і терморегулятором 4, який здійснює підігрів біомаси всередині резервуара 1. Для забезпечення автоматичного управління температурним режимом субстрату біомаси передбачено терморегулятор 4, який з'єднаний з блоком управління 21. Сонячна батарея 12 з'єднана електричним кабелем 15 з контролером акумуляторної батареї 11, акумуляторною батареєю 13 та інвертором електричного струму 14, який забезпечує електричною енергією компресор 9, фекальний насос 16, блок управління 21 та терморегулятор 4. В нижній частині резервуара 1 знаходяться гідравлічний перемішувач 20 та трубопровід відпрацьованого субстрату 19 з другою шиберною засувкою 18 для видалення відпрацьованої біомаси. Фекальний насос 16 здійснює переміщення біомаси трубопроводом циркуляції субстрату 17 до гідравлічного перемішувача 20.

На рис. 2.7 зображено конструктивно-технологічну схему біогазової установки з електрокабелем, для підігрівання субстрату в біореакторі, та блоком автоматичного управління температурним режимом [61].

Установка містить резервуар 2, який зверху накритий утеплювачем 1. Всередині резервуара 2 розміщено вертикальну шнекову мішалку 4. У верхній частині резервуара 2 вмонтовано бункер завантаження 5 з першою шиберною засувкою 6 та захисною газорозподільною решіткою 9, а також трубу споживача біогазу 7 із краном 8. Резервуар 2 обмотано електричним нагрівальним кабелем 10 із терморегулято-





грівального кабелю 10 обмотаного навколо резервуара 2. Через провальні колосникові решітки 17 в нижній частині резервуара 2 субстрат біомаси знову надходить в резервуар 2. Дані температур всередині резервуара 2, камери підігрівання та циркуляції субстрату біомаси 3 сприймаються аналоговим модулем вводу 14 і передаються через проміжний інтерфейс 13 до електронно-обчислювальної машини 15. Дані про температурний режим субстрату обробляються і через цифрово-аналоговий перетворювач 12 передаються на терморегулятор 11 для регуляції параметрів електричного нагрівального кабелю 10. Біогазова суміш, утворена внаслідок анаеробного процесу бродіння, надходить через захисну газорозподільну решітку 9 до труби споживача біогазу 7 та регулюється краном 8. Відпрацьований субстрат біомаси видаляється із біогазової установки через отвір для видалення відпрацьованого субстрату біомаси 18 із другою шиберною засувкою 16 і надходить до трубопроводу відпрацьованого субстрату біомаси 19.

### **2.3. Біогазові установки з використанням низькопотенціальної теплової енергії для забезпечення процесу термостабілізації за допомогою теплових насосів**

За сучасними вимогами до захисту навколишнього середовища екологічно доцільним є теплозабезпечення інтенсивності біоконверсії за допомогою теплових насосних установок, що дозволяють утилізувати загальнодоступні джерела низькотенційної теплоти. Чинниками, що визначають доцільність впровадження теплових насосів як джерела відновлювальної енергії, є низький рівень витрат на монтаж й експлуатацію обладнання, масогабаритні характеристики, надійність і простота в експлуатації та використання озононеруйнівних екологічно безпечних тіл.

На рис. 2.8 зображено конструктивно-технологічну схему біогазової установки з тепловим насосом, джерелом теплової енергії якого є вторинне тепло холодильного обладнання харчової та переробної промисловостей [62].

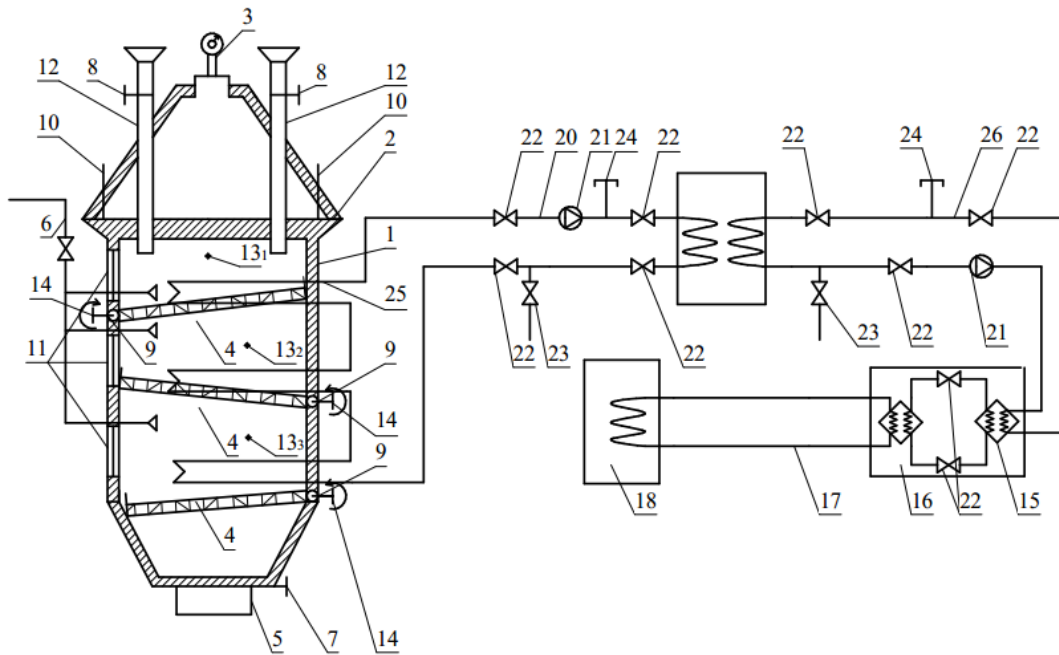


Рисунок 2.8 – Біогазова установка для термостабілізації анаеробного бродіння субстрату в реакторі з тепловим насосом, джерелом тепла для якого є холодильне обладнання харчової та переробної промисловостей

Установка містить резервуар-реактор 1, закритий ковпаком 2, який встановлений з можливістю руху по напрямних 10, шахти завантаження біомаси 12 з заслінками 8 та манометр 3, що розташовані в ковпаку 2. В резервуар-реактор 1 введено провальні колосникові решітки 4, 55 з вмонтованим нагрівником 25, з можливістю зміни гідравлічного опору за допомогою регулятора 14. Провальні колосникові решітки 4 розташовані в резервуарі-реакторі 1 і ділять його на три секції 13<sub>1</sub>, 13<sub>2</sub>, 13<sub>3</sub>, кожна з яких має оглядові вікна 11, труби споживача 6, що поєднані в одну мережу і з'єднані з кожною секцією 13<sub>1</sub>, 13<sub>2</sub>, 13<sub>3</sub> резервуара-реактора 1. В нижній частині резервуара-реактора 1 розміщена ємність для збору біодобрив 5 з заслінкою 7. Провальні колосникові решітки 4 з'єднані з резервуаром-реактором 1 за допомогою шарнірів 9 та кінематично зв'язані з віброактиватором. Вмонтований нагрівник 25 є частиною першого трубопроводу 20, який з'єднує бак-акумулятор 19 з резервуаром-реактором 1. Рух теплоносія в нагрівнику 25 забезпечує циркуляційний насос 21 і запірно-регулювальна арматура 22. Спускник 23 та повітроспускник 24 встановлені для спорожнення системи. Другий трубопровід 26 має ті ж складові що тру-

бопровід 20 і з'єднує бак-акумулятор 19 з тепловим насосом 16, який містить випарник та конденсатор 15. Холодильна камера 18 містить теплообмінний контур 17 теплового насоса 16.

Установка працює таким чином.

При завантаженні біомаси в резервуар-реактор 1 через шахти завантаження біомаси 12 подачу регулюють заслінками 8. Біомаса опиняється в першій секції 13<sub>1</sub> резервуара-реактора 1, де вона нагрівається нагрівачем 25, який отримує теплову енергію від теплоносія, що циркулює в першому трубопроводі 20 між баком-акумулятором 19 та біогазовим реактором. Регуляція витрати теплоносія здійснюється запірно-регулювальною арматурою 22, а нагнітання циркуляційним насосом 21. Другий трубопровід 26 за допомогою циркуляційного насоса 21 транспортує теплоносій між тепловим насосом 16 та бак-акумулятором 19, регуляція здійснюється запірно-регулювальною арматурою 22. Спускник 23 та повітроспускник 24 необхідні для спорожнення системи при заміні теплоносія. Конденсатор та випарник 15 виконують основні функції теплового насоса 16, при цьому теплоносій через теплообмінний контур 17 теплового насоса 16 відбирає теплову енергію у холодильній камери 18. Нагрівач 25 вмонтований в провальні колосникові решітки 4. В секції 13<sub>1</sub> біомаса проходить першу стадію бродіння. Після закінчення першої стадії бродіння за рахунок зміни гідравлічного опору провальних колосникових решіток 4 за допомогою регулятора 14, біомаса опиняється в другій секції 13<sub>2</sub>, де проходить другу стадію бродіння. В першу секцію завантажується нова порція біомаси. Отриманий біогаз відводиться за рахунок труб споживача 6. Третю стадію бродіння біомаса проходить в секції 13<sub>3</sub> резервуара-реактора 1. Після завершення бродіння біомаса потрапляє в ємність збору біодобрив 5, завантаження якої регулюється заслінкою 7. Процеси бродіння візуально оцінюють за допомогою оглядових вікон 11. При необхідності відкрити резервуар-реактор 1 ковпак 2 рухається по напрямних 10 і знімається. Регуляція гідравлічного опору провальних колосникових решіток 4 відбувається за рахунок регулятора 14. Вібратор змушує провальні колосникові решітки 4 здійснювати коливальні рухи. Імпульсні коливання суміші дозволяють більш активно перемішуватись субстрату, а також за рахунок омивання поверхні нагрі-

вача 25 біомасою інтенсифікувати тепловіддачу від стінки нагрівального елемента до середовища. При цьому прогрів біомаси буде рівномірним за рахунок активного перемішування. Також пульсація субстрату дозволить біогазу більш легко прориватися крізь суміш та відбиратися через труби споживача 6. В кожній секції резервуара-реактора 1 провальні колосникові решітки 4 виконують коливання по індивідуально заданих частотах і амплітудах, що дозволяє досягти індивідуальних параметрів бродіння.

На рис. 2.9 показано конструктивно-технологічну схему біогазової установки з теплозабезпечення термостабілізації біоконверсії за допомогою теплового насоса, що використовує низькопотенціальну теплову енергію ґрунту [63].

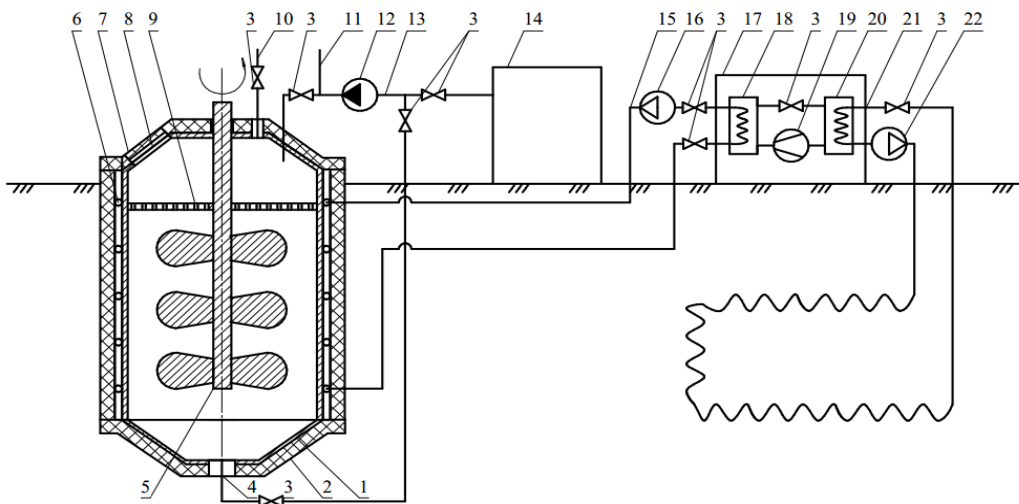


Рисунок 2.9 – Біогазова установка з системою теплопостачання для термостабілізації процесу біоконверсії, яка отримує відновлювану теплову енергію за допомогою теплонасоса з ґрунту

Установка містить резервуар-реактор 1, блок підготовки субстрату 14, тепловий насос 17, резервуар-реактор 1 обмотано обігрівальним трубопроводом 6, вкрито утеплювачем 2 та заглиблено в ґрунт, а всередині встановлено вертикальну пропелерну мішалку 5 та захисну газорозподільну решітку 9. У верхній частині резервуара-реактора 1 розміщено оглядове вікно 8 вкрите кришкою з утеплювачем 7, трубу споживача 10 із запірною-регулювальною арматурою 3. У нижній частині резервуара-реактора 1 розташовано отвір для видалення субстрату 4. До резервуара-реактора 1 та до блока підготовки субстрату 14

під'єднано трубопровід подачі та видалення субстрату 13 з запірно-регулювальною арматурою 3, циркуляційним насосом субстрату 12 та трубою для видалення субстрату 11. До обігрівального трубопроводу 6 резервуара-реактора 1 під'єднано трубопровід обігрівання субстрату 15 з першим циркуляційним насосом етиленгліколю 16 та запірно-регулювальною арматурою 3. Тепловий насос 17 складається з випарника 18, запірно-регулювальної арматури 3, конденсатора 20 та компресора 19 та містить теплообмінний контур теплового насоса 21 з запірно-регулювальною арматурою 3 та другим циркуляційним насосом етиленгліколю 22.

Установка працює таким чином.

Субстрат надходить з блока підготовки субстрату 14 за допомогою циркуляційного насоса субстрату 12 трубопроводом подачі та видалення субстрату 13, який виконано з поліетиленових труб, до резервуар-реактора 1, який вкрито утеплювачем 2 для запобігання тепловтра-там. Всередині резервуар-реактора 1 встановлено вертикальну пропелерну мішалку 5 для перемішування субстрату, щоб забезпечити рівномірне прогрівання за допомогою обігрівального трубопроводу 6, яким обмотано резервуар-реактор 1. Крім того трубопровід подачі та видалення субстрату 13 забезпечує видалення відпрацьованого субстрату з резервуар-реактора 1 через отвір видалення субстрату 4 до труби видалення субстрату 11 з допомогою циркуляційного насоса субстрату 12. При цьому регулювання з допомогою запірно-регулювальної арматури 3 забезпечує зміну напрямку руху субстрату по трубопроводу подачі та видалення субстрату 13. Резервуар-реактор 1 містить оглядове вікно 8 для візуального контролю процесу бродіння, яке вкрито кришкою з утеплювачем 7. Тепловий насос 17, який складається з випарника 18, запірно-регулювальної арматури 3, конденсатора 20, компресора 19, забезпечує процес перетворення низькопотенціальної енергії в високопотенціальну енергію, яка в подальшому подається в резервуар-реактор 1 трубопроводом обігрівання субстрату 15 до обігрівального трубопроводу 6 для підтримання термостабілізації процесу ферментації всередині біогазової установки, при цьому трубопроводи виконані з поліетиленових труб в яких циркулює розчин етиленгліколю за допомогою першого циркуляційного насоса

етиленгліколю 16 та регулюється запірною-регулювальною арматурою 3 в трубопроводі обігрівання субстрату 15. Відбір низькопотенціальної енергії тепловим насосом 17 відбувається через теплообмінний контур теплового насоса 21, який занурений в ґрунт, з допомогою другого циркуляційного насоса етиленгліколю 22 і регулюється запірною-регулювальною арматурою 3. Теплообмінний контур теплового насоса 21 виконано з поліетиленових труб. Біогазова суміш утворена внаслідок процесу ферментації в біогазовій установці надходить через захисну газорозподільну решітку 9 до труби споживача 10 і регулюється запірною-регулювальною арматурою 3, звідки і відбирається на потреби споживача.

На рис. 2.10 показано конструктивно-технологічну схему конструкції біогазової установки з комбінованою системою теплозабезпечення термостабілізації анаеробного бродіння субстрату, яка використовує відновлювану теплову енергію від сонячного колектора та теплового насоса [64].

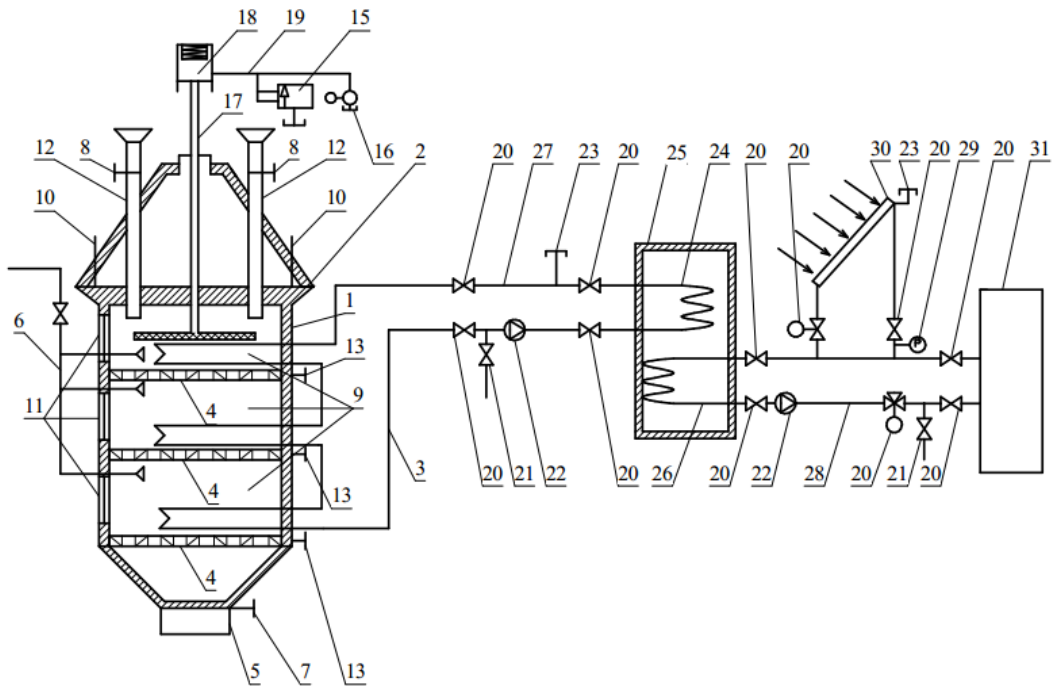


Рисунок 2.10 – Біогазова установка з комбінованою схемою теплозабезпечення для термостабілізації анаеробного бродіння субстрату, яка використовує відновлювану теплову енергію від сонячного колектора та теплового насоса

Установка містить резервуар 1, який зверху закритий ковпаком 2 з шахтами завантаження біомаси 12 і заслінками 8, та поділений прова-

льними колосниковими решітками 4 з можливістю зміни гідравлічного опору за допомогою регулятора 13, на три секції 9, в кожній з яких знаходиться підігрівач біомаси 3, ковпак 2 встановлений з можливістю руху ковпака по напрямних 10 і містить труби споживача 6, які сполучені з кожною секцією 9, також кожна секція 9 резервуара 1 має оглядові вікна 11. Ємність 5 з заслінкою 7 для збору біодобрив знаходиться в нижній частині резервуара 1 пластина-активатор 14 знаходиться в першій секції резервуара 1, що кінематично зв'язана з штоком 17 підпружиненого гідроциліндра 18, робоча камера якого гідравлічно сполучена із напірною магістраллю 19 гідронасоса 16, до якої приєднаний імпульсний клапан пульсатор 15. Крім того пристрій містить мережу ізольованих трубопроводів циркуляції теплоносія, яка складається з контуру подачі тепла 27 та контуру відбору тепла 28, в кожному з яких знаходиться циркуляційний насос 22, запірнорегульовальна арматура 20, спускник 21, повітроспускник 23. Бак-акумулятор містить два теплообмінники, перший теплообмінник 24, розміщений у контурі відбору тепла 27 і містить підігрівач біомаси 3 та другий теплообмінник 26 розмішений у контурі подачі тепла 28, який містить в собі тепловий насос 31, геліоколектор 30 та термометрманометр 29.

Установка працює таким чином: при завантаженні біомаси в резервуар 1 через шахти завантаження біомаси 12 подачу регулюють заслінками 8. Біомаса опиняється в першій секції 9 резервуара 1 де вона нагрівається підігрівачем 3 і проходить першу стадію бродіння, після чого за рахунок зміни гідравлічного опору колосникових решіток 4 за допомогою регулятора 13, біомаса опиняється в другій секції 9, де проходить другу стадію бродіння, а в першу секцію завантажуються нова порція біомаси. Отриманий біогаз відводиться за рахунок труб споживача 6. Третю стадію бродіння біомаса проходить в третій секції 9 резервуара 1, де після завершення бродіння біомаса потрапляє в ємність збору біодобрив 5 завантаження якої регулюється заслінкою 7. Процеси бродіння візуально оцінюють за допомогою оглядових вікон 11. При необхідності відкрити резервуар 1 потрібно ковпак 2 рухати по напрямних 10 і зняти його. Регуляція гідравлічного опору провальних колосникових решіток відбувається за рахунок регулятора 13. Гідронасос 16 з імпульсним клапаном-пульсатором 15 змушують здійс-



нювати коливальні рухи шток 17 підпружиненого гідроциліндра 18, що в свою чергу приводить у рух пластину-активатор 14. Робоча камера підпружиненого гідроциліндра 18 гідравлічно сполучена із напірною магістраллю 19 гідронасоса 16. Імпульсні коливання суміші дозволяють більш активно перемішуватись субстрату, а також, за рахунок омивання поверхні підігрівача 7 біомаси, інтенсифікувати тепловіддачу від стінки нагрівального елемента до середовища, причому прогрів буде рівномірним, за рахунок активного перемішування. Також пульсація рідини дозволить біогазу легше прориватися крізь суміш та відбиратися через трубу споживача 4. Підігрівач біомаси 3 виконує свої функції за рахунок тепла, що акумулюється у баку, акумуляторі 25 через теплообмінник відбору тепла 24, який розміщений у контурі відбору тепла 28, в якому перенесення теплоносія здійснюється циркуляційним насосом 22. У контурі відбору тепла 28 циркуляційний насос 22 виконує функцію перенесення теплоносія від теплового насоса 31 чи геліоколектора 30 до теплообмінника подачі тепла 26, який віддає тепло в бак акумулятор 25. В денний час генерація тепла проходить у геліоколекторі 30 за рахунок сонця і акумулюється в бак акумулятор 25, коли використання геліоколектора 30 стає невиконаним, то процес генерації тепла продовжується в тепловому насосі 31, за рахунок зміни напрямку руху теплоносія за допомогою запірнорегулювальної арматури 20, переважно в нічний час. При заповненні і спорожненні системи використовують повітроспускник 23 для видалення повітря та спускник теплоносія 21 для видалення теплоносія. Термометр-манометр 29 необхідний для візуального контролю температури та тиску теплоносія в первинному контурі.

На рис. 2.11 зображено конструктивно-технологічну схему комбінованої біогазової установки системою теплозабезпечення термостабілізації біоконверсії, яка отримує теплову енергію від сонячного колектора та теплового насоса [65].

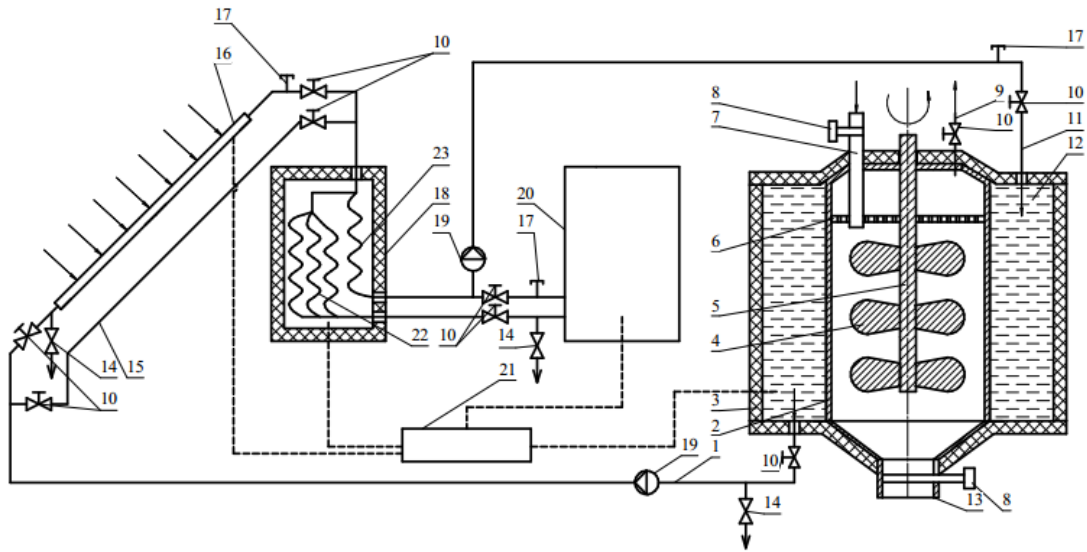


Рисунок 2.11 – Біогазова установка з комбінованою системою теплозабезпечення для термостабілізації процесу біоконверсії, яка отримує теплову енергію від сонячного колектора та від теплового насоса

Установка містить резервуар 2, всередині якого на пустотілому валу 5 встановлено вертикальну пропелерну мішалку 4. У верхній частині резервуара 2 над захисною газорозподільною решіткою 6 розміщено шахту завантаження біомаси 7 із шиберною засувкою 8, а також трубу споживача 9 із запірно-регулювальною арматурою 10. У нижній частині резервуара 2 розташовано отвір для видалення субстрату 13 з шиберною засувкою 8. Резервуар 2 обгорнуто нагрівальною сорочкою 12, яку вкрито утеплювачем 3. До нагрівальної сорочки 12 під'єднано контур відбору тепла 1 та контур подачі тепла 11. Контур відбору тепла 1 поєднує сонячний колектор 16 з бак-акумулятором 18 і через другий теплообмінник 23 переходить у контур подачі тепла 11, який з'єднаний з нагрівальною сорочкою 12. Причому бак-акумулятор 18 містить перший теплообмінник 22 та другий теплообмінник 23. Контур відбору тепла 1 та контур подачі тепла 11 містять циркуляційний насос 19, запірно-регулювальну арматуру 10, спускник 14, повітроспускник 17. Сонячний колектор 16 містить обвідну лінію 15, що приєднана паралельно до нього. Тепловий насос 20 через перший теплообмінник 22 з'єднаний паралельно з мережею ізованих трубопроводів, яка складається з контуру відбору тепла 1 та контуру подачі тепла 11, причому перший теплообмінник 22 з'єднаний

з другим теплообмінником 23. Блок контролю за температурним режимом 21 з'єднаний з сонячним колектором 16, баком-акумулятором 18, тепловим насосом 20 та нагрівальною сорочкою 12.

Установка працює таким чином.

Субстрат біомаси подається до резервуара 2 через шахту завантаження біомаси 7 із шиберною засувкою 8, всередині якого за допомогою пустотілого вала 5 з вертикальною пропелерною мішалкою 4 здійснюється перемішування субстрату. В верхній частині резервуара 2 за допомогою захисної газорозподільної решітки 6 здійснюється вивільнення біогазу, який надходить до труби споживача 9 із запірно-регулювальною арматурою 10. У нижній частині резервуара 2 розташовано отвір для видалення субстрату 13 з шиберною засувкою 8. Резервуар 2 обгорнуто нагрівальною сорочкою 12 вкритою утеплювачем 3, яка забезпечує підтримання необхідної температури всередині резервуара 2. До нагрівальної сорочки 12 під'єднано контур відбору тепла 1 та контур подачі тепла 11, які забезпечують циркуляцію теплоносія та обігрівання резервуара 2. Теплоносій для підігрівання подається контуром відбору тепла 1 до сонячного колектора 16, потім в бак-акумулятор 18 і через другий теплообмінник 23 отримує теплову енергію від теплового насоса 20, після чого переходить у контур подачі тепла 11, який подає теплоносій до нагрівальної сорочки 12. Бак-акумулятор 18 містить перший теплообмінник 22 та другий теплообмінник 23, якими здійснюється акумуляція теплової енергії від теплового насоса 20 в бак-акумулятор 18 та відбір теплової енергії з бака-акумулятора 18 відповідно. Контур відбору тепла 1 та контур подачі тепла 11 містять циркуляційний насос 19, запірно-регулювальну арматуру 10, спускник 14, повітроспускник 17, які необхідні для нормального функціонування системи тепlopостачання, а саме: подача теплоносія, відключення системи тепlopостачання, зливання теплоносія з системи, вивільнення надлишків повітря з системи.

### РОЗДІЛ 3

## МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ІНТИНСИФІКАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

### 3.1 Вплив температурних режимів ферментації субстрату на продуктивність біогазової установки

Існуючі малогабаритні вітчизняні біогазові установки мають невисоку продуктивність, значні енерговитрати на власні потреби біоконверсії та суттєве техногенне навантаження на навколишнє середовище [22, 24]. Теоретичні й експериментальні дослідження технологічних процесів виробництва біогазу із органічних відходів не повною мірою відображають шляхи підвищення продуктивності біогазових установок за рахунок оптимізації робочих процесів, що відбуваються при ферментації біомаси [4, 11, 13, 15].

В зв'язку з цим доцільним є теоретичне обґрунтування за результатами чисельного моделювання шляхів оптимізації параметрів, що впливають на інтенсифікацію анаеробного бродіння біомаси, тобто на продуктивність біогазової установки.

Аналітичними дослідженнями [22, 68, 75–77] встановлено закономірності кінетики процесу перемішування та седиментації полідисперсної органічної маси в біореакторі залежно від технологічних параметрів і фізичних властивостей субстрату. Експериментально підтверджено доцільність та ефективність перемішування субстрату вертикальною мішалкою в біореакторі, вплив на такі седиментаційні параметри як густина субстрату та частота переміщування. Подальше вдосконалення технологічного процесу отримання біогазу з метою підвищення його енергоефективності передбачає розроблення математичної моделі, що поєднує критерії оптимізації з факторами, які впливають на збільшення енергоощадності біогазових установок.

Аналіз отриманих попередніх результатів дозволив зробити припущення, що значення величин продуктивності біогазової установки є цільовою функцією

$$Q = f(T, n, W). \quad (3.1)$$

Для пошуку шляхів оптимізації процесу біоконверсії вхідними па-

раметрами вибрано фактори:  $X_1$  – температура анаеробного бродіння органічної біомаси  $T$ , °C;  $X_2$  – частота обертання перемішувача  $n$ , хв<sup>-1</sup>;  $X_3$  – вологість субстрату  $W$ , %.

Для отримання математичної моделі у вигляді рівнянь для цільової функції продуктивності біогазової установки, оскільки параметри правої частини залежності (3.1) мають різну розмірність, виконано їх кодування для адекватного відображення взаємозв'язку. Істинні значення фактори впливу температурних режимів ферментації та седиментаційних параметрів субстрату на цільову функцію, рівні та інтервали їх варіювання наведено в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Істинні значення, рівні та інтервали варіювання факторів

Фактори	Рівні факторів			Інтервали
	Нижній (-1)	Основний (0)	Верхній (1)	Варіювання
$X_1$ , °C	20	37	54	17
$X_2$ , хв <sup>-1</sup>	1	4	9	5
$X_3$ , %	80	85	90	5

За даними табл. 3.1 складено матриці планування чисельного експерименту для функції відгуку. Вплив факторів впливу ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ) на цільову функцію описано регресійною моделлю. Значення коефіцієнтів регресії визначено методом найменших квадратів, їх значимість перевірена за критерієм Стьюдента  $\psi$ , а адекватність моделі – за критерієм Фішера  $F$  [73].

За результатами чисельного моделювання впливу кодованих значень факторів, що обумовлюють значення цільової функції, рівняння регресії має вигляд

$$Q = 0,4961 \cdot X_1 + 0,1260 \cdot X_2 + 0,0338 \cdot X_3 + 1,1949 \quad (3.2)$$

Рівняння (3.2) характеризується параметрами адекватності: критерій Фішера  $F = 2,81$  та коефіцієнт кореляції  $0,714$ , що свідчить про адекватність моделі.

Для дійсних значень факторів рівняння регресії (3.2) для цільової функції  $Q$  має вигляд

$$Q = 0,0291 \cdot T + 0,0315 \cdot n + 0,0067 \cdot W - 0,6177 \quad (3.3)$$

Поверхні відгуку для факторів, що визначають значення цільової функції, подано на рис. 3.1. Забезпечення оптимального термодинамічного режиму ферментації потребує більше затрат додаткової тепло-

вої енергії на термостабілізацію та інтенсифікацій процесу біоконверсії.

Аналіз факторних параметрів залежності продуктивності біогазової установки від частоти обертання перемішувача та вологості субстрату (див. рис. 3.1) показує, що найбільш впливовим фактором є частота перемішування. Із збільшенням швидкості перемішування органічної маси продуктивність біогазової установки збільшується на 21 %.

Результати чисельного моделювання вказують на прямо пропорційну залежність між кількістю отриманого в результаті анаеробного бродіння біогазу та частотою перемішування субстрату, а також на обернену пропорційність взаємозв'язку продуктивності біогазової установки та вологості органічної маси. Найбільша продуктивність біогазової установки при термофільному режимі ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Згідно з результатами моделювання оптимальними умовами бродіння субстрату в біогазовій установці є: температура бродіння  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , частота обертання перемішувача  $n = 9\text{ хв}^{-1}$ , вологість субстрату  $W = 80\text{ }%$ .

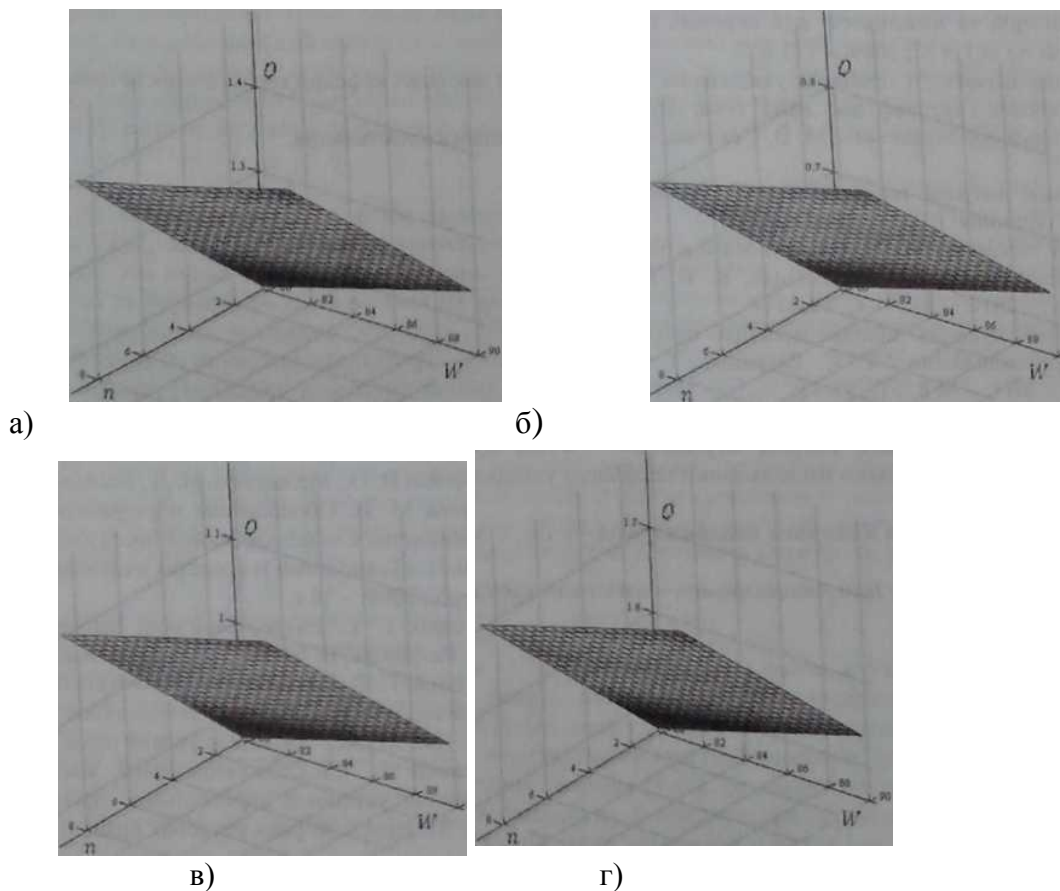


Рисунок 3.1 – Поверхні відгуку функцій залежності продуктивності біогазової установки  $Q$  від частоти обертання перемішувача

і вологості субстрату для різних температурних режимів анаеробного бродіння:

а) при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б) при  $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; в) при  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; г) при  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

### **3.2 Моделювання процесу біоконверсії в біореакторі з відновлюваними джерелами енергії для термостабілізації з використанням нечіткої логіки**

Моделювання технологічного процесу біоконверсії з використанням нечіткої логіки та лінгвістичних змінних дозволяє врахувати кожен фактор впливу на ефективність біоконверсії за його якісною або кількісною характеристикою [22, 44, 67]. Використання нечітких систем зводиться до пошуку таких значень параметрів математичної моделі, які мінімізують розбіжність між бажаними результатами та результатами моделювання.

Враховуючи, що конструктивно-технологічне рішення біогазової установки повинно забезпечувати максимальну продуктивність виробництва біогазу з мінімальними затратами енергоносіїв на термостабілізацію ферментації біомаси, то необхідно встановити ієрархічні зв'язки конструктивних та технологічних факторів [22, 43, 67, 70, 71]. На основі ієрархічних зв'язків конструктивних та технологічних факторів складено дерево логічного висновку конструктивно-технологічних факторів впливу на вихід біогазу (рис. 3.2).

Основою цього дерева є продуктивність біореактора по виходу біогазу, а висячі вершини це конструктивно-технологічні фактори, які необхідно оптимізувати для збільшення виходу біогазу.

Фактори впливу, що впливають на вихід біогазу:

$$L = f_L(X, Y, Z); \quad (3.4)$$

$$X = f_X(x_1, x_2); \quad (3.5)$$

$$Y = f_Y(y_1, y_2, y_3, y_4); \quad (3.6)$$

$$Z = f_Z(z_1, z_2, z_3); \quad (3.7)$$

$$x_1 = f_{x1}(a_1, a_2, a_3); \quad (3.8)$$

$$x_2 = f_{x2}(b_1, b_2, b_3, b_4); \quad (3.9)$$

$$z_1 = f_{z1}(c_1, c_2); \quad (3.10)$$

$$c_1 = f_{c1}(d_1, d_2, d_3); \quad (3.11)$$

$$c_2 = f_{c_2}(e_1, e_2, e_3, e_4). \quad (3.12)$$

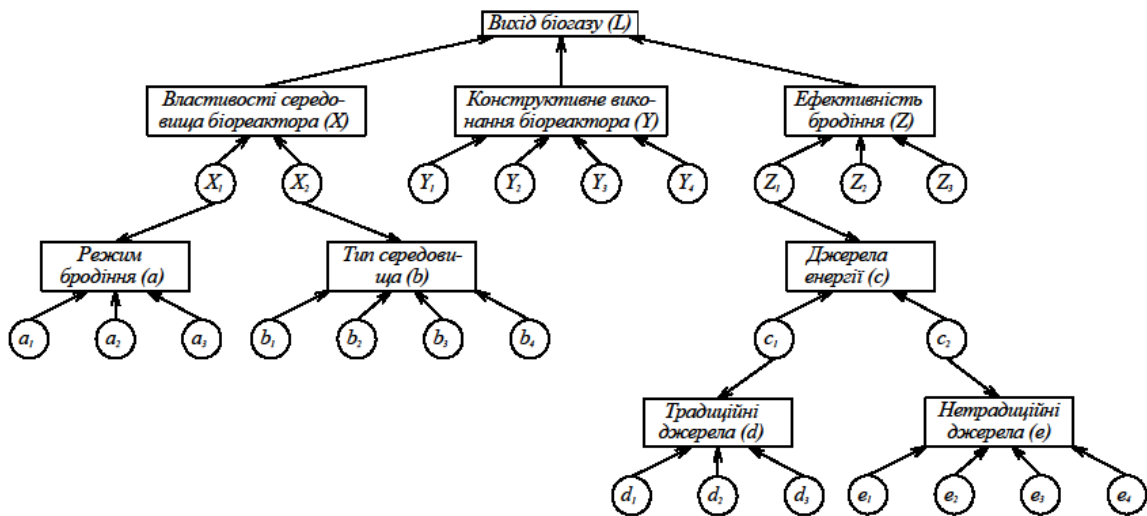


Рисунок 3.2 – Дерево логічного висновку конструктивно-технологічних факторів впливу на вихід біогазу

Фактор  $x_1$  – режим бродіння – визначимо на універсальній множині  $U(x_1) = \{1, 2, 3, \}$  (у. о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(x_1) = \langle \text{кріофільний, мезофільний, термофільний} \rangle$ .

Фактор  $x_2$  – тип середовища – визначимо на універсальній множині  $U(x_2) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  (у. о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(x_2) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $y_1$  – швидкість перемішування – визначимо на універсальній множині  $U(y_1) = \{1, 3, 5, 8, 10\}$  (об./хв.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(y_1) = \langle \text{мала, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $y_2$  – термічний опір – визначимо на універсальній множині  $U(y_2) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  (°C/Вт). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(y_2) = \langle \text{низький, помірний, високий} \rangle$ .

Фактор  $y_3$  – розмір реактора – визначимо на універсальній множині  $U(y_3) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(y_3) = \langle \text{великий, середній, малий} \rangle$ .

Фактор  $y_4$  – автоматизація процесу – визначимо на універсальній множині  $U(y_4) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(y_4) = \langle \text{низька, помірна, висока} \rangle$ .

Фактор  $z_1$  – джерело енергії – визначимо на універсальній множині  $U(z_1) = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора



задаються терм-множиною  $T(z_1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $z_2$  – тривалість бродіння – визначимо на універсальній множині  $U(z_2) = \{15, 20, 25, 30, 35\}$  (днів). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(z_2) = \langle \text{низька, нормальна, висока} \rangle$ .

Фактор  $z_3$  – тип теплообмінника – визначимо на універсальній множині  $U(z_3) = \{1, 2, 3\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(z_3) = \langle \text{внутрішній, зовнішній} \rangle$ .

Фактор  $c_1$  – традиційні джерела енергії – визначимо на універсальній множині  $U(c_1) = \{1, 2, 3\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(c_1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $c_2$  – нетрадиційні джерела енергії – визначимо на універсальній множині  $U(c_2) = \{1, 2, 3\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(c_2) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $d_1$  – тверде паливо – визначимо на універсальній множині  $U(d_1) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(d_1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $d_2$  – природний газ – визначимо на універсальній множині  $U(d_2) = \{1, 2, 3\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(d_2) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $d_3$  – електрична енергія – визначимо на універсальній множині  $U(d_3) = \{1, 2, 3\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(d_3) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $e_1$  – низькопотенціальна енергія – визначимо на універсальній множині  $U(e_1) = \{1, 2, 3\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(e_1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $e_2$  – сонячна енергія – визначимо на універсальній множині  $U(e_2) = \{1, 2, 3\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(e_2) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $e_3$  – температура біогазу – визначимо на універсальній множині  $U(e_3) = \{1, 2, 3\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(e_3) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Для розроблення математичної моделі оцінювання ступеня виходу біогазу від класифікованих конструктивно-технологічних факторів (рис. 3.2) в біореакторах, в подальшому, необхідно використати експертні оцінки нечітких логічних висловлювань типу «якщо-то». Розг-

лянемо такі ієрархії: системну, нетрадиційні джерела енергії.

Таблиця 3.2 – Нечітка матриця знань про співвідношення на системному рівні впливу параметрів біогазового реактора

ЯКЩО			ТО
Вплив властивостей середовища (X)	Вплив конструктивного виконання (Y)	Вплив ефективності бродіння (Z)	Продуктивність біореактора (L)
Низький (н)	Низький (н)	Низький (н)	Низька (н)
Нижче середнього (нс)	Низький (н)	Низький (н)	
Низький (н)	Нижче середнього (нс)	Низький (н)	
Низький (н)	Низький (н)	Нижче середнього (нс)	
Нижче середнього (нс)	Нижче середнього (нс)	Нижче середнього (нс)	Нижче середньої (нс)
Низький (н)	Середній (с)	Нижче середнього (нс)	
Нижче середнього (нс)	Середній (с)	Низький (н)	
Низький (н)	Нижче середнього (нс)	Середній (с)	
Середній (с)	Середній (с)	Середній (с)	Середня (с)
Нижче середнього (нс)	Вище середнього (вс)	Середній (с)	
Середній (с)	Вище середнього (вс)	Нижче середнього (нс)	
Нижче середнього (нс)	Середній (с)	Вище середнього (вс)	
Вище середнього (вс)	Вище середнього (вс)	Вище середнього (вс)	Вище середньої (вс)
Середній (с)	Високий(в)	Вище середнього (вс)	
Вище середнього (вс)	Високий(в)	Середній (с)	
Середній (с)	Вище середнього (вс)	Високий(в)	
Високий(в)	Високий(в)	Високий(в)	Висока (в)
Високий(в)	Високий(в)	Вище середнього (вс)	
Високий(в)	Вище середнього (вс)	Високий(в)	
Вище середнього (вс)	Високий(в)	Високий(в)	

Системному рівню відповідає співвідношення, для подання якого лінгвістичними правилами «якщо-то» вхідні змінні  $X, Y, Z$  та вихідна  $L$  оцінюються терм-оцінкою  $T = \langle \text{низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий} \rangle$  [71, 72].

Нечітку матрицю знань для моделювання залежності на системному рівні з врахуванням впливів властивостей середовищ, впливу конструктивного виконання біогазового реактора та впливу параметрів ефективності бродіння наведено в табл. 3.2.

Лінгвістичним висловлюванням, які наведено в табл. 3.2, відповідає система нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(L) = & \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_{HC}(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \\ & \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_H(X) \wedge \mu_{HC}(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_{HC}(Z); \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \mu_{HC}(L) = & \mu_{HC}(X) \wedge \mu_{HC}(Y) \wedge \mu_{HC}(Z) \vee \mu_H(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{HC}(Z) \vee \\ & \vee \mu_{HC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_H(X) \wedge \mu_{HC}(Y) \wedge \mu_C(Z); \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(L) = & \mu_C(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_{HC}(X) \wedge \mu_{BC}(Y) \wedge \\ & \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_{BC}(Y) \wedge \mu_{HC}(Z) \vee \mu_{HC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{BC}(Z); \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \mu_{BC}(L) = & \mu_{BC}(X) \wedge \mu_{BC}(Y) \wedge \mu_{BC}(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \\ & \wedge \mu_{BC}(Z) \vee \mu_{BC}(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_{BC}(Y) \wedge \mu_B(Z); \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(L) = & \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_B(Z) \vee \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \\ & \wedge \mu_{BC}(Z) \vee \mu_B(X) \wedge \mu_{BC}(Y) \wedge \mu_B(Z) \vee \mu_{BC}(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_B(Z). \end{aligned} \quad (3.17)$$

На основі дерева логічного висновку конструктивно-технологічних факторів впливу на вихід біогазу моделюємо структуру ієрархічної нейро-нечіткої мережі (рис. 3.3).

Кожний елемент цієї структури представляє собою певний рівень логічного дерева впливу на вихід біогазу в процесі біоконверсії. Кожний елемент має терм-множину експертних оцінок, що вказана на вході параметрів на рис. 3.3: «Н – низький», «НС – нижче середнього», «С – середній», «ВС – вище середнього»; «В – високий».

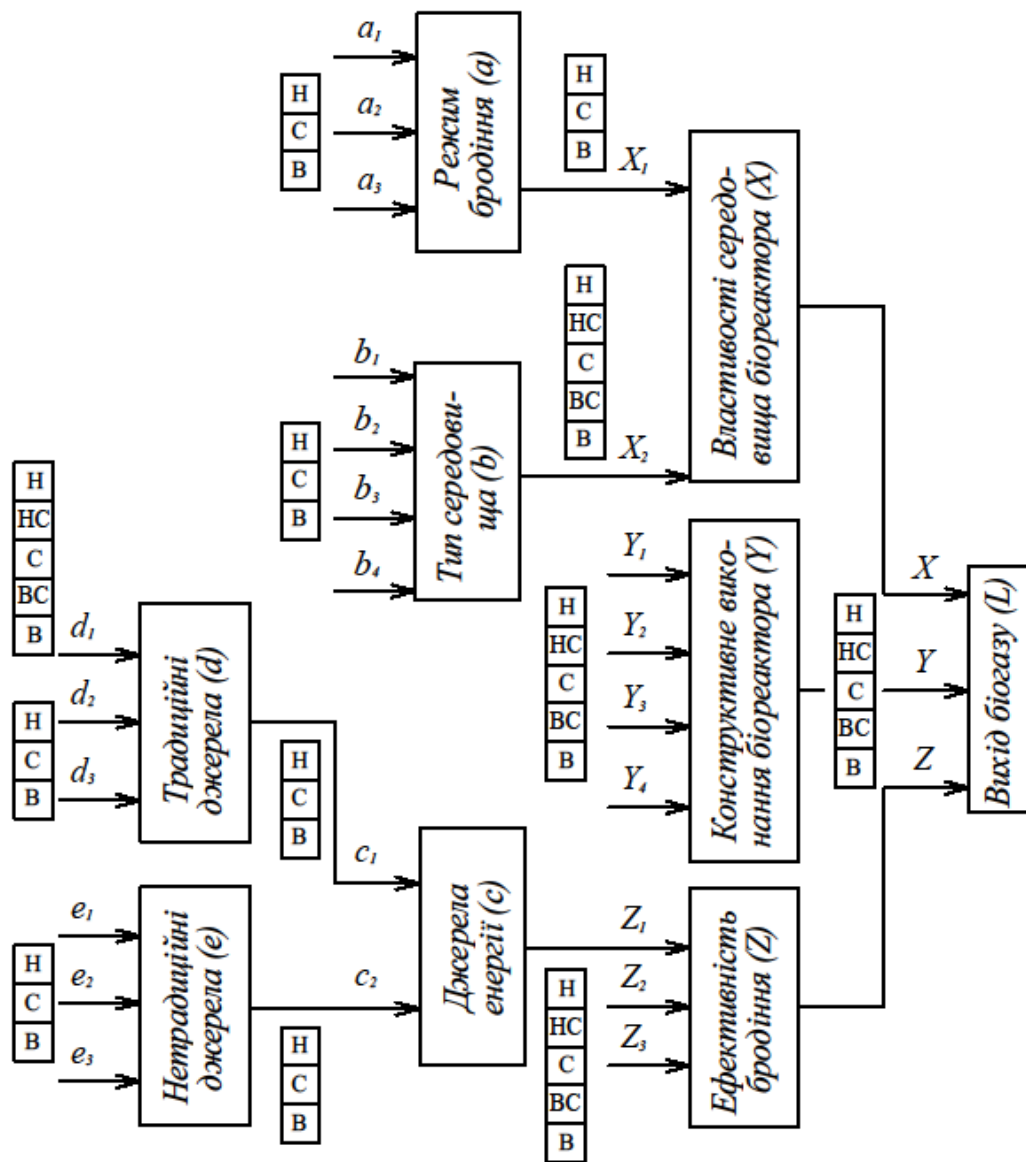


Рисунок 3.3 – Структура ієрархічної нейро-нечіткої мережі продуктивності біореактора

На основі дерева логічного висновку конструктивно-технологічних факторів впливу на вихід біогазу та структури ієрархічної нейро-нечіткої мережі продуктивності біогазу (рис. 3.3) складено оцінку рівнів лінгвістичних змінних, які пов'язують вплив ( $e_1$ ) низько потенціальної енергії, ( $e_2$ ) сонячної енергії, ( $e_3$ ) біогазу з продуктивністю ( $L$ ) біогазової установки (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Нечітка матриця знань про співвідношення впливу нетрадиційних джерел енергії на продуктивність установки

Вплив сонячної енергії ( $e_1$ )	ЯКЩО		ТО
	Вплив низько потенціальної енергії ( $e_2$ )	Вплив температури біогазу ( $e_3$ )	Вплив нетрадиційного джерела енергії ( $e$ )
Низький (н)	Низький (н)	Низький (н)	Низький (н)
Низький (н)	Середній (с)	Низький (н)	
Низький (н)	Низький (н)	Середній (с)	
Середній (с)	Середній (с)	Низький (н)	Середній (с)
Низький (н)	Середній (с)	Високий (в)	
Середній (с)	Низький (н)	Високий (в)	
Середній (с)	Середній (с)	Середній (с)	
Низький (н)	Високий (в)	Середній (с)	
Високий (в)	Низький (н)	Середній (с)	
Середній (с)	Середній (с)	Високий (в)	Високий (в)
Високий (в)	Середній (с)	Високий (в)	
Високий (в)	Високий (в)	Середній (с)	
Високий (в)	Високий (в)	Високий (в)	

Лінгвістичним висловлюванням, які наведено в табл. 3.3 відповідає така система нечітких логічних рівнянь:

$$\mu_H(e) = \mu_H(e_1) \wedge \mu_H(e_2) \wedge \mu_H(e_3) \vee \mu_H(e_1) \wedge \mu_C(e_2) \wedge \mu_H(e_3) \vee \mu_H(e_1) \wedge \mu_H(e_2) \wedge \mu_C(e_3); \quad (3.18)$$

$$\mu_C(e) = \mu_C(e_1) \wedge \mu_C(e_2) \wedge \mu_H(e_3) \vee \mu_H(e_1) \wedge \mu_C(e_2) \wedge \mu_B(e_3) \vee \mu_C(e_1) \wedge \mu_H(e_2) \wedge \mu_B(e_3) \vee \mu_C(e_1) \wedge \mu_C(e_2) \wedge \mu_C(e_3) \vee \mu_H(e_1) \wedge \mu_B(e_2) \wedge \mu_C(e_3) \vee \mu_B(e_1) \wedge \mu_H(e_2) \wedge \mu_C(e_3) \vee \mu_C(e_1) \wedge \mu_C(e_2) \wedge \mu_B(e_3); \quad (3.19)$$

$$\mu_B(e) = \mu_B(e_1) \wedge \mu_C(e_2) \wedge \mu_B(e_3) \vee \mu_B(e_1) \wedge \mu_B(e_2) \wedge \mu_C(e_3) \vee \mu_B(e_1) \wedge \mu_B(e_2) \wedge \mu_B(e_3). \quad (3.20)$$

Техніка нечіткого логічного висновку, що застосовувалась до інформації на попередніх етапах, дозволяє обчислити показники, котрі прогнозуються як нечіткі множини. Нечіткі множини визначають сту-

піль ефективності бродіння при виборі джерела енергії для фіксованого вектора факторів впливу. Щоб перейти від нечітких множин до кількісної оцінки, необхідно виконати процедуру дефазифікації. Серед різних методів дефазифікації скористаємось методом «Centroid» [44, 79]. Проводимо дефазифікацію на рівні нетрадиційних джерел енергії, для чого обчислено значення функцій належності парних порівнянь, а також скористаємось шкалою Сааті для експертної оцінки елементів [79].

Матриця парних порівнянь різних нетрадиційних джерел енергії, з точки зору їх близькості до терму «низька» розміщена в табл. 3.4. Фактор  $e$  – нетрадиційні джерела енергії – визначений на універсальній множині  $U(e) = \{1, 2, 3\}$  (у. о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(e) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Таблиця 3.4 – Парні порівняння нетрадиційних джерел енергії відповідно їх близькості до терму «низька»

		$e_1$	$e_2$	$e_3$
$A_{\text{низька}}(e) =$	$e_1$	1	6 / 9	1 / 9
	$e_2$	9 / 6	1	1 / 6
	$e_3$	9	6	1

При формуванні цієї матриці експертно визначався лише третій рядок, а елементи інших рядків обчислювалися, виходячи з властивостей отриманої матриці [71, 72].

Відповідно до даних таблиці 3.4 отримано ступені належності елементів  $e_1, e_2, e_3$  до терму «низька»:

$$e_{\text{низька}}(e_1) = \frac{1}{1 + \frac{6}{9} + \frac{1}{9}} = 0,5625 \quad (3.21)$$

$$e_{\text{низька}}(e_2) = \frac{1}{\frac{9}{6} + 1 + \frac{1}{6}} = 0,375; \quad (3.22)$$

$$e_{\text{низька}}(e_3) = \frac{1}{9+6+1} = 0,0625. \quad (3.23)$$

Аналогічно визначаються матриці парних порівнянь різних нетрадиційних джерел енергії, з точки зору їх близькості до терму «середня» та «висока» (табл. 3.5 та 3.6).

Таблиця 3.5 – Парні порівняння нетрадиційних джерел енергії відповідно їх близькості до терму «середня»

		$e_1$	$e_2$	$e_3$
$A_{\text{низька}}(e) =$	$e_1$	1	9 / 1	6 / 1
	$e_2$	1 / 9	1	6 / 9
	$e_3$	1 / 6	9 / 6	1

Таблиця 3.6 – Парні порівняння нетрадиційних джерел енергії відповідно їх близькості до терму «висока»

		$e_1$	$e_2$	$e_3$
$A_{\text{низька}}(e) =$	$e_1$	1	1 / 6	9 / 6
	$e_2$	6 / 1	1	9 / 1
	$e_3$	6 / 9	1 / 9	1

Відповідно до даних таблиці 3.5 отримано ступені належності елементів  $e_1, e_2, e_3$  до терму «середня»:

$$e_{\text{середня}}(e_1) = \frac{1}{1+9+6} = 0,0625; \quad (3.24)$$

$$e_{\text{середня}}(e_2) = \frac{1}{\frac{1}{9}+1+\frac{6}{9}} = 0,5625; \quad (3.25)$$

$$e_{\text{середня}}(e_3) = \frac{1}{\frac{1}{6}+\frac{9}{6}+1} = 0,375; \quad (3.26)$$

Відповідно до даних таблиці 3.6 отримано ступені належності елементів  $e_1, e_2, e_3$  до терму «висока»:

$$e_{\text{висока}}(e_1) = \frac{1}{1 + \frac{1}{6} + \frac{9}{6}} = 0,375; \quad (3.27)$$

$$e_{\text{висока}}(e_2) = \frac{1}{6 + 1 + 9} = 0,0625; \quad (3.28)$$

$$e_{\text{висока}}(e_3) = \frac{1}{\frac{6}{9} + \frac{1}{9} + 1} = 0,5625; \quad (3.29)$$

Отримані значення функцій належності пронормовані на одиницю шляхом ділення на найбільший ступінь належності. В результаті цього різні рівні використання нетрадиційних джерел енергії представляються у вигляді таких нечітких множин:

- нетрадиційне джерело енергії «низький»

$$= \left\{ \frac{0,5625}{1}; \frac{0,375}{2}; \frac{0,0625}{3} \right\};$$

- нетрадиційне джерело енергії «середній»

$$= \left\{ \frac{0,0625}{1}; \frac{0,5625}{2}; \frac{0,375}{3} \right\};$$

- нетрадиційне джерело енергії «високий»

$$= \left\{ \frac{0,375}{1}; \frac{0,0625}{2}; \frac{0,5625}{3} \right\}.$$

Отримані нечіткі множини описуються графіками на рис. 3.4.



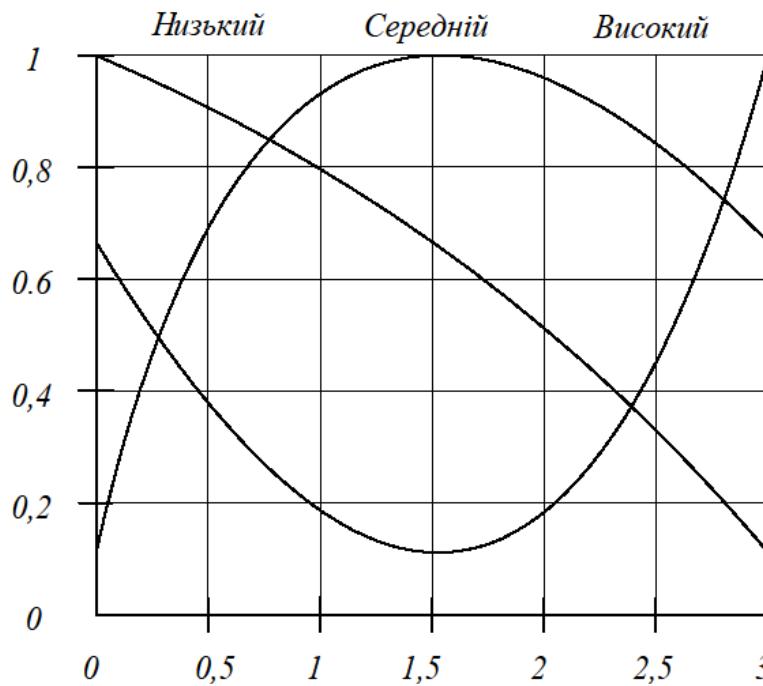


Рисунок 3.4 – Функції належності для лінгвістичної змінної «нетрадиційні джерела енергії»

В результаті побудови графіків функцій належності (див. рис. 3.4) отримано графічні моделі залежності виходу біогазу при використанні різних нетрадиційних джерел енергії. Отримана база знань про зв'язки нечітких термів вхідних та вихідних лінгвістичних змінних дозволяє оптимізувати вибір нетрадиційного джерела енергії для забезпечення термостабілізації та інтенсифікації процесу біоконверсії в біореакторі з метою підвищення її енергоефективності.

### **3.4. Енергетичні складові моделі енергоефективного біореактора з використанням відновлюваних джерел**

Використання відновлюваних джерел енергії з допомогою сонячних колекторів та батарей, теплових насосів та технологічних процесів біоконверсії, дає можливість забезпечити інтенсифікацію ферментації біомаси необхідною тепловою енергією. Крім того це дає можливість забезпечити тепловою енергією роботу всього комплексу біогазової установки і тому експлуатаційні витрати в цьому випадку дуже низькі, а також незалежність від змін пов'язаних з традиційними джерелами енергії спрощує систему управління проектом загалом[78].

Граф потоків енергії біореактора з використанням відновлюваних джерел енергії наведено на рис. 3.5

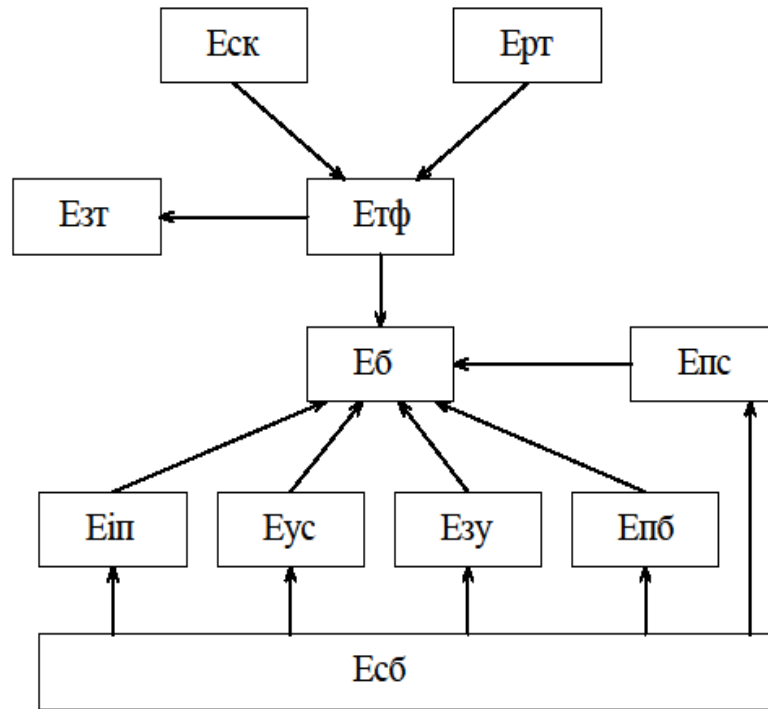


Рисунок 3.5 – Граф потоків енергії біореактора з використанням відновлюваних джерел енергії для забезпечення енергоефективного процесу біоконверсії

Розглянемо граф (див. рис. 3.5). Всі енерговитрати біогазової установки позначені як  $E_{\zeta}$ . Всі енерговитрати  $E_{\zeta}$  складаються з таких видів тепловтрат:  $E_{\text{тф}}$  – енерговитрати на термостабілізацію процесу ферментації;  $E_{\text{пс}}$  – енерговитрати на підготування субстрату;  $E_{\text{пб}}$  – енерговитрати на підготування біогазу до використання;  $E_{\text{зу}}$  – енерговитрати на технічні засоби управління процесом біоконверсії;  $E_{\text{ус}}$  – енерговитрати на утилізацію відпрацьованого субстрату;  $E_{\text{іп}}$  – енерговитрати на інтенсифікацію процесу ферментації перемішування субстрату;  $E_{\text{зт}}$  – енерговитрати для відшкодування тепловтрат від технологічного обладнання біогазової установки. В свою чергу енерговитрати на термостабілізацію процесу ферментації  $E_{\text{тф}}$  можуть бути покриті з допомогою енергії:  $E_{\text{ск}}$  – енергія від сонячного колектора та  $E_{\text{рт}}$  – енергія від рекуперації тепла від біогазу та відпрацьованого субстрату або теплового насоса. Енергія від сонячної батареї  $E_{\text{сб}}$  покриває такі енерговитрати як:  $E_{\text{пс}}$ ,  $E_{\text{пб}}$ ,  $E_{\text{зу}}$ ,  $E_{\text{ус}}$ ,  $E_{\text{іп}}$ .

Робота біогазової установки згідно з даним графом може бути оп-

тимально організована з врахуванням всіх складових, а найголовніше їх величину, яка має бути якомога меншою, шляхом використання структурно-логічної моделі управління проектом біоконверсії наведеної на рис. 3.6

Енерговитрати біогазової установки повинні бути мінімальними для досягнення найвищого ступеня енергоефективності, а саме:

$$E_b = f(E_{пс}, E_{тф}, E_{ін}, E_{зт}, E_{ус}, E_{пб}, E_{зу}) \rightarrow \min, \quad (3.30)$$

де  $E_{пс}$  – енерговитрати на підготування субстрату;  $E_{тф}$  – енерговитрати на термостабілізацію процесу ферментації;  $E_{ін}$  – енерговитрати на інтенсифікацію процесу ферментації перемішування субстрату;  $E_{зт}$  – енерговитрати для відшкодування тепловтрат від технологічного обладнання біогазової установки;  $E_{ус}$  – енерговитрати на утилізацію відпрацьованого субстрату;  $E_{пб}$  – енерговитрати на підготування біогазу до використання;  $E_{зу}$  – енерговитрати на технічні засоби управління процесом біоконверсії.

Енерговитрати на термостабілізацію процесу ферментації можуть бути покриті енергією сонячного колектора та енергією від утилізації тепла біогазу та відпрацьованої біомаси або теплового насоса

$$E_{тф} = E_{ск} + E_{рт} , \quad (3.31)$$

Де  $E_{ск}$  – енергія від сонячного колектора;  $E_{рт}$  – енергія від рекуперації тепла від біогазу та відпрацьованого субстрату.

Кількість енергії від сонячного колектора залежить від багатьох факторів, основними з яких є тривалість сонячних днів року, тривалість надходження сонячних променів протягом дня та коефіцієнт корисної дії перетворення їх в теплову енергію сонячного колектора

$$E_{ск} = f(\tau_{рік}, \tau_{дня}, \eta_{ск}) , \quad (3.32)$$

де  $\tau_{рік}$  – тривалість сонячних днів року;  $\tau_{дня}$  – тривалість надходження сонячних променів протягом дня;  $\eta_{ск}$  – ККД сонячного колектора.

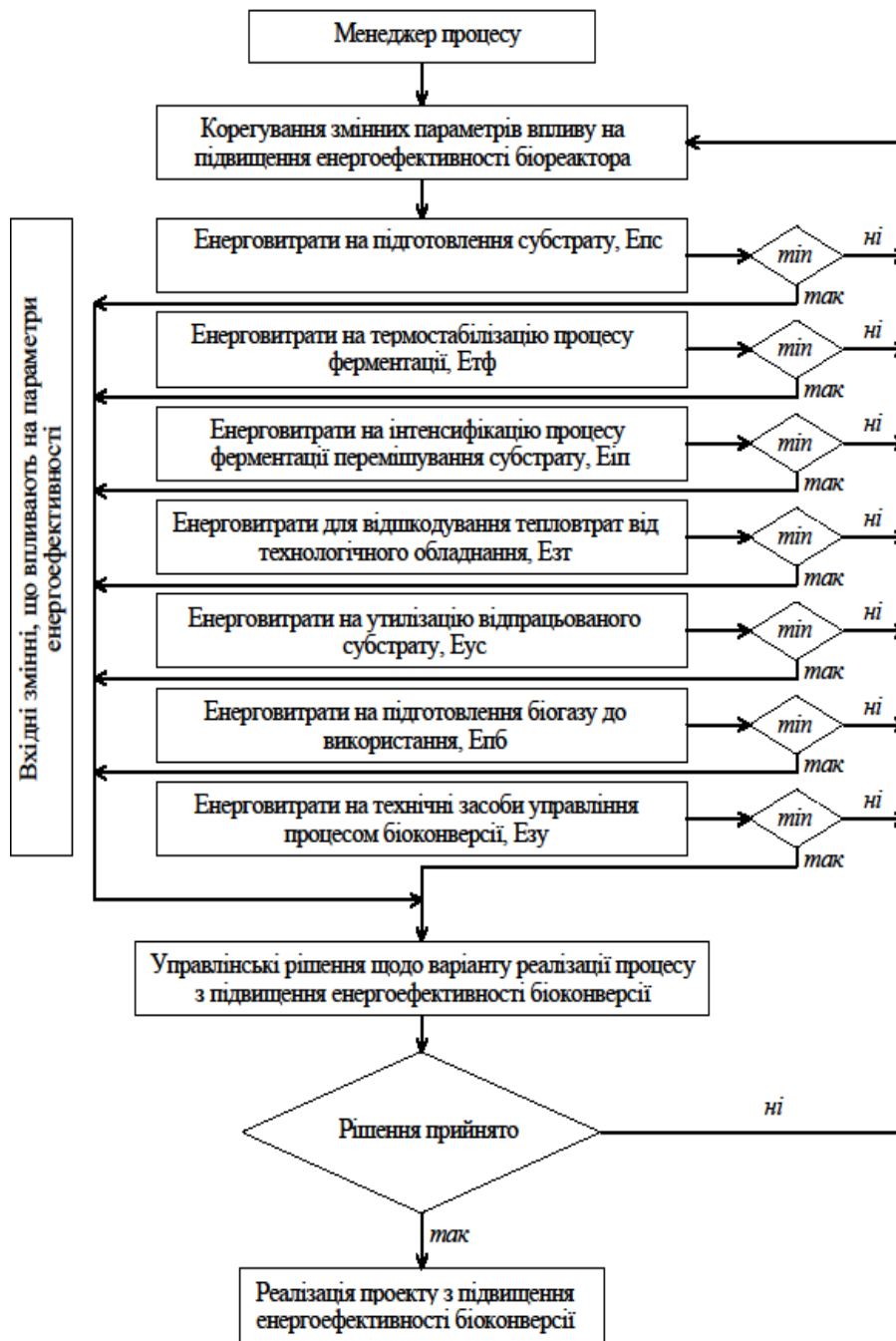


Рисунок 3.6 – Структурно-логічна модель управління проектом з підвищення енергоефективності процесу біоконверсії

Всі інші енерговитрати на управління термостабілізацією можна покрити енергією сонячної батареї

$$E_{сб} = E_{шп} + E_{ус} + E_{зу} + E_{пб} , \quad (3.33)$$

$$E_{сб} = f(\tau_{рік}, \tau_{дня}, \eta_{сб}) , \quad (3.34)$$

де  $\eta_{сб}$  – ККД сонячної батареї.

При виборі сонячних колекторів чи батарей необхідно звертати увагу, в першу чергу, на коефіцієнт корисної дії. Вакуумні сонячні колектори відрізняються по типу скляної трубки: коаксіальна, пір'єва. ККД сонячних колекторів з коаксіальними вакуумними трубками невисокий і може сягати 65 % при виконанні коаксіальних трубок з тепловим каналом типу «Heat pipe», але при виконанні її з прямоточним тепловим каналом показник ККД зростає до 76 %. Пір'єва трубка з тепловим каналом типу «Heat pipe» у сонячних колекторах дає можливість отримати ККД у межах до 77 %, а з прямоточним тепловим каналом до 80 %. ККД плоских сонячних колекторів може бути вищим за показники вакуумних сонячних колекторів, але лише при невеликій різниці температур теплоносія і зовнішнього середовища, тобто їх використання в холодний період року неефективне. Сонячні колектори наявні у різних виробників, наприклад: «Star Energy», «Kordi» «Sint solar», «Meibes», «Viessmann», «Vaillant» та інші. Порівняння ККД плоских та вакуумних сонячних колекторів наведено на рис. 3.7 [78].

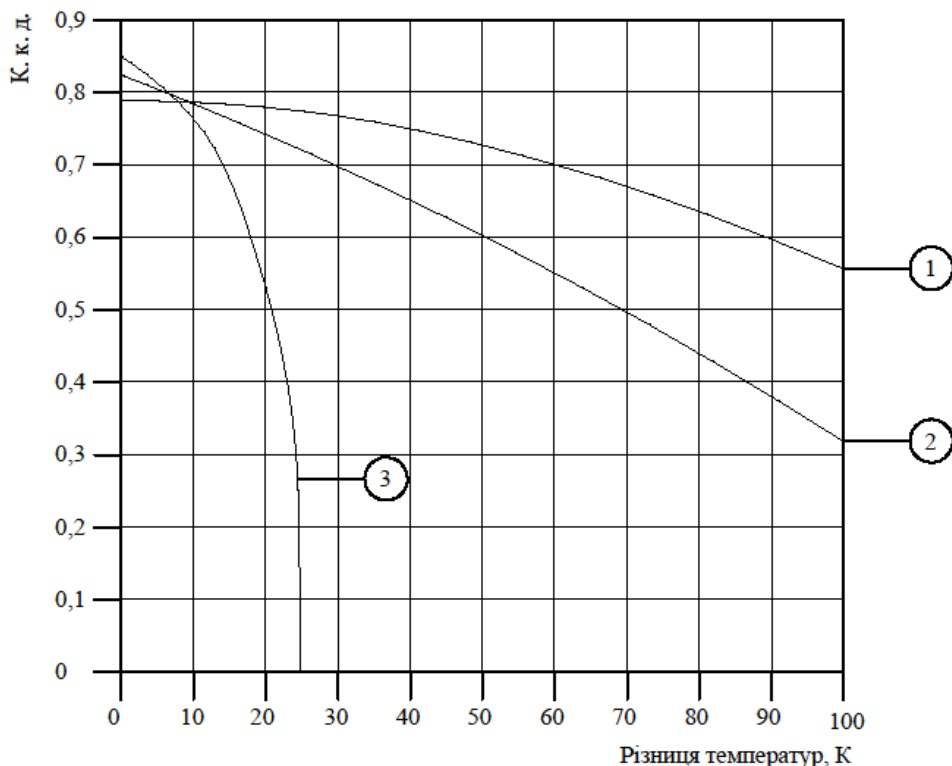


Рисунок 3.7 – Порівняння ККД сонячних колекторів:  
 1 – вакуумний трубчатий сонячний колектор; 2 – плоский сонячний колектор з селективним покриттям; 3 – відкритий сонячний колектор/абсорбер

Сонячні батареї ж конвертують сонячну енергію в електричну енергію зі значно меншим коефіцієнтом корисної дії. Продуктивність серійних промислових сонячних панелей може коливатись від 7 до 20 %, але на сьогоднішній день існують лабораторні зразки з ККД близько 50 %. Компанія «Sun Tech Power» заявила, що в найближчі роки в серійному виконанні будуть сонячні панелі з кремнієвими кристалічними фотомодулями, ККД яких буде 22 %. Також існують тонкоплівкові сонячні батареї ККД яких в межах 10–13 %, але вже в найближчому майбутньому заявлено деякими компаніями виробництво більше ефективних сонячних батарей: 15,7 % (компанія MiaSole), 18,7 % (компанія EMPA) та інші. Але все ж найбільш продуктивними є багат шарові сонячні модулі. Їх ККД на сьогодні складає близько 30 %, а прогнозується досягнення величини у 68–86 %. Такі модулі не так давно використовуються в серійному виконанні, хоча саме вони були застосовані на станції «Мир», марсоході «Mars Exploration Rover» та інших.

### **3.4 Ефективність інноваційних проектів біоконверсії з альтернативними джерелами енергії**

#### **3.4.1 Енергоефективність інноваційних проектів біоконверсії з використанням геліоустановок для термостабілізації процесу виробництва біогазу**

Інтенсифікація анаеробного бродіння в біореакторі потребує певних затрат додаткової енергії, що може спричинити зниження рентабельності біоконверсії. Основною задачею конструктивно-технологічних рішень біогазової установки є максимальна продуктивність виробництва біогазу з мінімальними затратами енергоносіїв на інтенсифікацію та термостабілізацію ферментації біомаси. Підвищення енергоефективності біореактора можна досягти шляхом використання альтернативних джерел енергії [8, 23, 69, 78].

В Україні існують достатньо сприятливі умови для використання сонячної енергії. Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, яка потрапляє на 1 м<sup>2</sup> поверхні знаходиться в межах від 1070–1400 кВт·год/м<sup>2</sup> в залежності від регіону. Основним стримуючим фак-

тором для розвитку сонячної енергетики є висока вартість енергії, яка отримується з використанням сонячних модулів. Проте в останні роки спостерігається оптимістична тенденція щодо зниження собівартості виробництва енергії згенерованої сонячними електростанціями. Так, якщо вартість виготовлення сонячного елемента потужністю 1 Вт у середині 90-х років складала близько 15 доларів, то зараз вона є меншою за 1 долар США.

Максимально можливий технічно-досяжний енергетичний потенціал сонячної енергії в Україні становить 430 млн т умовного палива в рік. Такий обсяг еквівалентний 371 млрд м<sup>3</sup> природного газу. Отже, існують достатньо потужні можливості для ефективного використання геліоустановок на території України для отримання електричної та теплової енергії. В Україні побудовано понад 50 сонячних електростанцій. Проте, вітчизняна сонячна енергетика за своїми показниками значно поступається країнам-лідерам з розвитку альтернативної енергетики. Практично сформована нормативна база щодо регулювання розвитку сонячної енергетики, зокрема, стимулювання власного виробництва комплектуючих для цієї галузі. З 1 січня 2014 року для отримання зеленого тарифу обладнання сонячних електростанцій повинно містити не менше 50 % сировини українського походження.

Для визначення ефективності застосування енергії сонця для підтримання температурного режиму бродіння в біореакторі було проведено розрахунки тепловтрат згідно відомою методикою [80, 87].

Затрати енергії на інтенсифікацію технологічного процесу анаеробного бродіння субстрату відповідно до конструктивно-технологічної схеми [59]:

$$E_{\text{ТП}} = (E_{\text{П}} + E_{\text{ТС}} + E_{\text{ТВ}}) \rightarrow \min , \quad (3.35)$$

де  $E_{\text{П}}$  – затрати енергії на перемішування субстрату, (кВт·год)/рік;  
 $E_{\text{ТС}}$  – затрати енергії на підігрівання біомаси, (кВт·год)/рік;  
 $E_{\text{ТВ}}$  – затрати енергії на компенсацію тепловтрат із біогазової установки в зовнішнє середовище, (кВт·год)/рік.

Втрати на термостабілізацію технологічного процесу шляхом підігрівання біомаси з врахуванням періодичності її завантаження в резервуар біогазової установки [5]:

$$E_{\text{тс}} = c_x \cdot m \cdot \Delta T_x \cdot \frac{n_x / n_{\text{ц}}}{3600} + c_T \cdot m \cdot \Delta T_T \cdot \frac{n_T / n_{\text{ц}}}{3600}, \quad (3.36)$$

де  $c_x, c_T$  – теплоємність біосуміші, відповідно для холодного та теплого періоду, кДж/м<sup>3</sup>;  $m$  – маса однієї порції завантаження в біогазову установку, кг;  $\Delta T_x, \Delta T_T$  – різниця температур відповідно в біогазовій установці та у навколишньому середовищі за холодний та теплий період року, °С;  $n_{\text{ц}}$  – термін повторюваності завантаження біосуміші, дні;  $n_x, n_T$  – кількість днів холодного та теплого періодів року відповідно, дні.

Втрати енергії конструкцією біогазової установки [5]:

$$E_{\text{ТВ}} = E_{\text{бу}} + E_{\text{бГ}} + E_{\text{бМ}} + E_T, \quad (3.37)$$

де  $E_{\text{бу}}, E_T, E_{\text{бГ}}, E_{\text{бМ}}$  – тепловтрати поверхнею біогазової установки, поверхнею трубопроводів, із теплотою відхідного біогазу та з відпрацьованою біомасою відповідно, (кВт·год)/рік.

Річні тепловтрати через поверхню резервуара біогазової установки, з теплотою відхідного біогазу, трубопроводами по яких циркулює теплоносій [62]:

$$E_{\text{бу}} = k \cdot F_1 \cdot (\Delta T_x \cdot n_x + \Delta T_T \cdot n_T); \quad (3.38)$$

$$E_{\text{бГ}} = c_x \cdot \rho \cdot V_x \cdot \Delta T_x \cdot \frac{n_x/n_{\text{ц}}}{3600} + c_T \cdot \rho \cdot V_T \cdot \Delta T_T \cdot \frac{n_T/n_{\text{ц}}}{3600}; \quad (3.39)$$

$$E_T = q_x \cdot l \cdot n_x + q_T \cdot l \cdot n_T, \quad (3.40)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі, кВт/м<sup>2</sup>·К;  $F_1$  – площа зовнішньої поверхні біогазової установки, м<sup>2</sup>;  $c_x, c_T$  – теплоємність біогазу, відповідно для холодного та теплого періоду, кДж/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – густина біогазу, кг/м<sup>3</sup>;  $V_x, V_T$  – об'єм біогазу, що виділяється в результаті бродіння біомаси, відповідно, холодного та теплого періоду року, м<sup>3</sup>;  $q_x, q_T$  – тепловий потік через трубопровід відповідно для холодного та теплого періоду року, Вт/м;  $l$  – сумарна довжина трубопроводів, м.

Для визначення тепловтрат біогазової установки по місяцях при розрахунку обрано такі вихідні дані:

- біогазова установка постійної дії об'ємом 100 м<sup>3</sup>, висотою 4 м, діаметром 5,65 м, площею бічної поверхні 121,1 м<sup>2</sup>, що ізольована мі-



неральною ватою шаром 100 мм, при цьому термічний опір стінки складає  $2,38 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;

- біомаса займає 70 % всього об'єму біогазової установки;
- постачання нової порції біосуміші кожні 5 діб масою 25 % від загальної маси суміші;

- розрахункові температури нової порції біомаси в теплий та холодний період року відповідає температурі навколишнього середовища, але не менше  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- довжина трубопроводів 90 м.

- плоский сонячний колектор з площею поверхні  $2,09 \text{ м}^2$ .

Отримані значення тепловтрат в результаті розрахунку за формулами (3.34)–(3.40) наведено в табл. 3.7.

Результати моделювання тепловтрат в біогазовій установці протягом року відображено на графіку залежності  $\Delta Q = f(T)$  та  $\Delta t = f(T)$  (рис. 3.8).

Таблиця 3.7 – Тепловтрати біогазовою установкою

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Річна
Температура	-5,8	-4,3	0,2	8	14,1	17,1	18,3	17,7	13,4	7,6	1,9	-2,5	7,1
К-сть днів	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Тепловтрати, кВт													
Термофільний режим, $50 \text{ }^\circ\text{C}$	8638	7099	7744	6070	5362	4755	4734	4824	5290	6332	7249	7824	75756
Мезофільний режим, $32 \text{ }^\circ\text{C}$	5957	4677	5063	3469	2673	2153	2046	2136	2688	3644	4655	5143	43970
Кріофільний режим, $20 \text{ }^\circ\text{C}$	4169	3063	3275	1734	881	419	254	344	954	1852	2925	3355	22780

Аналізуючи отримані дані для місяця з найнижчою середньою місячною температурою робимо висновок, що необхідна максимальна кількість енергії в місяць для термостабілізації ферментації в біореакторі складає 8638 кВт/міс.

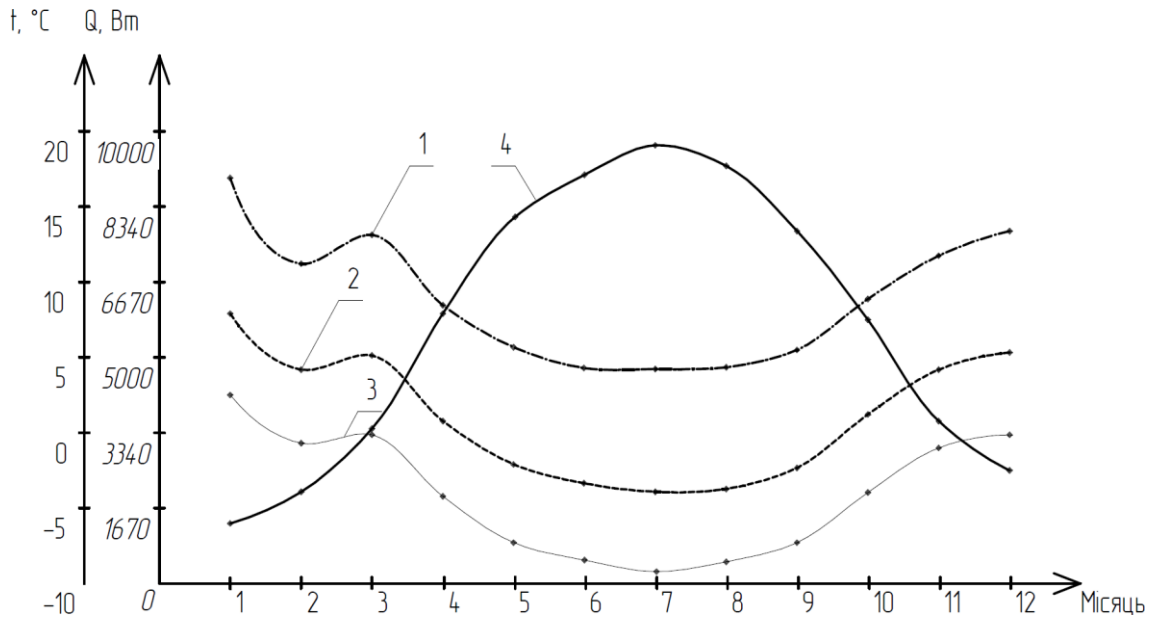


Рисунок 3.8 – Графік залежності тепловтрат та температур по місяцях  $\Delta Q=f(T)$ ,  $\Delta t=f(T)$ : 1 – термофільний режим, 50 °С; 2 – мезофільний режим, 32 °С; 3 – кріофільний режим 20 °С; 4 – середньомісячні температури, °С

За існуючою методикою розрахунку надходжень сонячної радіації [80, 81], визначено надходження теплоти на вертикальну та похилу поверхні, орієнтація у південно-західному напрямку, кут нахилу 50°.

Теплонадходження від сонячної радіації на похилу поверхню геліоколектора, який може бути використаний для термостабілізації процесу ферментації біомаси:

$$q_{\text{Пр}} = (q_{\text{п}}^{\text{в}} \cdot K_{\text{інс в}} + q_{\text{р}}^{\text{в}} \cdot K_{\text{обл}}) \cdot K_{\text{отн}} \cdot \tau_2, \quad (3.41)$$

$$q_{\text{Пр}} = (q_{\text{п}}^{\text{в}} \cdot K_{\text{інс в}} \cdot \frac{\text{ctg } \beta}{\text{ctg}(\beta \mp \beta)} + q_{\text{р}}^{\text{в}} \cdot K_{\text{обл}}) \cdot K_{\text{отн}} \cdot \tau_2, \quad (3.42)$$

де  $q_{\text{п}}$ ,  $q_{\text{р}}$  – кількість теплоти відповідно прямої та розсіяної сонячної радіації, що надходить на поверхню кожну годину розрахункової доби

[81];  $K_{обл}$  – коефіцієнт випромінювання;  $K_{отн}$  – коефіцієнт відносного проникнення сонячної радіації через поверхню скління [81, табл. 2.4];  $\tau_2$  – коефіцієнт, який враховує затемнення скління переплетеннями.

Результати розрахунку надходження теплової енергії на поверхню геліоколекторів наведено у табл. 3.8 та 3.9, для географічної широти м. Вінниці.

Таблиця 3.8 – Надходження тепла від сонячної радіації на горизонтальну поверхню геліоколектора протягом року у м. Вінниця

Теплова енергія, (кВт/м <sup>2</sup> )/міс											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
32,1	56,7	88,2	117,6	155,7	159	154,8	140,4	96,3	59,1	33	27

Таблиця 3.9 – Надходження тепла від сонячної радіації на похилу поверхню геліоколектора протягом року у м. Вінниця

Теплова енергія, (кВт/м <sup>2</sup> )/міс											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
112,6	126,7	152,7	166,7	170,7	169,5	169,4	170,3	166,6	151,1	136,7	126,4

Враховуючи, що найхолоднішим місяцем року є січень, визначимо необхідну площу сонячних батарей для термостабілізації процесу ферментації при термофільному режимі для похилої  $F_n$  та горизонтальної поверхні  $F_T$  :

$$F_n = \frac{Q_m}{Q_{cp}}, \quad (3.43)$$

$$F_z = \frac{Q_m}{Q_{cp}}, \quad (3.44)$$

$$F_n = \frac{8638}{112,554} = 76,75 \text{ м}^2,$$

$$F_z = \frac{8638}{32,1} = 269,1 \text{ м}^2;$$

де  $Q_T$  – максимальні місячні тепловтрати при термофільному режимі, Вт;  $Q_{cp}$  – найменше значення теплової енергії від сонячної енергії, що надходить на похилу та горизонтальну поверхні протягом місяця,

(кВт/м<sup>2</sup>)/міс.

Враховуючи габарити сонячних колекторів (2,09 м<sup>2</sup>), необхідна кількість сонячних батарей складе не менш як 37 одиниць при найнижчій середньомісячній температурі Вінницької області для похилої поверхні та 129 одиниць для горизонтальної поверхні.

### **3.4.2 Економічна оцінка енергоефективності біоконверсії з використанням відновлюваних джерел енергії геліоустановок та теплового насоса**

На сьогоднішній день постійно відбувається подорожчання традиційних джерел енергії, тому раціонально шукати альтернативні шляхи вирішення цієї проблеми. Енергоефективність біоконверсії може бути забезпечена вдосконаленням конструктивно-технологічних параметрів біогазових установок, що розглянуті в розділі 2.

Як приклад економічної енергоефективності використання біоконверсії на рис. 2.10 наведено енергоощадну конструктивно-технологічну схему біогазової установки з віброперемішувачем та альтернативними джерелами енергії для забезпечення інтенсифікації анаеробного бродіння органічної суміші шляхом термостабілізації [62]. Як альтернативні джерела енергії використовуються геліоколектор та тепловий насос.

Одним із шляхів підвищення енергоефективності біоконверсії є зменшення затрат енергоносіїв на забезпечення технологічних процесів, які визначаються за умови

$$E_{\text{тп}} = (E_{\text{п}} + E_{\text{тс}} + E_{\text{тт}}) \rightarrow \min, \quad (3.45)$$

$E_{\text{п}}$  – затрати енергії на інтенсифікацію анаеробного перемішуванням субстрату, Вт/м<sup>3</sup>;  $E_{\text{тс}}$  – затрати енергії на термостабілізацію технологічного процесу, Вт/м<sup>3</sup>;  $E_{\text{тт}}$  – затрати енергії на покриття тепловтрат із біогазової установки в зовнішнє середовище, Вт/м<sup>3</sup>.

Відповідно до запропонованої конструктивно-технологічної схеми енергоощадної біогазової установки (рис. 2.10) [62] затрати енергії на термостабілізацію анаеробного бродіння біомаси та на покриття тепловтрат можуть бути відшкодовані тепловою енергією, що отримується

ся від альтернативних джерел, а саме геліоколектора та теплового насоса, тобто

$$E_{\text{тп}} = E_{\text{г}} + E_{\text{тн}}, \quad (3.46)$$

де  $E_{\text{г}}$  та  $E_{\text{тн}}$  – кількість теплової енергії, яку можна отримати в бак-акумулятор від геліоколектора та теплового насоса, Вт/м<sup>3</sup>.

Річні тепловтрати через поверхню резервуара 1 біогазової установки становлять

$$E_{\text{тг}} = k \cdot F \cdot (\Delta T_{\text{х}} \cdot n_{\text{х}} + \Delta T_{\text{т}} \cdot n_{\text{т}}), \quad (3.47)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $F$  – площа зовнішньої поверхні резервуара, м<sup>2</sup>;  $\Delta T_{\text{х}}$ ,  $\Delta T_{\text{т}}$  – відповідно різниця температур внутрішньої та зовнішньої за холодний та теплий період року, °С;  $n_{\text{х}}$ ,  $n_{\text{т}}$  – кількість днів в році холодного та теплого періоду, дні.

Втрати на термостабілізацію технологічного процесу шляхом підігрівання біомаси з врахуванням періодичності її завантаження в резервуар біогазової установки

$$E_{\text{тс}} = c \cdot m \cdot (\Delta T_{\text{х}} + \Delta T_{\text{т}}) (n_{\text{х}} + n_{\text{т}}) / n_{\text{ц}}, \quad (3.48)$$

де  $c$  – теплоємність біосуміші, кДж/м<sup>3</sup>;  $m$  – маса однієї порції завантаження в біогазову установку, кг;  $n_{\text{ц}}$  – термін повторюваності завантаження біосуміші, дні.

Затрати енергії на вібраційне перемішування пластиною-активатором становить

$$E_{\text{п}} = V \cdot q (n_{\text{х}} + n_{\text{т}}) \cdot n_{\text{п}}, \quad (3.49)$$

де  $n_{\text{п}}$  – термін вібраційного перемішування протягом доби, години;  $q$  – затрати енергії на перемішування субстрату, Вт/м<sup>3</sup>;  $V$  – об'єм біосуміші, м<sup>3</sup>.

Відповідно до запропонованої методики (3.45)–(3.48) виконано чисельне моделювання затрат енергоносіїв на забезпечення технологічного процесу відповідно конструктивно-технологічної схеми біогазової установки (рис. 2.10) за таких умов. Біогазова установка об'ємом 100 м<sup>3</sup>, висотою 1,8 м., з площею бічної поверхні 156,25 м<sup>2</sup> діаметром 8,22 м., ізольованою поверхнею мінеральної вати шаром 100 мм. Запо-

внення об'єму установки на 70 %, постачання нової порції біосуміші кожні 5 діб масою 25 % від загальної маси суміші. При цьому термічний опір стінки складає 2,38 (м<sup>2</sup>·К)/Вт. Дана біогазова установка постійної дії з мезофільним розрахунковим режимом. Розрахунок проводиться, враховуючи середню тривалість холодного періоду року 120 днів, при розрахунковій зовнішній температурі –21 °С, а теплого 245 днів при розрахунковій зовнішній температурі +11,9 °С для м. Вінниці [81].

Результати чисельного моделювання затрат енергоносіїв в біогазовій установці наведено в табл. 3.10

Таблиця 3.10 – Затрати енергоносіїв на забезпечення технологічних процесів біогазової установки

Параметри	Холодний період, кВт·год/рік	Теплий період року, кВт·год/рік	Річні, кВт·год/рік
Тепловтрати через поверхню резервуара, $E_{ТТ}$	10210,1	8145,2	18355,3
Втрати на термостабілізацію процесу, $E_{Тс}$	14009,1	18338,3	32347,4
Втрати енергії на вібраційне перемішування, $E_{П}$	504,0	1029,0	1533,0
Сумарні втрати	24723,2	27512,5	52235,7

Аналіз отриманих результатів (див. табл. 3.10) свідчить, що затрати енергії на інтенсифікацію біоконверсії для природно-кліматичних умов Вінницької області можуть досягати 500 кВт·год/рік на 1 м<sup>3</sup> установки. Ці затрати енергії можуть бути компенсовані за рахунок використання відновлюваної енергії, що отримана з геліоколектора та теплового насоса відповідно до запропонованої енергоощадної конструкції біореактора.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про енергозбереження» [Електронний ресурс] : за станом на 1 липня 1994 р. / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К. : Відомості Верховної Ради, 1994. – 283 с. Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=74%2F94-%E2%F0>.
2. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» [Електронний ресурс] : за станом на 20 лютого 2003 р. / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К. : Відомості Верховної Ради, 2003. – 155 с. Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=555-15>.
3. Калетнік Г. М. Розвиток ринку біопалив в Україні: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора екон. наук : спец. 08.00.03 «Національне господарство» / Г. М. Калетнік. – К., 2009. – 34 с.
4. Біоенергія в Україні – розвиток сільських територій та можливості для окремих громад / [ В. О. Дубровін, М. Д. Мельничук, Ю. Ф. Мельник та ін.]. – К., 2009. – 111 с.
5. Забарний Г. М. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України / Г. М. Забарний, А. В. Шурчков. – К., 2002 – 211 с.
6. Кудря С. О. Потенціал і структура використання нетрадиційних поновлюваних джерел енергії / С. О. Кудря // Енергетичні ресурси та потоки. – К., 2003. – 468 с.
7. Дудюк Д. Л. Нетрадиційна енергетика : навч. посіб. / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа, Я. М. Гнатишин. – Львів : Магнолія 2006, 2008. – 188 с.
8. Сербін В. А. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії в системах ТГП / В. А. Сербін. – Макіївка : ДонДАБА, 2003. – 153 с.
9. Рожко А. Економічні аспекти використання відновлювальних джерел енергії в умовах Євроінтеграції [Електронний ресурс] / А. Рожко. Режим доступу: [http://www.library.tane.edu.ua/images/nauk\\_vydannya/SWFoCT.pdf](http://www.library.tane.edu.ua/images/nauk_vydannya/SWFoCT.pdf).
10. Баадер Б. Биогаз: Теория и практика / Б. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер ; пер. М. И. Серебряного. – М. : Колос, 1982. –148 с.
11. Гелетуха Г. Г. Перспективы развития современных технологий анаэробного сбраживания биомассы в Украине (Обзор) / Г. Г. Гелетуха, С. Г. Кобзарь // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 5. – С. 3–9.

12. Ратушняк Г. С. Енергозберігаючі відновлювальні джерела тепlopостачання : навч. посібник / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 170 с.
13. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 132 с.
14. Ратушняк Г. С. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату : монографія / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 117 с.
15. Землянка О. О. Вибір раціональних режимів роботи реактора біогазової установки / О. О. Землянка, М. В. Губінський // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – 2009. – № 1. – С. 112–120.
16. Weiland P. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany [Електронний ресурс] / P. Weiland // Applied Biochemistry and Biotechnology. – 2003. – № 109 – p. 263–274. Режим доступу: <http://www.springerlink.com/content/p01720g04122n251>.
17. Ratushnyak G.S. Intensification of Biogas Production By Means Of Mechanical Mixing of The Substrate / G. S. Ratushnyak, K. V. Anokhina // Tap Chi Khoa hoc & Cong nghe. – 2012. – № 8 (57). – С. 177–179.
18. Noyola A. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/recourse recovery [Електронний ресурс] / A. Noyola, J. Morgan-Sagastume, J. Lopez-Hernandez // Environmental Science and Biotechnology. – 2006. – p. 93–114. – DOI 10.1007. Режим доступу: <http://www.springerlink.com/content/632346413v5366k3>.
19. Дубровін В. О. Забезпечення якості біопалива / В. О. Дубровін, М. Д. Мельничук, С. В. Драгнєв // Вісник ВПШ. – 2007. – № 4. – С. 98–102.
20. Друкований М. Ф. Технологія переробки біомаси : монографія / М. Ф. Друкований, О. С. Яремчук, Л. В. Сосновська. – Вінниця : ВНАУ. – 432 с.
21. Топілін Г. Е. Принцип одержання біогазу і добрив з органічних відходів з агровиробництва / Г. Е. Топілін, С. М. Умінський, С. В. Інютін // Аграрний вісник Причорномор'я. – 2009. – № 49. Режим доступу:



[http://www.nbuu.gov.ua/portal/chem\\_biol/avpch/Tn/2009\\_48/Topilin\\_Uminsky\\_Injutin.pdf](http://www.nbuu.gov.ua/portal/chem_biol/avpch/Tn/2009_48/Topilin_Uminsky_Injutin.pdf).

22. Ратушняк Г. С. Енергоефективні технологічні процеси та обладнання біоконверсії : монографія / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 148 с.

23. Желих В. М. Дослідження ексергетичної ефективності низькотемпературних сонячних колекторів / В. М. Желих, Х. Р. Лесик, Б. І. Пізнак // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2013. – № 1. – С. 135–142.

24. Желих В. М. Теплозабезпечення побутового біореактора шляхом використання сонячної енергії / В. М. Желих, Ю. В. Фурдас, В. Б. Шепітчак // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2013. – № 1. – С. 142–149.

25. Веденев А. Г. Руководство по биогазовым технологиям / А. Г. Веденев, А. Т. Веденева. – Бишкек : ДЭМИ, 2011. – 84 с.

26. Пат. 7184 Україна, МПК. С 02F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет – № u 20041008416 ; заявл. 18.10.2004 ; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6.

27. Пат. 27445 Україна, МПК. С 02F 11/04. Установка для одержання біогазу і біодобрива з органічних відходів / І. О. Аксютов, Я. В. Бабкін, заявник і власник патенту Аксютов І.О. – № u 200708488 ; заявл. 24.07.2007 ; опубл. 25.10.2007.

28. Пат. 90617 Україна, МПК С 02 F 11/04 Біогазова геліоустановка / В. І. Гуйтур, В. Д. Будак, заявник і власник патенту Гуйтур В. І. – № u201311677 ; заявл. 03.10.2013 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.

29. Ратушняк Г. С. Управління технологічним процесом біоконверсії при перемішуванні субстрату / Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк, К. В. Анохіна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2010. – № 2 – С. 117–122.

30. Пат. 49746 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u200911674 ; заявл. 16.11.2009 ; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.

31. Желих В. М. Теплозабезпечення побутового біореактора шляхом використання сонячної енергії / В. М. Желих, Ю. В. Фурдас, В. Б. Шепітчак // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2013. – № 1. – С. 142–149.
32. Желих В. М. Енергоефективні системи теплозабезпечення виробничих приміщень / В. М. Желих, О. І. Дзерин, Н. А. Сподинюк // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2012. – № 2. – С. 152–157.
33. Пат. 57360 Україна, МПК С 02 F 11/04 Біогазовий реактор / В. М. Желих, Ю. В. Фурдас, заявник і власник патенту національний університет. «Лвівська політехніка». – № u201009106 ; заявл. 20.07.2010 ; опубл. 25.02.201, Бюл. № 4.
34. Пат. 90880 Україна, МПК С 02 F 11/04 Біогазова установка з системою утилізації тепла / Н. В. Колосова, С. І. Монах, Д. В. Виборонов, заявник і власник патенту Колосова Н.В. – № u201400725 ; заявл. 27.01.2014 ; опубл. 10.06.2014р, Бюл.№11.
35. Ратушняк Г. С. Моделювання теплового режиму на початковій фазі бродіння в біогазовій установці з пропелерною мішалкою / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вісник ХНУ. – 2010. – № 4. – С. 19–22.
36. Гелетуа Г. Г. Обзор технологии добычи и использования биогаза на свалках и полигонах твердых бытовых отходов и перспективы их развития в Украине / Гелетуа Г. Г., Марценюк З. А. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1999. – № 4. – С. 6–14.
37. Дрыгина Е. С. Биоустановки в СССР. – Серия 19. – М. : ВНИИСЭНТИ, 1989. – 24 С.
38. Biogas: Kalkuliren Sie genau // Management Erne bare Energien. – 2000. – № 5. – Р. 145–150.
39. Пат. 20193 Україна, МПК С 02 F 11 / 07 Біогазова установка / П. М. Горлей, В. І. Микитюк, В. В. Шлемкевич, заявник і власник патенту Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича – № u200607716 ; заявл. 10.07.2006 ; опубл. 16.01.2007, Бюл. № 1.
40. Пат. 58740 Україна, МПК С 02 F 11/04 Біогазова установка для переробки органічних відходів / В. М. Кломицев, Ю. М. Куценко, О. А. Потішний, заявник і власник патенту Таврійський державний

агротехнологічний університет. – № u201011213 ; заявл. 20.09.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.

41. Ратушняк Г. С. Шляхи вдосконалення енергоощадних технологій при утилізації органічних відходів в системах біоконверсії / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – 2009. – № 659. – С. 151–153.

42. Теплообмінні процеси та обладнання переробних та харчових виробництв / І. П. Паламарчук, В. С. Берник [та ін.] – Львів : Бескид Біт, 2006. – 368 с.

43. Ратушняк Г. С. Інтенсифікація біоконверсії шляхом використання відновлювальних джерел енергії / Г. С. Ратушняк, І. А. Кощев // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2011. – № 2. – С. 157–161.

44. Експертна система для інтелектуальної підтримки енергозберігаючого управління технологічним процесом біоконверсії / Є. П. Ларюшкін та ін. // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2008. – № 1. – С. 144–150.

45. Низькопотенційна енергетика : навч. посіб. / А. О. Редько, М. К. Безродний, М. В. Загорученко [та ін.] ; під ред. академіка НАНУ А. А. Долинського. – Харків : Друкарня Мадрид, 2016. – 412 с.

46. Шовкалюк Ю. В. Використання теплових насосів у теплопостачанні. // Нова тема. – 2007. – №3. – С. 140–151

47. Ратушняк Г. С. Експертна система на базі нечіткої логіки прогнозування продуктивності біогазової установки з механічним перемішувальним пристроєм / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2010. – № 3 (19). – С. 20–25.

48. Пат. 50357 Україна, МПК. С 02F 11/04, С 02F 3/28. Установа для одержання біогазу / В. І. Юрченко, І. В. Юрченко, А. В. Юрченко, заявник і власник патенту Юрченко В.І. – № u 2001129093 ; заявл. 27.12.2001 ; опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10.

49. Пат. 46807 Україна, МПК. С 02F 11/04. Установа для отримання біогазу / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, Н. Д. Степанова, Н. В. Пішеніна, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u 200906401 ; заявл. 19.06.2009 ; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1.

50. Пат. 51129 Україна, МПК. С 02F 11/04, F 24J 2/32. Спосіб термостатування біореактора при виробництві біогазу і добрива / В. В. Притула, Є. Х. Русов, І. Д. Глазирін, М. І. Гоголь, Ф. П. Ржепішевський, заявник і власник патенту Одеська державна академія холоду – № u 200909931 ; заявл. 29.09.2009 ; опубл. 12.07.2010, Бюл. № 13.

51. Пат. 58244 А Україна, МПК E21C 41/00. Система утилізації біогазу та тепла з масиву полігону твердих побутових відходів / О. В. Гвоздевич, Ю. В. Стефанік, Я. Й. Гронський, Б. М. Горбаль, заявник і власник патенту Інститут геології і геохімії горючих копалин національної академії наук України та національної акціонерної компанії «Нафтогаз України» – № 2002118736 ; заявл. 05.11.2002 ; опубл. 15.07.2003, Бюл.№7.

52. Пат. 12596 Україна, МПК С 02 F 11/04. Спосіб переробки сільськогосподарських відходів з одержанням біогазу і добрив / Г.Є. Мовсесов, заявник і власник патенту Інститут механізації тваринництва Української академії аграрних наук – № u200508037 ; заявл. 15.08.2005 ; опубл. 15.02.2006, Бюл. № 2.

53. Пат. 80552 Україна, МПК С 02 F 11/04. Установа для виробництва енергоносіїв з органічних відходів / Д. С. Степанов, С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет – № u201211047 ; заявл. 24.09.2012 ; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.

54. Ратушняк Г. С. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула // Вісник ВПІ. – 2006. – № 2. – С. 26–32.

55. Пат. 79368 Україна, МПК С 02 F 11. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет – № u201209984 ; заявл. 20.08.2012 ; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.

56. Пат. 63826 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, К. В. Анохіна, І. А. Кощєєв, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет – № u201102659 ; заявл. 09.03.2011 ; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.

57. Пат. 63825 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, К. В. Анохіна, І. А. Кощєєв, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет – № u201102656 ; заявл. 09.03.2011 ; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.

58. Пат. 90255 Україна, МПК С 02 F 11. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв, М. В. Поліщук, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201306623 ; заял. 28.05.2013 ; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10.

59. Пат. 95068 Україна, МПК С 02 F 11. Біогазова установка з сонячною батареєю / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв, О. Я. Сімакова, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201406963 ; заял. 20.06.2014 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23.

60. Пат. 97208 Україна, МПК С 02 F 11. Біогазова установка з сонячною батареєю / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв, О. Я. Сімакова заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201406964 ; заял. 20.06.2014 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.

61. Пат. 97959 Україна, МПК С 02 F 11. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201412021 ; заял. 06.11.2014 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7.

62. Пат. 67819 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка з тепловим насосом / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, І. А. Кощєєв, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201108680 ; заял. 11.07.2011 ; опубл. 11.07.2012, Бюл. № 5.

63. Пат. 101177 Україна, МПК С 02 F 11. Біогазова установка з тепловим насосом / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201502928 ; заял. 30.03.2015; опубл. 25.08.2015, Бюл. №16.

64. Пат. 64957 Україна, МПК С 02 F 11 Біогазовий реактор / Г. С. Ратушняк, В. В.Джеджула, І. А. Кощєєв, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201104704 ; заял. 18.04.2011 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.

65. Пат. 100433 Україна, МПК С 02 F 11. Біогазова установка з сонячним колектором / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201500972 ; заял. 09.02.2015 ; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.

66. Ратушняк Г. С. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула // Вісник ВПІ. – 2006. – № 2. – С. 26–32.

67. Кощєєв І. А. Моделювання процесу біоконверсії в біореакторі з нетрадиційними джерелами енергії з використанням нечіткої логіки / І. А. Кощєєв // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2015. – № 1. – С. 86–92.

68. Ратушняк Г. С. Вплив температурних режимів ферментації та седиментаційних параметрів субстрату на продуктивність біогазової установки / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна, І. А. Кощєєв // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2015. – № 1. – С. 61.

69. Ратушняк Г. С. Енергоефективність біоконверсії при термостабілізації анаеробного бродіння субстрату в біогазовій установці з тепловим насосом / Г. С. Ратушняк, І. А. Кощєєв // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2012. – № 2. – С. 145–152.

70. Ратушняк Г. С. Використання геліоустановок для термостабілізації процесу виробництва біогазу / Г. С. Ратушняк, І. А. Кощєєв // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2014. – № 1. – С. 156–162.

71. Ратушняк Г. С. Моделювання теплових процесів енергоефективного біореактора з сонячним колектором / Г. С. Ратушняк, І. А. Кощєєв // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2014. – № 2. – С. 120–124.

72. Ратушняк Г. С. Моделювання енергоощадності біореактора з альтернативними джерелами енергії з використанням функцій належності лінгвістичних змінних / Г. С. Ратушняк, І. А. Кощєєв // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2015. – № 3. – С. 13–17.

73. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1976. – 279 С.

74. Бердыев О. Экспериментальное исследование теплообмена в установках по выработке биогаза : автореф. дисс. на соискание науч. звания канд. техн. наук : спец. 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» / Ашхабад : Солнце, 1989. – 24 с.
75. Качан Ю. Г. Біогазові установки та методи їх розрахунку / Ю. Г. Качан, Ю. В. Куріс, І. М. Левицька // Відновлювальна та нетрадиційна енергетика. – 2009. – № 5. – С. 46–52.
76. Друкований М. Ф. Альтернативні джерела енергії : монографія / М. Ф. Друкований, В. П. Янович. – Вінниця : ВНАУ, 2016. – 495 с.
77. Панцхава Е. С. Метангенерация твердых органических отходов городов / Е. С. Панцхава, Е. В. Давиденко // Биотехнология. – 1990. – № 4. – С. 49–53.
78. Ратушняк Г. С. Визначення енергетичних складових моделі енергоефективного біореактора з використанням сонячної енергії / Г. С. Ратушняк, І. А. Кощев // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 3. – С. 41–45.
79. Ротштейн О. П. Soft Computing в біотехнології: багатofакторний аналіз і діагностика : монографія / О. П. Ротштейн, Є. П. Ларюшкін, Ю. І. Мітюшкін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 144 с.
80. Богословский В. Н. Справочник проектировщика : Книга 1. Ч. 3. / В. Н. Богословский ; под. ред. Н. Н. Павлова. – 4-е. изд. – М. : Стройиздат, 1992. – 320 с.
81. Будівельна кліматологія : ДСТУ НБВ.1.1–27:2010. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 123 с. (Офіційне видання).

*Наукове видання*

**Ратушняк Георгій Сергійович  
Лялюк Олена Георгіївна  
Кощесв Іван Анатолійович**

# **БІОГАЗОВІ УСТАНОВКИ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ БІОМАСИ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено О. Лялюк, І. Кощесвим

Підписано до друку .....  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. ....  
Наклад 100 прим. Зам № .....

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-81-59.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.