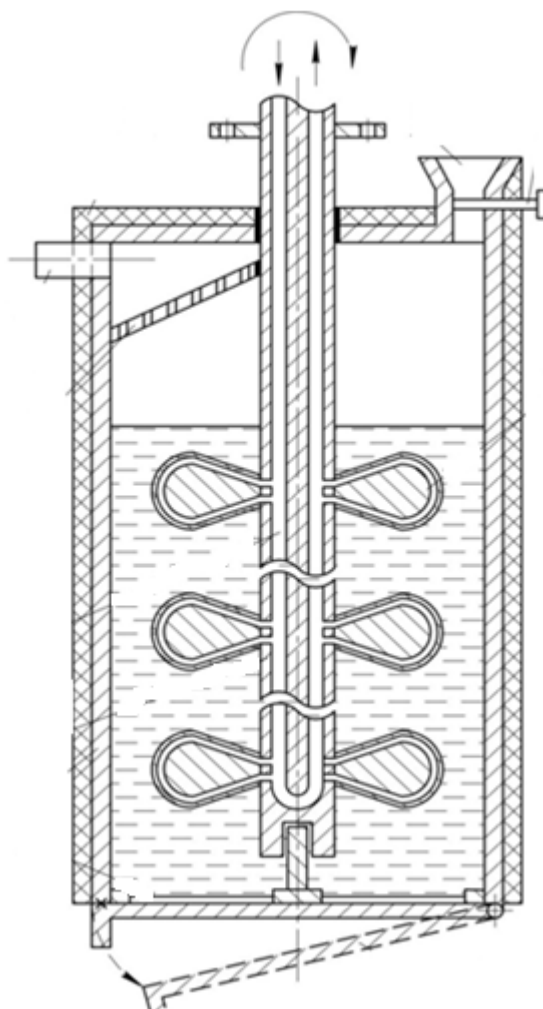


Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула , К. В. Анохіна

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 728.1

ББК 31.38

P25

Рецензенти:

Е. С. Малкін, доктор технічних наук, професор

О. М Зайцев, доктор технічних наук, професор

С. Й. Ткаченко, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки "Будівництво". Лист № 1/11-4621 від 01.06.2010 р.

Ратушняк, Г. С.

P25 Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання : навчальний посібник / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 170 с.

ISBN

В посібнику розглянуто основні джерела альтернативного енергозабезпечення фермерських господарств. Особлива увага надана біогазу як перспективному паливу. Запропоновано оригінальні конструкції реакторів для покращення процесів проходження анаеробного бродіння. Наведено основні методики підготовки біогазу до використання. Запропоновано нову методику інтелектуальної підтримки прийняття рішень з управління організаційно-технологічними механізмами підвищення продуктивності біогазових реакторів. Посібник розроблений згідно з програмою дисципліни "Енергозбереження та експлуатація в системах теплогазопостачання і вентиляції".

УДК 728.1

ББК 31.38

ISBN

© Г. Ратушняк, В. Джеджула, К. Анохіна, 2010

ЗМІСТ

Передмова.....	5
1 Сучасний стан та перспективи розвитку біогазових технологій на Україні	8
1.1 Альтернативна енергетика сучасності.....	8
1.2 Джерела відходів біомаси.....	9
1.3 Особливості анаеробного процесу бродіння в біогазових установках.....	14
1.4 Комплексна утилізація відходів населених пунктів	19
1.5 Фізико-хімічні властивості біогазу та біодобрих.....	23
2 Конструктивні особливості біогазових установок.....	25
2.1 Будова резервуару біогазових установок.....	25
2.2 Системи теплогазопостачання комплексу біогазової установки.....	36
2.3 Газгольдини систем біоконверсії.....	42
3 Шляхи підвищення ефективності роботи біогазових реакторів.....	46
3.1 Термостабілізація процесу анаеробного бродіння, тепловий баланс БГУ.....	46
3.2 Особливості нестационарного теплообміну в біогазовому реакторі.....	50
3.3 Тепловтрати в біогазових установках при різних температурних режимах анаеробного бродіння.....	54
3.4 Багатошарові захисні конструкції біогазових реакторів.....	61
3.5 Шляхи вдосконалення устаткування для інтенсифікації процесу анаеробного бродіння субстрату в БГУ.....	67
3.5.1 Барботажна інтенсифікація теплообміну між теплообмінником і середовищем.....	71
3.5.2 Вібраційна інтенсифікація процесів анаеробного бродіння	74
3.5.3 Перемішувальні пристрої для інтенсифікації теплообмінного процесу анаеробного бродіння	80
3.5.4 Конструкції біогазових установок з інтенсифікацією анаеробного бродіння шляхом перемішування субстрату.....	82
4 Енергозберігаюче управління процесами біоконверсії.....	92
4.1 Контроль та управління процесами анаеробного бродіння.....	92
4.2 Підготовка біогазу для використання в теплотехнічному обладнанні.....	98
4.2.1 Водяне очищення	100
4.2.2 Очищення газів від вуглекислого газу та сірководню розчинами етаноламінів.....	102

4.2.3 Очищення біогазу від діоксиду вуглецю гарячим розчином поташу.....	105
4.2.4 Лужне очищення біогазу від вуглекислого газу.....	106
4.2.5 Очищення біогазу від діоксиду вуглецю методом низькотемпературної абсорбції метанолом.....	108
4.2.6 Безупинна біокаталітична технологія очищення від сірководню біогазу	109
4.3 Енергозберігаючі технологічні схеми роботи біогазових установок.....	110
4.4 Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень з управління технологічними механізмами підвищення продуктив- ності біогазових реакторів.....	115
5 Комплексне енергозберігаюче теплохолодопостачання приватного будинку.....	133
5.1 Сонячні установки для отримання гарячої води.....	133
5.2 Комбіноване тепlopостачання з використанням біогазових установок і котлів, що працюють на соломі.....	141
5.3 Теплонасосні установки для комбінованого виробництва тепла і холоду в приватному господарстві.....	145
5.4 Приклад розрахунку теплового насоса.....	152
5.4.1 Розрахунок теплового навантаження	152
5.4.2 Розрахунок джерела тепла	153
5.4.3 Гідравлічний розрахунок ґрунтового колектора	157
5.4.4 Розрахунок економічної ефективності парокompресійного теплового насоса.....	159
5.5 Вітрова енергетика в приватних господарствах України.....	162
Додаток А.....	165
Додаток Б.....	166
Словник.....	169
Література.....	171

Передмова

Україна за рахунок своїх національних ресурсів може забезпечити лише на 50% потреби в паливі при сучасному рівні його споживання. Зменшити витрати енергоносіїв можна за рахунок енергозбереження до 50% всього енергоспоживання шляхом впровадження інноваційних технологій. Неосвоєним джерелом енергії є відновлювальні місцеві енергоресурси, потенціал яких сягає понад 100 млн. тонн умовного палива. Використання таких енергоресурсів становить щорічно лише 0,02 %.

Згідно з Постановою Верховної Ради України «Про проект розвитку паливно-енергетичного комплексу України до 2010 року» і за «Проектом національної енергетичної програми України до 2010 року» частка нетрадиційних і поновлювальних джерел у загальних об'ємах виробництва електричної енергії становитиме 8%, що може забезпечити економію в об'ємі 7,1 млн. тонн умовного палива щорічно.

До сучасних технологій виробництва нетрадиційних відновлювальних джерел енергії слід віднести:

- використання сонячної енергії для систем теплопостачання за допомогою колекторів і систем пасивного сонячного опалення;
- використання геотермальної води для теплопостачання;
- використання теплових насосів малої та середньої потужності для теплопостачання окремих будинків і утилізації теплових викидів, а великої потужності – в теплонасосних станціях для заміни малих і середніх котелень;
- виробництво біодизельного палива з ріпака та соняшника;
- отримання електричної енергії при використанні мініГЕС на річках;
- отримання електричної енергії при використанні вітрогенераторів;
- використання відходів сільськогосподарської продукції для отримання біогазу як палива та екологічно чистих органічних добрив.

В умовах подорожчання енергоносіїв та погіршення екологічної ситуації значну увагу слід приділити альтернативним джерелам енергозабезпечення. Наявні в Україні і в Вінницькому регіоні природні ресурси дозволяють використовувати свій потенціал для життєдіяльності малих та великих фермерських господарств, сільськогосподарських товариств, міст. Сучасна альтернативна енергетика представлена широким спектром засобів та джерел. Тому, враховуючи природно-кліматичні умови України і Вінницького регіону зокрема, можна зробити висновок про найбільшу перспективність поширення біогазових технологій. Використання біогазу у побуті як палива дозволить не тільки вирішити

енергетичну проблему на селі, але й покращити екологічний стан, отримати цінне добриво після переробки відходів у біореакторі.

Нааявні у кожному господарстві великі обсяги органічних відходів доцільно утилізувати з максимальним сумарним ефектом вирішення комплексних задач: енергетичної, екологічної, постачання власного господарства добривами, запобігання зараженню ґрунтових вод тощо.

Біогазові реактори в Україні не набули значного поширення у зв'язку з їх значною вартістю, примхливістю технології метанового бродіння, значним енергоспоживанням. Відхилення температури на 3°C від оптимальної для процесу вже сповільнює метаногенез. Значний вплив на протікання процесів виробництва біогазу має рухливість середовища, відсутність застійних зон, термостабілізація. В холодний період необхідно звести до мінімуму втрати тепла на підігрів субстрату та рівномірно розподілити тепло по всьому об'єму реактора. Практично відсутні засоби автоматизації процесу виробництва біогазу. Але необхідно пам'ятати, що зупинка реактора на годину може призвести до енергетичних проблем у підприємстві, оскільки процес бродіння пов'язаний з життєдіяльністю анаеробних бактерій і вони відновлюють свою активність після зупинки лише через декілька днів або тижнів. Процес потребує адаптації до умов України і постійного автоматичного моніторингу. Для умов українського села потрібні дешеві і надійні реактори, що будуть однаково ефективні як теплу пору року, так і в холодну.

Вирішення цих проблем потребує розроблення нових моделей і конструкцій реакторів, які повинні бути недорогими, енергоефективними, повинні мати автоматизоване управління, пристосовані до умов роботи в Україні. При їх конструюванні необхідно враховувати сучасні досягнення теплоенергетики, вирішувати специфічні задачі теплообміну у субстратах, використовувати останні досягнення автоматизації.

В даному посібнику, призначеному для студентів будівельних та екологічних спеціальностей, наведено основні джерела біомаси, їх ресурс для України, конструктивні особливості біогазових реакторів, а також описано особливості протікання анаеробного бродіння в біореакторах. Авторами наведено власні розробки конструкцій реакторів, а також результати експериментів з інтенсифікації та термостабілізації процесів бродіння. Класифіковано способи очищення біогазу від шкідливих домішок, наведено схеми управління та автоматизації процесів виробництва біогазу. Запропоновано методику моделювання

інтелектуальної підтримки прийняття рішень з управління організаційними механізмами підвищення продуктивності біогазових реакторів.

Наукове обґрунтування підходу до проблеми управління організаційними рішеннями ґрунтується на теорії нечітких множин та лінгвістичної змінної, які базуються на ідеях професора О. П. Ротштейна. Експертно-модельована система дозволяє враховувати кількісні і якісні характеристики типу і якості сировини, конструкції реакторів та параметри стабільності режиму, а саме тип інтенсифікації та вплив вібрації при прогнозуванні роботи біогазових установок.

Авторами запропоновано результати власних експериментальних і чисельних досліджень процесів інтенсифікації та термостабілізації анаеробного бродіння в біогазових реакторах, енергозберігаючі схеми і технології. Розглянуто і наведено розрахунки пристроїв для виробництва теплової енергії – теплових насосів, геліоколекторів лідерів світового виробництва.

При викладенні матеріалу навчального посібника використана сучасна нормативна база України, результати наукових досліджень та практичний досвід впровадження біогазових технологій у будівництві. Матеріал посібника враховує специфіку програм дисциплін підготовки інженерів-будівельників. Посібник призначений для активізації самостійної роботи студентів та буде сприяти розвитку енергоощадного мислення в отриманні знань і навичок при проектуванні інноваційних технологій. Також інформація, наведена в посібнику, буде корисна для інженерно-технічних працівників і всіх бажаючих досягнути енергетичної незалежності.

Автори вдячні рецензентам за поради та зауваження, врахування яких сприяло покращенню змісту даного навчального посібника.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ СИСТЕМ БЮКОНВЕРСІЇ

1.1 Альтернативна енергетика сучасності

Нафтові та газові кризи, погіршення екологічної ситуації змусили суспільство шукати шляхи задоволення своїх енергетичних потреб не тільки за рахунок вичерпних енергоресурсів, але й використовуючи нетрадиційні джерела. Україна задовольняє власні потреби в енергоресурсах на рівні 50%, тобто всі інші ресурси доводиться імпортувати. В середині минулого століття гостро постало питання енергозбереження. За рахунок енергозбереження в господарствах різних форм власності можливо досягти значної економії ресурсів та коштів. У серпні 1994 р. Верховною Радою України було прийнято Закон про енергозбереження [1], яким передбачено комплекс державних програм з енергозбереження та впровадження альтернативних джерел енергії. У 1996 році прийнята Національна енергетична програма до 2010 р., затверджена Верховною Радою України, яка передбачає використання альтернативних джерел енергії до 10% від загального енергоспоживання.

Сприяння поширенню альтернативних джерел енергопостачання відбувається як на місцевому, так і на загальнодержавному рівні. Зокрема, згідно з Законом України «Про альтернативні джерела енергії», основними засадами державної політики у сфері альтернативних джерел енергії є [2]:

- нарощування обсягів виробництва та споживання енергії, виробленої з альтернативних джерел з метою економного витрачання традиційних паливно-енергетичних ресурсів та зменшення залежності України від їх імпорту шляхом реструктуризації виробництва і раціонального споживання енергії за рахунок збільшення частки енергії, виробленої з альтернативних джерел;

- додержання екологічної безпеки за рахунок зменшення негативного впливу на стан довкілля при створенні та експлуатації об'єктів альтернативної енергетики, а також при передачі, транспортуванні, постачанні, зберіганні та споживанні енергії, виробленої з альтернативних джерел;

- додержання безпеки для здоров'я людини на об'єктах альтернативної енергетики на всіх етапах виробництва, а також при передачі, транспортуванні, постачанні, зберіганні та споживанні енергії, виробленої з альтернативних джерел;

- науково-технічне забезпечення розвитку альтернативної енергетики, популяризація та впровадження науково-технічних досягнень

у цій сфері, підготовка відповідних фахівців у вищих та середніх навчальних закладах;

- додержання законодавства всіма суб'єктами відносин, пов'язаними з виробництвом, збереженням, транспортуванням, постачанням, передачею і споживанням енергії, виробленої з альтернативних джерел;

- додержання умов раціонального споживання та економії енергії, виробленої з альтернативних джерел;

- залучення вітчизняних та іноземних інвестицій і підтримка підприємництва у сфері альтернативних джерел енергії, в тому числі шляхом розробки і здійснення загальнодержавних і місцевих програм розвитку альтернативної енергетики.

До сучасних технологій виробництва нетрадиційних джерел енергії з метою енергозбереження слід віднести:

- використання відходів сільськогосподарської продукції для отримання біогазу як палива;

- використання сонячної енергії для систем теплопостачання за допомогою колекторів і систем пасивного сонячного опалення;

- використання геотермальної води для теплопостачання;

- використання енергії вітру;

- використання енергії малих річок;

- використання теплових насосів малої та середньої потужності для теплопостачання окремих будинків і утилізації теплових викидів;

- виробництво біодизельного палива.

Використання енергії сонця, вітру та низькопотенційних ресурсів потребує встановлення дорогого і складного обладнання, яке не завжди спроможне фермерське господарство купити. Так, наприклад, вартість якісного іноземного теплового насоса може коливатися в межах від декількох десятків тисяч до мільйонів гривень. Використання процесу анаеробного бродіння як джерела альтернативного енергозабезпечення дасть можливість за досить невеликі кошти вирішити комплексну задачу щодо збереження навколишнього середовища, вирішення енергетичної проблеми господарства та утилізації органічних відходів з метою охорони довкілля.

1.2 Джерела відходів біомаси

Відходи біомаси – це цінна сировина для харчової, хімічної, переробної, легкої промисловості та в системах біоконверсії.

Використовувати її як паливо необхідно не в останню чергу. Слід враховувати, що в процесі господарської діяльності велика кількість біомаси залишається не використаною. Так, при заготівлі деревини та її переробці з відходами втрачається близько 50% біомаси. До основних джерел біомаси належать:

- відходи тваринництва;
- рослинні залишки сільськогосподарського виробництва – солома, листя, стружка;
- тверді побутові відходи комунального господарства міст;
- промислові відходи і побутові відходи міст.

Відходи тваринництва є одним з найперспективніших джерел отримання енергії шляхом анаеробного бродіння в біореакторах [3]. Вони є в будь-якому господарстві, не вимагають попередньої обробки і сортування, їх не важко транспортувати.

Потенціал відходів тваринництва для їх використання в системах біоконверсії з метою енергозбереження в Україні значний (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Енергетичний потенціал відходів тваринницького комплексу України (станом на 2007 р)

Джерело відходів	Вихід відходів, 10 ⁶ т/рік	Вихід біогазу, 10 ⁹ м ³ /рік	Нижча теплота згорання Q _н ^p , МДж/м ³	Енергетичний потенціал відходів, млн. т. у. п./ рік
Велика рогата худоба	58,4	1,46	23	1,144
Свині	4,79	0,124	21	0,088
Птахи	2,8	0,11	21	0,079
Всього	65,99	1,694	-	1,311

У коливанні поголів'я домашньої худоби намітилася тенденція до зменшення кількості тварин у колективних господарствах, але зростання їх кількості в індивідуальних. Таким чином, загальна кількість виходу відходів, які можна використовувати в системах біоконверсії, залишається майже незмінною.

Рослинні залишки – це відходи лісопереробної галузі та відходи сільськогосподарського господарства. При заготівлі лісу та подальшій його переробці з відходами втрачається близько 50% деревини. Ця біомаса у вигляді тирси, листя, гілок вивозиться на полігони, де гниє чи спалюється на місці, таким

чином погіршуючи екологічний стан довкілля. У сільськогосподарському виробництві основними залишками біомаси є солома та сіно. Для рослинних залишків характерною є особливість сезонної відтворюваності. Пік використання їх припадає на другу половину літа та осінь. Можливість використання рослинних залишків для виробництва енергії залежить від характеру переважної культури, якою засівають більші площі, і від кількості залишків, які можуть бути зібрані з одиниці посівної площі. Польові культури дають більше рослинних залишків, ніж овочеві. У грубому наближенні кількість рослинних залишків, що збирають, для даної сільськогосподарської культури можна визначити шляхом множення маси даної культури на характерну для неї частку залишку, що є відношенням сухої маси наземних залишків до маси зібраного з польовою вологістю врожаю. Ці коефіцієнти для основних сільськогосподарських культур становлять: пшениця - 0,47-1,75; кукурудза - 0,55-1,20; бавовна - 1,20-3,0; цукровий буряк - 0,07-0,20.

У Вінницькій області великий потенціал для перероблення в біореакторах має солома, що залишається від зернових культур (табл 1.2)

Таблиця 1.2 – **Валовий збір зернових у Вінницькій області у 2007 році**

Назва культури	Площа збору, тис. га	Об'єм зерна, тис. тонн	Об'єм соломи, тис. тонн
Озима пшениця	343	936	748,8
Жито озиме	27	61	48,8
Ячмінь озимий	20	56	44,8
Ячмінь ярий	209	520	416
Пшениця яра	15	36	28,8
Овес ярий	16	34	27,2
Просо	5	4	3,2
Гречка	54	36	28,8
Горох	40	84	67,2
Квасоля	11	23	18,4
Всього	740	1790	1432

Полігони твердих побутових відходів (ТПВ) міст та промислових підприємств займають великі площі, отруюють навколишнє середовище, є розплідниками для пацюків, мишей та інших тварин. Згідно з дослідженнями [4], на одну людину припадає близько 300...700 кг твердих побутових відходів на рік. Склад ТПВ міст наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Склад ТПВ міст

Компоненти	Вміст, по масі, %
Папір	43,2
Метали	8,0
Скло, кераміка, ґрунт	10,8
Пластмаси, гума, ганчір'я	4,5
Харчові й тваринні відходи	23,5
Інші відходи	10,0
Разом	100

В Україні 92% ТПВ міст залишаються непереробленими, тоді як у західних країнах частка біогазових установок з переробки даного виду сировини постійно зростає і є досить значною (табл. 1.4).

З промислових відходів для перероблення становлять інтерес тільки відходи харчового і спиртового виробництва, оскільки в них велика кількість органічних речовин. Велика кількість вологи в відходах даного типу дозволяє використовувати їх для анаеробного бродіння в біогазових реакторах.

Таблиця 1.4 – Виробництво біогазу на полігонах ТПВ у деяких державах

Держава	Кількість установок, шт	Вихід біогазу, млн.м ³ /рік
США	244	4300
Німеччина	98	400
Англія	33	178
Швеція	24	60
Італія	13	38
Франція	9	50
Данія	6	8,5

У Вінницькій області зосереджена велика кількість спиртових заводів, переробка стічних вод яких дозволить отримувати значну кількість біогазу. Вихід біогазу з 1 м³ таких відходів становить 28...30 м³. На одному заводі середньої потужності можливо отримати за добу 24000 м³, а за рік близько 6 млн. м³ біогазу, що дозволить зменшити витрати тільки на виробництво спирту близько 40%.

Загальну кількість органічних відходів, що утворюються в СНД та Україні, наведено в таблиці 1.5. Як видно, потенціал отримання біогазу в нашій країні надзвичайно великий. Перероблення органічних відходів в

біогазових реакторах дозволило б вирішити значною мірою енергетичну проблему на селі та у фермерських господарствах України.

Таблиця 1.5 – Утворення органічних відходів за масою сухої речовини (СР) в республіках СНД і на Україні, млн. т

Галузі утворення органічних відходів	СНД	Україна
Тваринництво і птахівництво	230	46
Рослинництво	160	32
Тверді відходи міст	60	12
Стічні каналізаційні води	7	1,4
Відходи деревообробної, харчової і інших галузей промисловості	43	8,6

Кожен з видів органічних відходів дозволяє отримати при анаеробній переробці певну кількість біогазу з різним вмістом у ньому метану (таблиця 1.6).

Таблиця 1.6 – Вихід біогазу і вміст у ньому метану при використанні різних видів відходів [3, 5, 6]

Вихідна сировина	Вихід біогазу на 1 кг сухої речовини, л/кг	Вміст метану (CH ₄), %
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

1.3 Особливості анаеробного процесу бродіння в біогазових установках

Оскільки розкладання органічних відходів відбувається за рахунок діяльності певних типів бактерій, то істотний вплив на нього робить навколишнє середовище. Кількість вироблюваного газу значною мірою залежить від температури: чим тепліше, тим більші швидкість і ступінь ферментації органічної сировини. Саме тому перші установки для одержання біогазу з'явилися в країнах з теплим кліматом. Однак застосування надійної теплоізоляції, а іноді і підігрітої води, дозволяє освоїти застосування генераторів біогазу в районах, де температура узимку опускається до мінус 20°C.

Існують також певні вимоги до сировини. Вона повинна бути придатна для розвитку бактерій, містити органічну речовину, що біологічно розкладається, й у великій кількості воду (90-94%). Бажано, щоб середовище було нейтральним і без речовин, що заважають дії бактерій. Такими речовинами є, наприклад, мило, пральні порошки, антибіотики тощо.

Для одержання біогазу можна використовувати рослинні і господарські відходи, гній, стічні води та інші відходи. У процесі ферментації суміш в резервуарі має тенденцію до поділу на три фракції. Верхня – кірка, утворена з великих часток, яка захоплюється пухирцями газу, що піднімаються. Через якийсь час вона може стати досить твердою і буде заважати виділенню біогазу. У середній частині ферментатора накопичується рідина. В нижній частині фракція випадає в осад.

Бактерії найактивніші в середній зоні. Тому вміст резервуара необхідно періодично перемішувати, бажано до шести разів на добу. Перемішування може здійснюватися за допомогою механічних пристосувань гідравлічними засобами (під дією насоса), під напором пневматичної системи (часткова рециркуляція біогазу) чи за допомогою різних методів самоперемішування.

Анаеробне бродіння в біореакторі процес складний і хиткий, на нього впливають як зовнішні, так і внутрішні чинники. Основні фактори, що впливають на процес бродіння [3, 5 - 7]:

- зовнішня температура;
- внутрішня температура середовища;
- лужність середовища, рН;
- наявність речовин інгібіторів;
- фракційний склад субстрату та його вологість і в'язкість;

- час бродіння;
- інтенсивність перемішування;
- вплив хімічного складу та типу вихідного матеріалу;
- термостабілізація процесу бродіння;
- тиск в системі;
- будова резервуара.

Вплив деяких із наведених чинників є досить значним і недотримання технологічних меж може зупинити процес. Інші мають не такий критичний вплив, але при сукупності дії всіх чинників їх ефект додається.

Жорсткість середовища повинна бути для нормального процесу бродіння в межах 1500...5000 мг CaCO₃ на 1 літр субстрату, а значення рН в межах 6,5...7,5. До речовин, що сповільнюють процес бродіння, належать солі важких металів, антибіотики, аміак, розчинники, лужні метали, поверхнево активні речовини, що містяться у пральних засобах. Наприклад, гранично допустима концентрація міді складає 10 мг на 1 літр субстрату, нітратів – 50 мг/л., аміаку – 1500 мг/л. Субстрат для анаеробного бродіння є суспензією з концентрацією сухої речовини 2...12%. Довжина стебел соломи, що може знаходитися в ньому, не повинна перевищувати 3 см. Більш великі значення наведених речовин призведуть до збільшеної в'язкості середовища, а відповідно до ускладнень при перемішуванні і утворенні бульбашок газу. Велика в'язкість середовища не дозволить отриманим бульбашкам газу вільно прориватися через нього назовні.

Процес утворення метану відбувається у три основні стадії (рис 1.1): на першій стадії ферментативні бактерії гідролізують органічну речовину субстрату з утворенням кінцевих продуктів у вигляді оцтової кислоти і інших ненасичених жирних кислот, CO₂ і водню.

На другій стадії ацетогенні бактерії виробляють водень і оцтову кислоту з кінцевих продуктів першої стадії. Третя стадія – розклад метаногенними бактеріями оцтової кислоти, CO₂ і водню в метан. У процесі розкладу важливе значення має наявність водню в системі.

Для теплотехнічних розрахунків біореакторів, оцінювання значення тепловіддачі від нагрівального елемента до середовища, визначення кількості тепла, необхідного для нагрівання сировини, потрібно знати теплофізичні властивості субстрату.

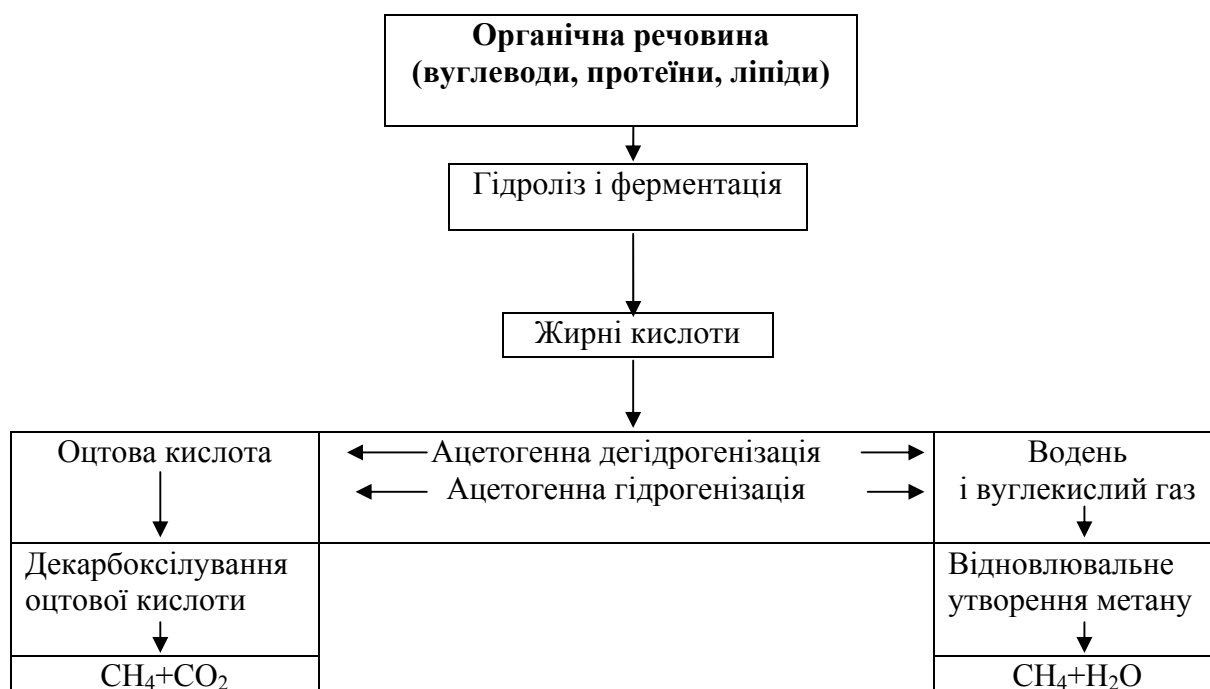


Рисунок 1.1 – Структура стадій розкладання органічної речовини

Для оцінювання значень теплоємності C , в'язкості μ та густини субстрату ρ доцільно користуватися залежностями [8-10]:

$$\rho = 1000 + 2,4 \cdot c, \quad (1.1)$$

$$C = C_{\text{сух}} \cdot c + C_{\text{в}} \cdot (1 - c), \quad (1.2)$$

$$\mu = \mu_{\text{в}} \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{10 \cdot (c - 2)}{(11 - \beta_u \cdot c)} + c \right) \right], \quad (1.3)$$

де c – вміст сухих речовин, 2-15%;

$C_{\text{сух}}$ – теплоємність сухої речовини субстрату;

$C_{\text{в}}$ – теплоємність води;

$\mu_{\text{в}}$ – в'язкість води при даній температурі;

β_u – коефіцієнт, що залежить від виду стоків і складає 0,7...0,75 для великої рогатої худоби та $\beta=0,6...0,7$ для свиней.

Час бродіння залежить від типу субстрату, заданої глибини розкладання органічних речовин, типу реактора, температурних режимів та інших чинників. Реактор може працювати в безперервному та в дискретному режимі.

Безперервний режим дозволяє постійно отримувати біогаз, але вимагає великої кількості органічної маси та спеціальних конструкцій реакторів. Найбільший вихід біогазу спостерігається при надходженні в реактор такої кількості органічної маси, яка на даний час вже розклалася. В іншому випадку кількість наявних бактерій буде не в змозі розкласти нову порцію органіки і процес буде проходити повільніше. Дискретний режим дозволяє отримати більшу кількість біогазу з одиниці маси речовини, але потребує на ферментацію більше часу. Збільшення часу бродіння дозволяє більш глибоко розкласти органічні речовини, таким чином зменшуючи токсичність шламу, що залишається після бродіння, покращити якість біогазу, збільшуючи концентрацію CH_4 . Оптимальним вважається час бродіння 10...20 діб. За цей період досягається максимальна якість отриманого біогазу та максимальне розкладення органіки. Оптимальне завантаженням робочого об'єму біореактора для різних видів органічних речовин наведено в таблиці 1.7 [3]:

Таблиця 1.7 – Завантаження робочого об'єму реактора, час перебування і розкладання органічних речовин при температурі 33°C

Джерела органічних відходів	Завантаження органіки на 1м ³ реактора на добу, кг	Час бродіння, діб	Ступінь розкладення маси, %
Дійні корови	6,0	15	40
Бички	4,5	10	40
Свині	3,0	10	50
Кури	1,5	50	55

Авторами запропонована оригінальна конструкція біореактора для безперервного циклу бродіння [11]. В основу конструкції покладено задачу створення біогазового реактора, в якому за рахунок введення нових елементів та зв'язків досягається збільшення продуктивності біогазового реактора та економія часу при виробництві біогазу.

На рис. 1.2 подано загальну схему запропонованої конструкції біогазового реактора. Пристрій містить резервуар 1, який зверху закритий ковпаком 2 з шахтами завантаження біомаси 12 і заслінками 8, та поділений провальними колосниковими решітками 4 з можливістю зміни гідравлічного опору за допомогою регулятора 13 на три секції 9. В кожній

з секцій знаходиться підігрівач біомаси 3. Ковпак 2 встановлюється з можливістю його руху по напрямних 10 і містить труби споживача 6, які сполучені з кожною секцією. Також кожна секція 9 резервуара 1 має оглядові вікна 11. Ємність 5 з заслінкою 7 для збору біодобрив знаходиться в нижній частині резервуара 1.

Реактор працює таким чином. При завантаженні біомаси в резервуар 1 через шахти завантаження біомаси 12 подачу регулюють заслінками 8. Біомаса опиняється в першій секції 9 резервуару 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. В першу секцію завантажується нова порція біомаси. Отриманий біогаз відводиться за допомогою труб споживача 6. Третя стадія бродіння біомаси проходить в нижній секції 9 резервуара 1, де після завершення бродіння біомаса потрапляє в ємність збору біодобрив 5, завантаження якої регулюється заслінкою 7. За процесом бродіння візуально спостерігають за допомогою оглядових вікон 11. При необхідності відкрити резервуар 1 ковпак 2 рухається по напрямних 10 і знімається.

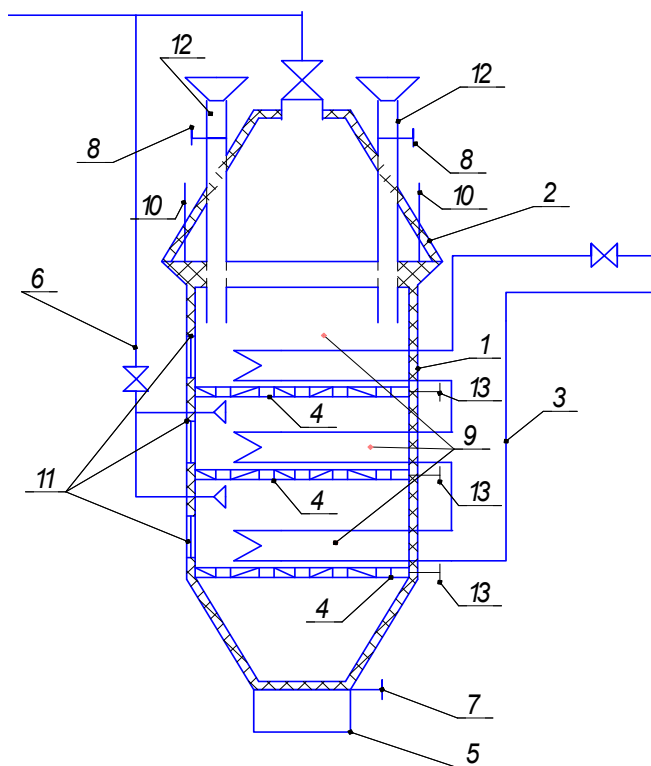


Рисунок 1.2 – Біогазовий реактор з безперервним циклом бродіння

Регуляція гідравлічного опору провальних колосникових решіток відбувається за рахунок регулятора 13. Конструкція такого біореактора також забезпечує безперервність завантаження біомаси та роботу без зупинення біогазового реактора, безперервне отримання біогазу, перемішування біомаси при провалюванні крізь колосникові решітки, можливість візуального контролю процесу бродіння та регуляції отримання біодобрив й біогазу, збільшення продуктивності біогазового реактора.

Процес бродіння відбувається у три стадії. На першій стадії шляхом гідролізу розкладаються вуглеводи, жири, білки на низькомолекулярні органічні сполуки. Другий етап протікає за участі кислотоутворювальних бактерій, що розкладають низькомолекулярні сполуки, вуглеводи та жири на кислоти, солі, спирти, вуглекислий газ, водень, сірководень та аміак. На третьому етапі відбувається безпосереднє метанове бродіння, коли органічні речовини розкладаються на метан і вуглекислий газ.

1.4 Комплексна утилізація відходів населених пунктів

Відходи населених пунктів видаляються системами сплавної і вивізної каналізації. Тверді побутові відходи вивозяться за межі міст на полігони для зберігання, рідкі відходи транспортуються системами трубопроводів до очисних споруд, де відбувається очищення та скидання води у водойми [12-16] (рис 1.3).

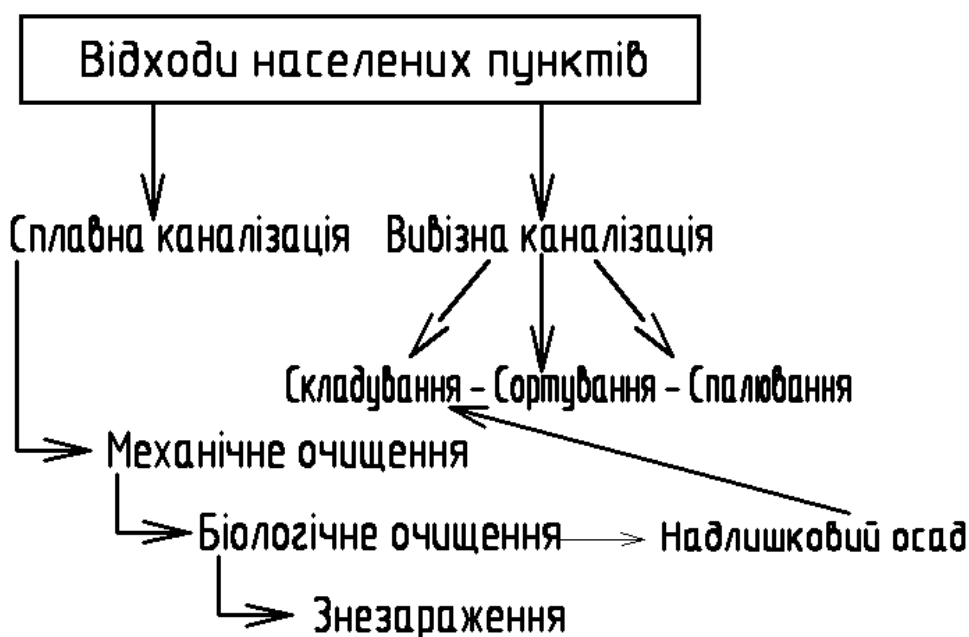


Рисунок 1.3 – Схема утилізації відходів населених пунктів

Переважними процесами утилізації відходів є: для рідких відходів – механічне очищення від залишків та сміття у решітках та піскоуловлювачах з отриманням рідкого осаду, біологічне очищення у аеротенках та біоставках або полях фільтрації; знезараження хлором і випуск очищених стічних вод у водойми. Для твердих побутових відходів (ТПВ) переважним методом утилізації є складування на полігонах.

На даний час актуальним є більш глибока і енергоефективна переробка відходів міст, яку пропонується виконувати за такою схемою (рис. 1.4). Сплавну каналізацію після механічного очищення направляти на біологічну переробку в метантенки для отримання подвійного ефекту: очищення стічних вод і отримання біогазу. Фактором, що буде обмежувати вихід біогазу, є наявність поверхнево-активних речовин у стічних водах. При біологічному очищенні стічних вод і сирого осаду буде утворюватися надлишковий осад, який рекомендується направляти на спалювання. Вивізну каналізацію рекомендовано спочатку направляти на сортування для видалення металу, скла, паперу та інших матеріалів, що можна переробляти, а органічні відходи та несортоване сміття спалювати у установках для спалювання сміття разом з надлишковим осадом.

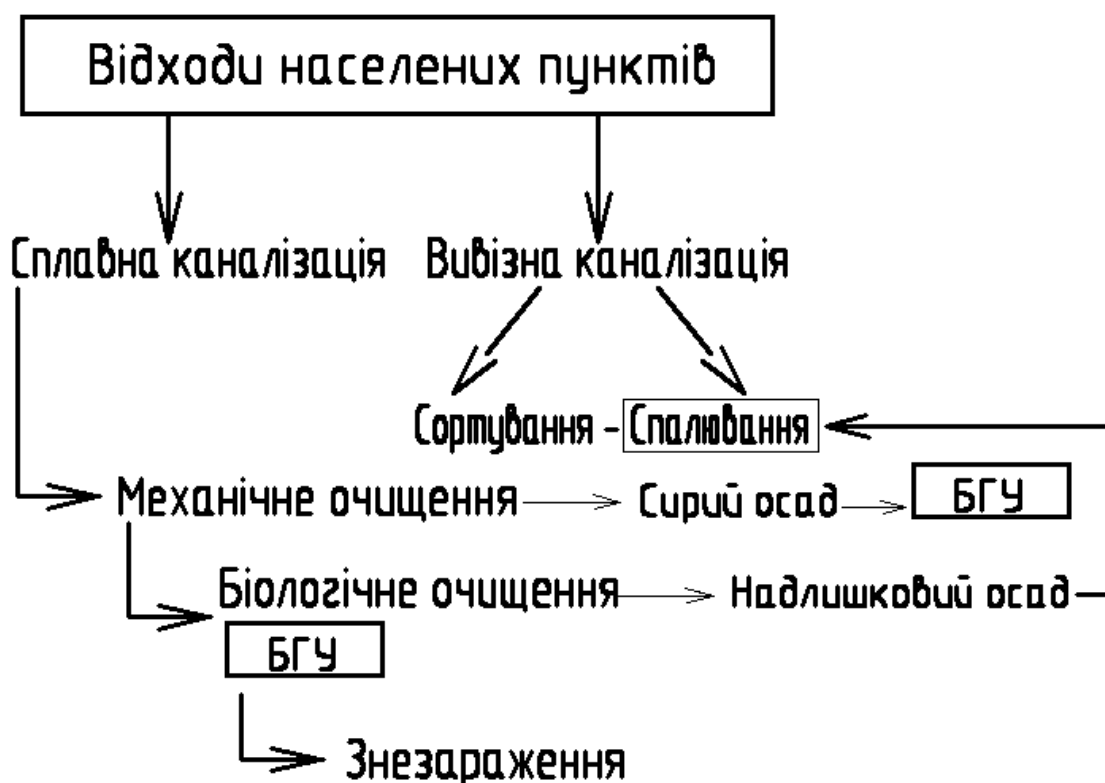


Рисунок 1.4 – Енергозберігаюча схема утилізації відходів населених пунктів

На рис 1.5 наведено схему установки для спалювання сміття. Суміш твердих побутових відходів після сортувальної станції та надлишкового осаду від очисних споруд потрапляє у приймальну камеру 1. Вологість даної суміші в середньому складає 20...25%, негорючих речовин біля 20%. Теплота згорання даних відходів варіюється в межах 6...12 МДж/кг. Подача відходів регулюється таким чином, щоб забезпечити рівномірність проходження їх через пристрій. Рух відходів відбувається під дією сили ваги, в зоні 2 відбувається висушування, а в зоні 3 – піроліз. Підігріте до 1000 °С повітря подається вентилятором 5 у зону горіння 4. В зоні горіння 4 відбувається окислення піролізного газу і плавлення негорючих компонентів. Шлак, що утворюється з негорючих елементів, відводиться через гідрозатвор у шлакоприймач 6. Газовий потік, що утворюється при горінні відходів, містить у собі біля 90% тепла від спалювання.

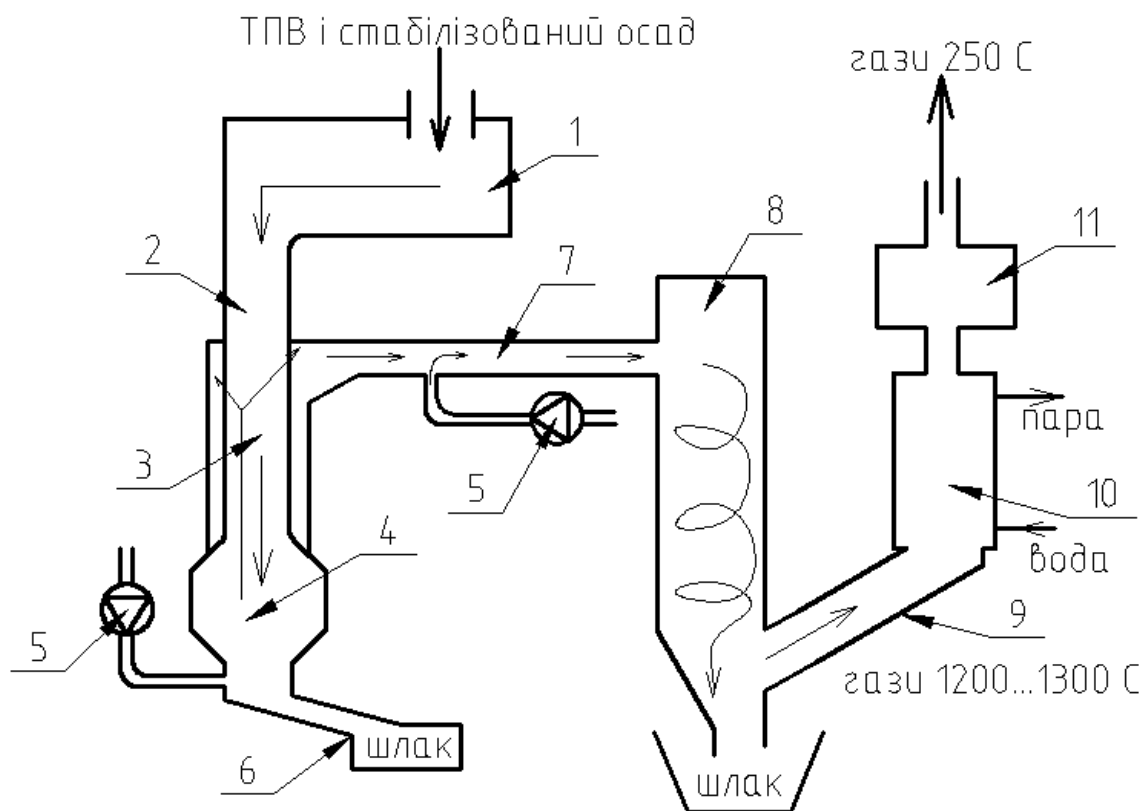


Рисунок 1.5 – Установка для спалювання відходів

Склад газового потоку такий: оксид вуглецю, діоксид вуглецю, водень, водяна пара і вуглеводні. При доокисленні даної суміші в камері вторинного горіння 8 при температурі 1100...1300 °С утворюється рідкий шлак з завислих речовин газового потоку. Повітря для доокислення

підігривається регенеративними підігривачами – рекуператорами і подається вентилятором 5. Для підігріву повітря на окислення витрачається близько 15% теплової енергії газів, все інше тепло направляється через газохід 9 на економайзер 10, де з води утворюється спочатку насичена пара, а потім перегріта. В результаті віддачі тепла димові гази охолоджуються до 250°C і потрапляють на систему газоочищення 11. Система газоочищення доводить якісний склад газів до такого: 70% азоту, 10% діоксиду вуглецю, інше – пара та кисень. Шлак, що утворюється при спалюванні, має об'єм в 10 разів менший вихідної маси і використовується при будівництві доріг.

Економайзер для утилізації тепла (рис. 1.6) встановлюється в газоході і розділяє потік газу на десятки струмин, що протікають по системі трубок, які омиваються водою. У верхній зоні економайзера з води утворюється пара, яка відводиться трубопроводом на пароперегрівач. Перегріта пара відводиться на потреби господарства.

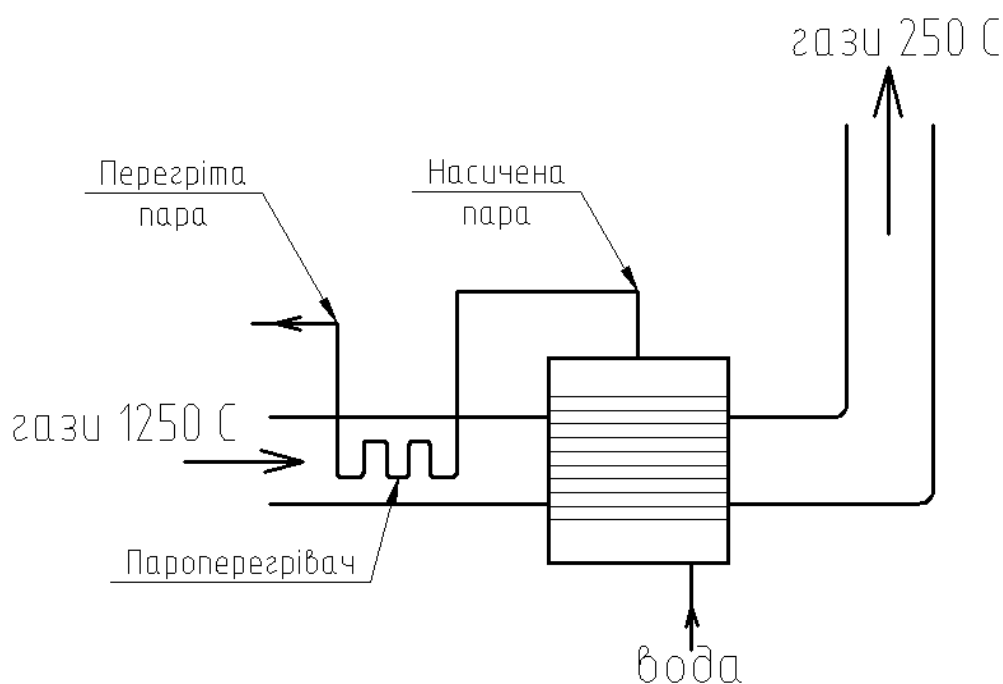


Рисунок 1.6 – Економайзер для утилізації тепла викидних газів

Таким чином, комплексна утилізація відходів дозволяє вирішити екологічну проблему забруднення повітря, ґрунтів та води, дозволяє отримувати біодобрива і шлак для дорожнього виробництва, а також біогаз та пару, яку потім можна використовувати на ТЕЦ для виробництва теплової і електричної енергії.

1.5 Фізико-хімічні властивості біогазу та біодобрив

Продукт анаеробного бродіння – біогаз – є багатокомпонентним газом, склад якого варіюється залежно від вихідної сировини, умов та часу бродіння. Основними компонентами біогазу є метан (50...70%), вуглекислий газ (25...45%). Також до складу входять сірководень та водень, загальна частка яких не перевищує 3%. Рівень баластових домішок в біогазі сягає рівня 50%, які не тільки перешкоджають використанню газу, але і шкодять обладнанню, трубопроводам та газгольдерам. Основні фізико-хімічні властивості біогазу наведено в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Фізико-хімічні властивості біогазу

Характеристика	Кількісний показник
Об'ємна теплота згоряння, МДж/м ³	21,5
Границя спалахування у повітрі, %	6...12
Температура займання, °С	650...750
Критичний тиск біогазу, МПа	7,5
Критична температура, °С	-2,5
Нормальна густина, кг/м ³	1,2

У результаті бродіння утворюється з органічної маси шлам, який є надзвичайно цінним добривом, що містить у собі велику кількість аміаку, з'єднань калію та фосфору. Шлам не має характерного запаху, що властивий вихідній масі до бродіння. В результаті термічної обробки гинуть хвороботворні бактерії та личинки шкідників. Оптимальним терміном бродіння для знешкодження переважної більшості бактерій є тридцять днів. Менший час бродіння може призвести до неповної стерилізації субстрату. Після оброблення в біогазовій установці шлам дозволяється зразу вивозити на поля як добрива, ніякої бактеріологічної небезпеки він не несе. Одночасно з бактеріями знешкоджується насіння рослин, що може знаходитися в субстраті. Біошлам доцільно розділяти на компоненти: рідка – тверда фази. Рідкою фазою можна виконувати полив, а тверду гранулювати, висушувати і вносити як добрива восени.

Контрольні питання

1. Які джерела альтернативної енергетики доцільно використовувати у фермерських господарствах України?
2. Які з відходів дозволяють отримати найбільшу кількість біогазу з 1 кг внесеної у реактор органічної речовини?
3. Які ви знаєте джерела біомаси?
4. Який енергетичний потенціал відходів в Україні?
5. Які фактори впливають на процес бродіння в біореакторі?
6. Яким повинен бути рівень рН і лужність у реакторі?
7. Що негативно впливає на бродіння?
8. Яка тривалість бродіння органічної речовини в реакторі для досягнення 40% розкладання її?
9. Як впливають температура і час на вихід газу з кілограму органічної речовини, внесеної в реактор?
10. Яка повинна бути вологість субстрату для нормального протікання процесу бродіння?
11. Наведіть основні фізико-хімічні властивості біогазу.
12. Як можна використовувати біошлам?
13. Яким чином можна утилізувати тверді побутові відходи міст?
14. Наведіть схему установки для спалювання відходів.
15. Наведіть схему економайзера і поясніть його призначення.
16. Чи можна вироблений біогаз зразу використовувати для горіння у плитах? Для заповнення балонів автомобілів?
17. Як визначити теплофізичні властивості субстрату?
18. Поясніть стадії розкладання органічної речовини при утворенні біогазу.
19. Поясніть принцип роботи біогазового реактора з безперервним циклом бродіння.

2 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

2.1 Будова резервуара біогазових установок

Резервуар біогазової установки є її основною частиною і вимоги до нього досить високі. До основних вимог належать: гідравлічні, технологічні, теплотехнічні, економічні та естетичні.

За формою резервуари бувають (рис. 2.1):

- яйцеподібні;
- циліндричні;
- кулеподібні;
- з конусом доверху; донизу; з обох боків;
- у вигляді траншеї;
- кубічні;
- еластичні.

Найоптимальнішими за своїми гідравлічними та експлуатаційними характеристиками є яйцеподібні резервуари. Далі за якостями протікання процесу йдуть резервуари з конусами та циліндричні резервуари. Ці форми дозволяють зменшити гідравлічний опір при перемішуванні субстрату, уникнути застійних зон, через відсутність кутків, локалізувати місця збирання шламу та біогазу. Основним матеріалом для виробництва резервуарів є бетон і полімерні матеріали.

За конструктивними особливостями біогазові установки поділяють на одно- та багатореакторні. Багатореакторні установки дозволяють досягти безперервного циклу бродіння та мають велику продуктивність, що дозволяє забезпечити потреби великого господарства біогазом.

Найпростіші за своїм виконанням циліндричні, кубічні та кулеподібні резервуари виробляють з старих металевих діжок, цистерн та інших ємностей, що використовуються в промисловості.

Біогазовий реактор – основа будь-якої біогазової установки, тому до його конструкції висуваються досить жорсткі вимоги. Корпус біогазового реактора повинен бути досить міцний при абсолютній герметичності його стінок. Обов'язковими є надійна теплоізоляція стінок та їх властивість протистояти корозії. При цьому необхідно передбачити можливість завантаження та вивантаження реактора, а також доступ до його внутрішнього простору для обслуговування [3]. Принцип роботи всіх біогазових установок однаковий: після збору й підготовки сировини, що полягає в доведенні її до необхідної вологості в спеціальній ємності, вона

подається в реактор, в якому створюються умови для оптимізації процесу анаеробного бродіння [15].

Практично досяжний в промисловій установці вихід газу залежить від багатьох факторів, вплив яких обумовлюється конструкцією установки та виробничими умовами. Суттєве значення впливу конструктивних параметрів мають такі фактори [3, 4]:

- завантаження робочого простору (кількість завантаженого субстрату, що припадає на одиницю чистого об'єму реактора, а також продуктивність його завантаження);
- технологічний час циклу анаеробного бродіння (час перебування в реакторі органічної маси, яка в нього закладена);
- інтенсивність перемішування субстрату в об'ємі реактора.

Більшу продуктивність мають багатореакторні установки, в яких забезпечується безперервний цикл анаеробного бродіння.

Класифікацію біогазових реакторів за конструктивними ознаками наведено на рис. 2.1.

Форми реакторів різноманітні. З точки зору створення найбільш сприятливих умов для перемішування рідкого субстрату, накопичення газу, видалення відпрацьованих добрив та руйнування кірки, що утворюється на поверхні, доцільно використовувати резервуар, який за формою нагадує яйце (рис. 2.2). Великі реактори такої форми зазвичай споруджують із бетону, тому для них характерна висока вартість виготовлення, що суттєво обмежує їх застосування. Проте реактори менших об'ємів зовсім нескладно виконати із склопластика, тобто із армованої поліефірної смоли, до того ж вони мають меншу вартість.

Для циліндричного резервуара з конусними верхньою та нижньою частинами, як і для яйцеподібних, характерні невеликий простір для накопичення газу, обмежений об'єм плаваючої кірки, а також зручне вивантаження відпрацьованої маси. Однак в подібних реакторах створюються менш сприятливі умови для переміщення рідкого субстрату. В індивідуальних господарствах корпус реактора вищевказаної форми, але меншої місткості, виготовляють із сталі або склопластика. В реакторах із склопластика створюються кращі умови для переміщення субстрату [3].

Циліндричні резервуари відносно прості у виготовленні, що пояснюється значним досвідом будівництва ємностей для сільськогосподарських цілей (сталеві, бетонні, склопластикові цистерни-бункери для силосу та інших кормів) [14].



Рисунок 2.1 – Класифікація біогазових реакторів за конструктивними ознаками

Проте порівняно з резервуарами попередніх форм в циліндричному резервуарі неможливо організувати достатні умови для переміщення субстрату в установці, а тому при цьому доводиться враховувати високі витрати на видалення осаду та руйнування плаваючої кірки, що пов'язано зі збільшенням витрат енергії на перемішування біомаси.

У простих, зокрема в невеликих біогазових установках, які споруджуються власними силами, бродильна камера має форму паралелепіпеда (басейн або яма з кришкою). Для підвищення ефективності такий реактор перегороджують вертикальною стінкою, створюючи головну бродильну камеру та камеру для остаточного зброджування та осадження шлама. Проте установки такого типу не дозволяють досягти високого ступеню розкладення субстрату, оскільки в них практично

неможливо забезпечити рівномірне перемішування біомаси, управління завантаженням робочого об'єму камери та дотримання часу перебування маси в реакторі, що є необхідним для отримання максимальної кількості газу. Руйнування плаваючої кірки та осаду пов'язано зі значними витратами [14].

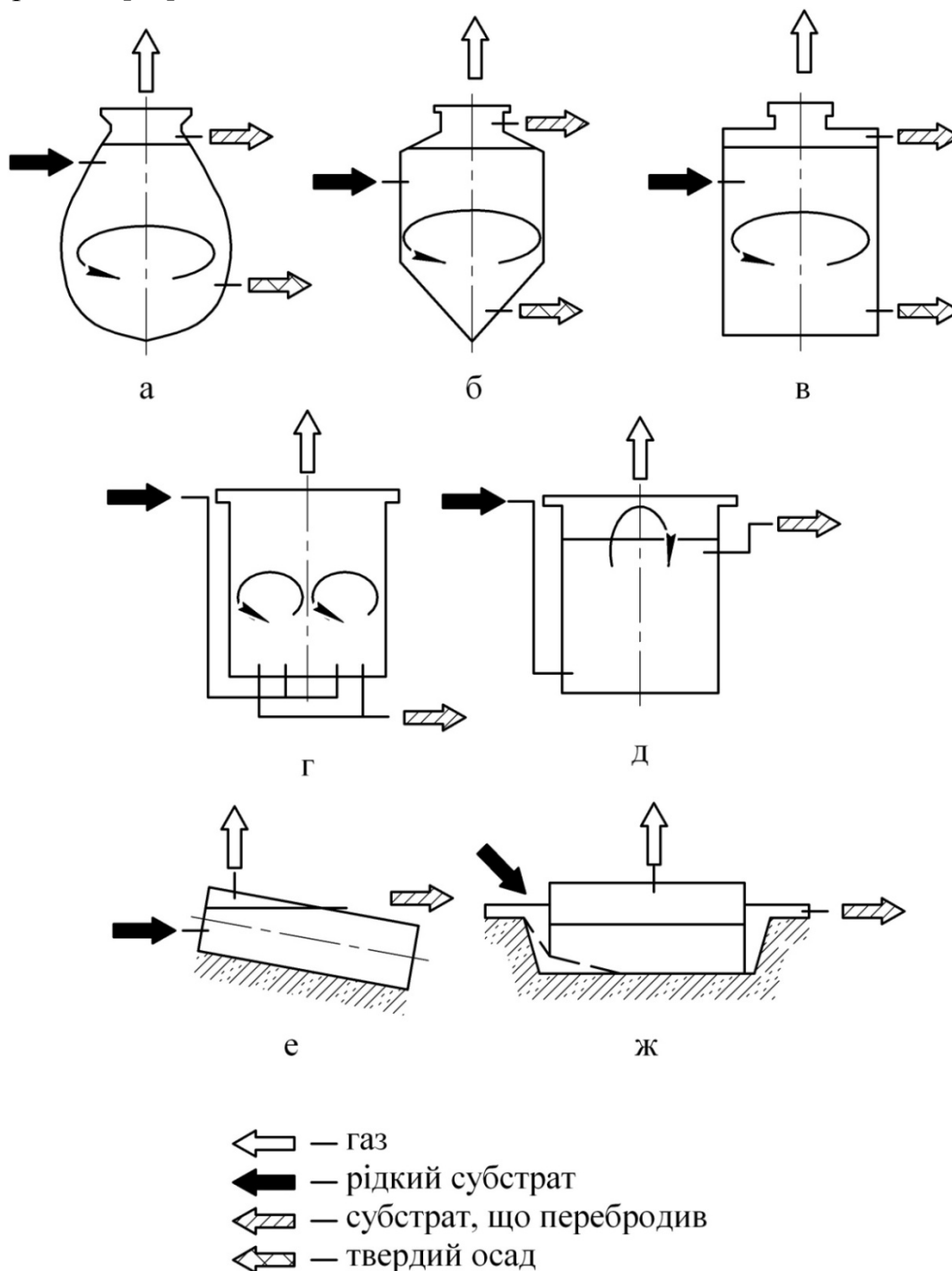


Рисунок 2.2 – Найбільш поширені типи резервуарів біогазових реакторів: а – у вигляді яйця, б – циліндричний з конусними верхньою та нижньою частинами, в – циліндричний, г – циліндричний з

перегородкою, д – у вигляді паралелепіпеда (з перегородкою), е – циліндричний (розміщений з нахилом), ж – траншея в ґрунті (із кришкою).

На рисунку 2.3 зображено типову конструкцію біореактора, що використовується в Україні та інших країнах.

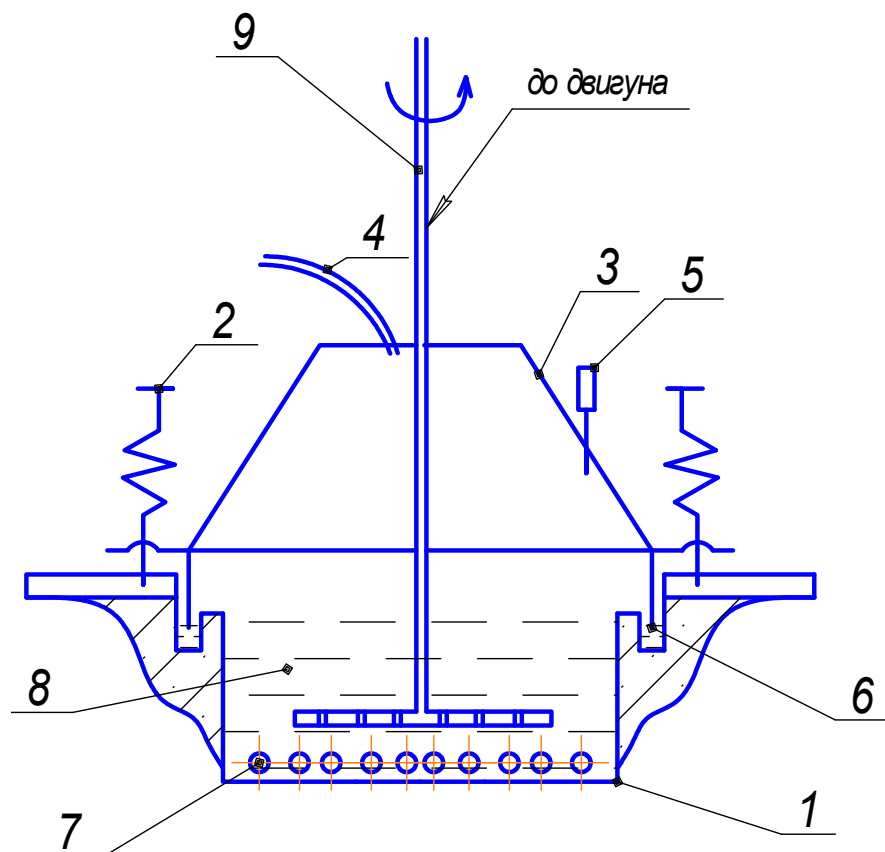


Рисунок 2.3 – **Типова конструкція біореактора:** 1 – корпус, 2 – напрямні ковпака, 3 – ковпак, 4 – газовідвідна трубка, 5 – манометр, 6 – гідрозатвори, 7 – нагрівальний елемент, 8 – субстрат, 9 – мішалка

Якщо резервуар циліндричної форми розділити поперечною вертикальною перегородкою на дві камери, то можна організувати систему отримання біогазу з почерговим використанням камер резервуара (рис. 2.4). Будівництво резервуара з перегородкою буде дешевшим, ніж спорудження двох окремих резервуарів. При такому компонуванні зменшується значення теплоізоляції зовнішніх стінок резервуара, а в перегородку, що виготовлена із досить теплопровідного матеріалу, нескладно вмонтувати будь-який нагрівальний пристрій, який надасть установці конструктивні переваги.

У горизонтально розташованому резервуарі субстрат переміщується в поздовжньому напрямі. Для невеликих установок застосовуються

циліндричні реактори із сталі чи склопластика. Горизонтальні резервуари великої місткості, виготовлені із бетону, мають форму паралелепіпеда.

Нахилене розташування таких резервуарів полегшує відтік відпрацьованої маси до вивантажувального отвору. Така конструкція зручна для розміщення простого перемішувального механізму.

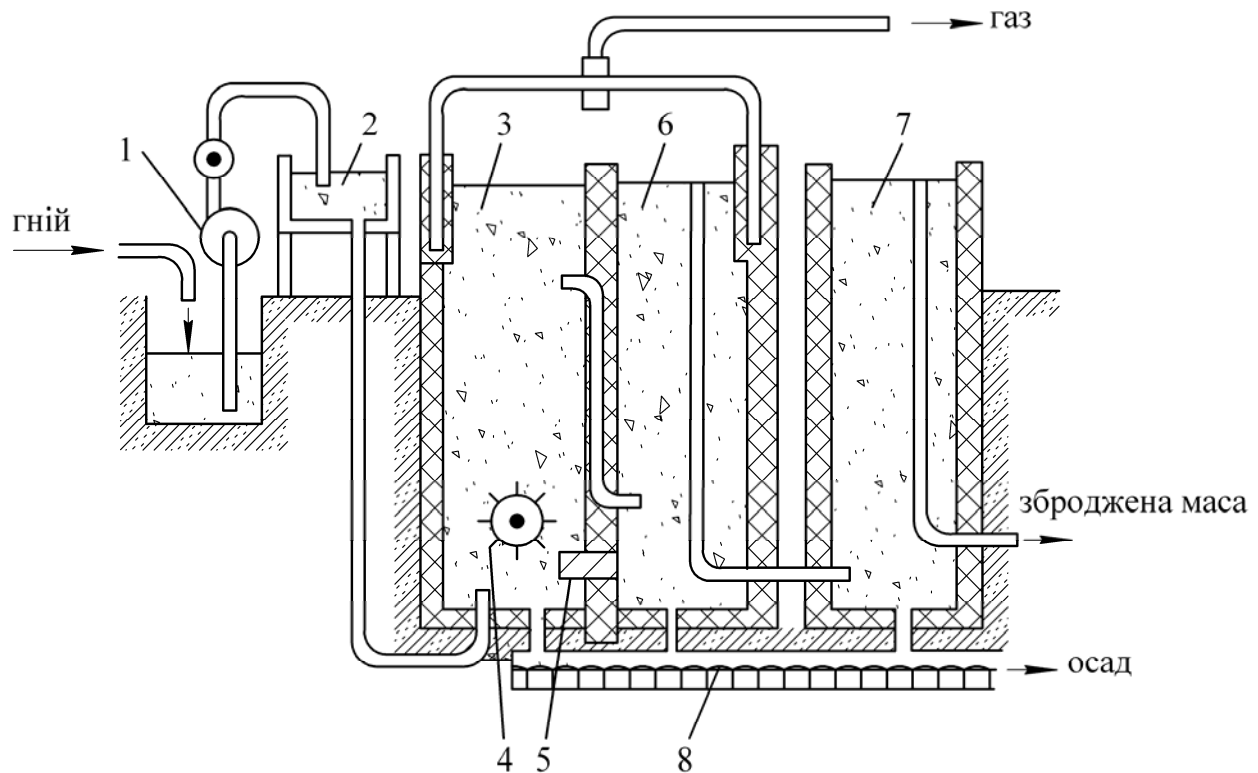


Рисунок 2.4 – Двокамерна біогазова установка проточного типу: 1 – насос; 2 – приймальна камера; 3 – бродильна камера; 4 – пристрій для перемішування; 5 – підігрівач біомаси; 6 – камера остаточного зброджування; 7 – збірник збродженої маси; 8 – шнек

Резервуар у вигляді викопаної в ґрунті траншеї дозволяє обробляти велику кількість субстрату. Як будівельний матеріал для стінок реактора використовують, як правило, бетон.

Значного поширення отримали траншейні біогазові установки (рис. 2.5).

Із приміщення, де утримують худобу, гній, розбавлений водою, надходить в біогазовий реактор, в якому відбувається бродіння. В установці передбачені механічне перемішування субстрату та грейфер для вивантаження збродженого гною.

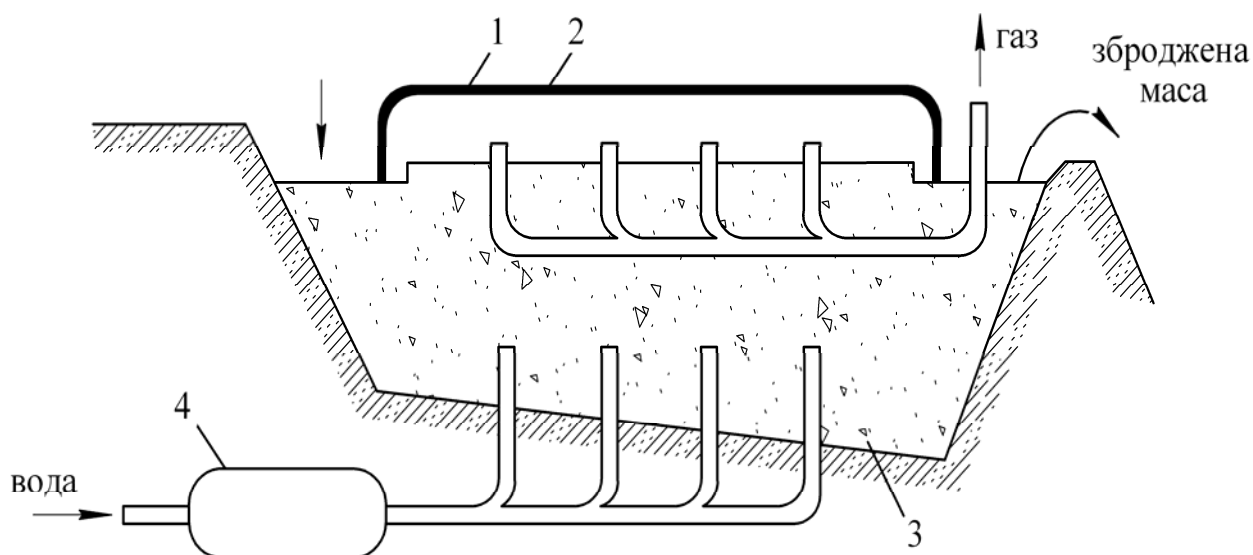


Рисунок 2.5 – Траншейна біогазова установка: 1 – еластичний збірник біогазу; 2 – плити із пінопласту; 3 – бродильна камера; 4 – нагрівач (бойлер)

Особливу увагу привертають еластичні реактори (рис. 2.6), які широко використовуються в країнах Південно-Східної Азії.

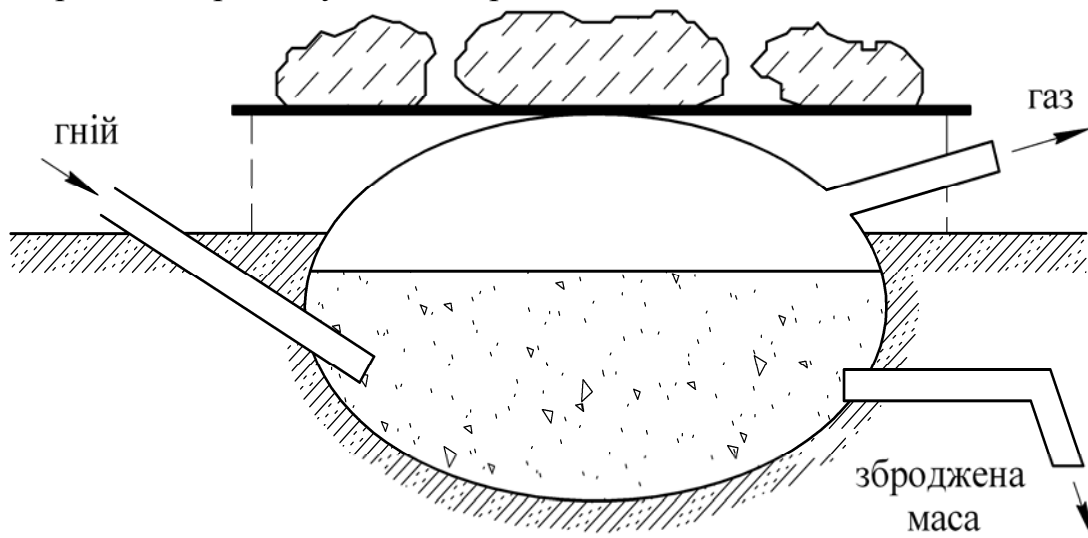


Рисунок 2.6 – Еластичний біогазовий реактор

Подібні реактори (ємності) виготовляють із міцної прогумованої тканини або із синтетичної плівки. Для організації роботи таких біогазових реакторів їх доводиться або заглиблювати в ґрунт, або розміщувати всередині досить міцного огороження [4].

Необхідними умовами для перероблення органічних відходів всередині реактора біогазової установки є [3, 4, 5]:

- створення безкисневого режиму;
- дотримання температурного режиму;
- доступність поживних речовин для бактерій;
- вибір оптимального часу бродіння та своєчасне завантаження і вивантаження сировини;
- дотримання кислотно-лужного балансу;
- дотримання співвідношення вмісту вуглецю і азоту;
- правильна пропорція твердих частин в сировині та перемішування;
- відсутність інгібіторів процесу.

Класифікацію факторів оптимізації напрямків процесу анаеробного бродіння наведено на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Класифікація факторів оптимізації напрямків процесу анаеробного бродіння

Біогазова установка, що добре функціонує, приносить ряд переваг своєму власнику, суспільству та навколишньому середовищу в цілому. Серед них:

- можливість економити кошти, що раніше витрачалися на паливо та електроенергію;

- економія коштів, які витрачаються на купівлю добрив та гербіцидів;

можливість отримання додаткових коштів:

- продаж біогазу та біопалива;
- додаткові кошти при підвищенні врожайності сільськогосподарських культур за рахунок застосування біодобрив;
- додаткові кошти при розведенні худоби та птахів за рахунок кормових добавок із переробленої сировини;

швидка окупність установок:

- біогазова установка з підігрівом сировини будь-якої потужності окуповується приблизно за рік експлуатації;
- зменшується ризик респіраторних та очних захворювань за рахунок очищення повітря в результаті зменшення кількості органічних відходів в місцях їх складування;
- покращується епідеміологічна обстановка внаслідок загибелі частини мікроорганізмів, що містяться у відходах;
- покращується стан здоров'я за рахунок отримання екологічно чистої сільськогосподарської продукції при використанні екологічно чистих добрив;

економія часу, місця та виробничих потужностей:

- економія часу, що витрачається на збирання, транспортування, сушіння палива та місця, яке воно займає;
- економія часу при використанні біодобрив, що витрачається на прополку бур'яну, який вноситься із звичайним гноєм, оскільки його насіння гине під час процесу бродіння в реакторі біогазової установки;

екологічна вигідність:

- зменшення викидів метану в атмосферу (парникового газу), який утворюється при зберіганні гною під відкритим небом;
- зменшення викидів вуглекислого газу та продуктів згоряння вугілля, дров та інших видів палива;
- зменшення забруднення повітря азотистими сполуками, що мають неприємний запах;
- зменшення забруднення водних ресурсів гнійними стоками;
- збереження лісів від вирубування;
- зменшення використання хімічних добрив.

На інтенсивність процесу зброджування і, як наслідок, утворення біогазу впливають чотири групи факторів:

1. Біологічні;
2. Фізичні;
3. Хімічні;
4. Організаційно-технологічні.

До біологічних факторів належать:

- склад зброджуваної біомаси (вміст білків, жирів, вуглеводів, лігнінів);
- склад мікрофлори (кількість і групи мікроорганізмів відповідної стадії розкладання);
- умови життєдіяльності мікроорганізмів (зміст шкідливих домішок).

Фізичні фактори включають:

- температуру зброджування;
- тиск у біогазовій установці;
- гідравлічний режим.

Хімічні фактори визначаються:

- кислотністю середовища (величина рН);
- вмістом ЛЖК у зброджуваній масі;
- обсягом і складом біогазу, що утворюється.

Організаційно-технологічні фактори передбачають:

- дозу добового завантаження нових порцій зброджуваної маси;
- навантаження за беззольною речовиною;
- вміст у біомасі речовин, що не піддаються переробці.

Авторами запропонована конструкція реактора з циліндричним резервуаром і конусами доверху та донизу [6]. Конструкція біореактора з прошарком між утепленим корпусом та робочим резервуаром (рис. 2.8) дозволяє підвищити термічний опір стінки резервуара без додаткових капіталовкладень на ізоляційний матеріал.

Перевагою також є покращення процесу бродіння шляхом утилізації теплоти щойно виробленого біогазу на підігрівання біомаси в зимових умовах. Також міжкорпусний простір виконує роль газгольдера, в якому відбувається тимчасове зберігання виробленого біогазу. В результаті досягається і покращення процесу анаеробного бродіння, що призводить до збільшення виходу біогазу і зниження енерговитрат.

Реактор (рис. 2.8) містить утеплений корпус 1. До корпусу за допомогою верхньої 4 та нижньої 2 опорних газорозподільних решіток кріпиться робочий резервуар 3. В верхній частині робочого резервуара 3 закріплено газопровід 5. Газопровід 5 сполучає низ утепленого корпусу та верх робочого резервуара 3. У нижній частині робочого резервуара 3 розміщено нагрівальний елемент 6 та мішалку 8. У верхній частині утепленого корпусу розміщено патрубок відведення біогазу 7, який приєднано до резервуара накопичення.

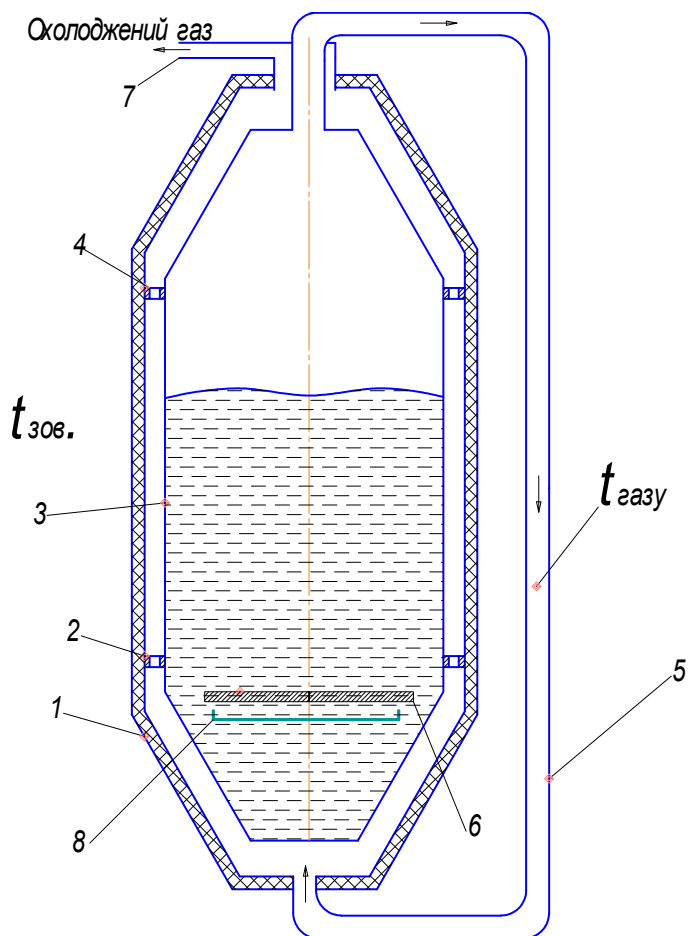


Рисунок 2.8 – Біогазовий реактор з утепленим корпусом

Процес вироблення біогазу протікає таким чином. У холодний період року в реакторах дискретного типу відбувається завантаження холодної порції біомаси, яка має досить низьку температуру і призводить до термічного розшарування середовища. Нижня зона стає холодною, а верхня – перегрівається. Газ при виході з робочого резервуара 3 має температуру процесу $t_{\text{газу}}$, яка згідно з вимогами повинна бути в межах вибраного режиму. Ця надлишкова температура перевищує температуру навколишнього середовища $t_{\text{зов.}}$

Температура середовища в робочому резервуарі 3 нерівномірна та її необхідно підтримувати на заданому технологічному рівні. Для досягнення меж температурних режимів слугує нагрівальний елемент 6, а для якісного перемішування суміші - мішалка 8. Температура суміші коливається в об'ємі нерівномірно: від перегріву навколо нагрівального елемента $t_{\text{нагрів}}$ в верхній зоні до неприпустимого переохолодження в нижній зоні.

Біогаз за допомогою газопроводу 5 направляється в нижню зону, де розподіляється в міжкорпусному просторі за допомогою опорних газорозподільних решіток 2 та 4 і рівномірно обтікає внутрішню частину робочого резервуара. При цьому він віддає своє тепло нижній холодній частині середовища шляхом теплопровідності через металеву стінку. При перегріві отриманий біогаз забирає надлишкове тепло з верхньої зони.

При цьому досягається термостабілізація всього процесу, що покращує процес бродіння і збільшує вихід газу. Також газ виконує роль додаткового теплоізолятора. Біогаз виводиться з міжкорпусного простору за допомогою патрубків відведення газу 7. Міжкорпусний простір виступає як газгольдер для тимчасового зберігання газу.

При накопиченні біогазу в міжкорпусному просторі за необхідності відбувається його відбір на потреби господарства. Для запобігання критичних режимів у верхній частині встановлюють манометр із запобіжним клапаном та термометр.

2.2 Системи теплогазопостачання комплексу біогазових реакторів

Для підігрівання субстрату і підтримання його температури на потрібному рівні в біореакторах встановлюють нагрівальні пристрої. В першому наближенні припустимо прийняти для розрахунків потреб в теплі таку величину: 1 кг субстрату нагрівається на 1 °С при передачі йому 4200 Дж тепла. Теплота витрачається на підігрів маси і компенсацію теплових втрат. До теплообмінників систем біоконверсії висуваються такі вимоги: вони повинні бути компактні і не забирати простір реактора; їх поверхня повинна мати мінімальну шорсткість і запобігати налипанню часток середовища; повинні гнучко керуватися ззовні і мати невелику теплову інерційність [7, 28, 39, 40, 68, 72].

Для підігрівання субстрату теплообмінні пристрої можуть знаходитись як всередині реактора, так і зовні. Нагрівачі першого типу – це нагрівальні труби або пластини, що підігріваються гарячою водою чи

електричним струмом. Зовнішні нагрівачі підігрівають субстрат ще до надходження його в реактор. Таким чином, нагрівач, що знаходиться в установці, повинен лише компенсувати теплові втрати. Окрім безпосереднього знаходження нагрівального елемента в субстраті допускаються схеми вмонтування їх в стінки реактора. Такі установки зазвичай невеликі і підбираються за теплотехнічним розрахунком. Для нормальної життєдіяльності анаеробних бактерій температура поверхні нагрівального елемента не може перевищувати 60°C.

Ще один спосіб нагріву субстрату полягає у безпосередньому введенні пари або гарячої води в реактор. Цим досягається доведення вологості середовища до необхідних 88...98 %.

Трубчасті нагрівачі є найпоширенішими в сучасних біогазових установках. Теплообмін між нагрівальним елементом та субстратом за умов вільної конвекції авторами досліджено експериментально (рис. 2.9) [10, 70, 79]. Усереднені результати розрахунків для тепловіддачі від горизонтального циліндра до субстрату з $C=1...17\%$ за температури +35°C подано на рис. 2.9.

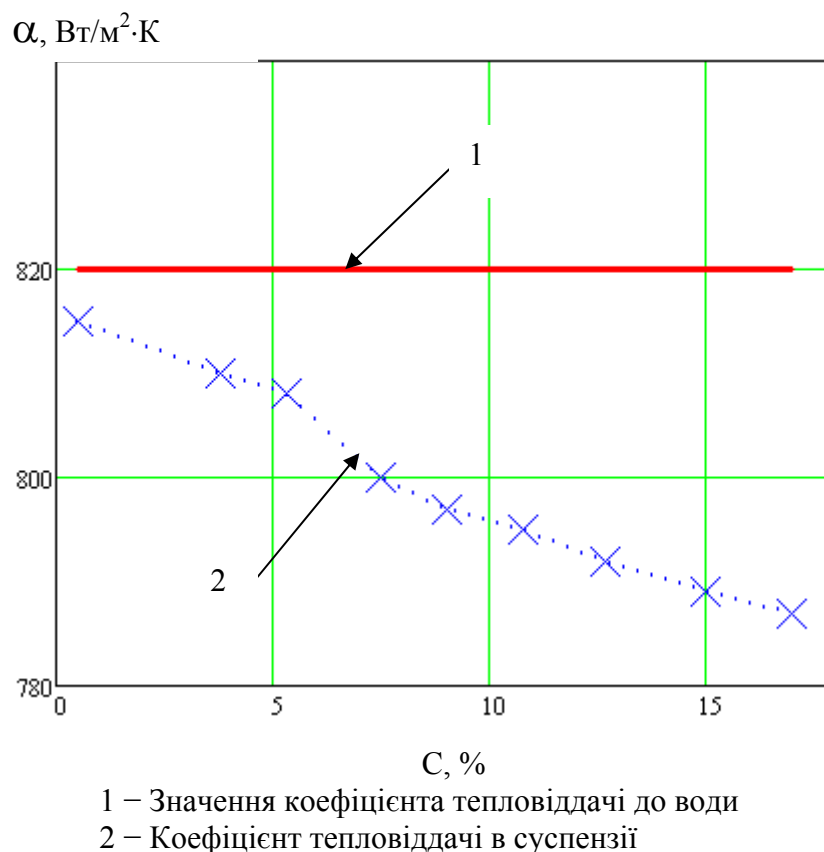


Рисунок 2.9 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від концентрації сухої речовини

Для визначення інтенсивності тепловіддачі до суспензії використано залежності для чистої рідини з підстановкою теплофізичних властивостей субстрату, що розраховані за формулами (1.1-1.3).

У загальному випадку тепловіддачу від нагрівального елемента до середовища розраховують за формулами теплопереносу за умов вільної конвекції від горизонтального циліндра [8, 64, 65, 70].

Коефіцієнт тепловіддачі α $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ розраховується за законом Ньютона-Ріхмана і визначається як:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta t} = \frac{U \cdot I}{F \cdot (t_{cm} - t_p)}, \quad (2.1)$$

де q – питомий тепловий потік, Вт/м²;

Δt – температурний напір, який визначається як різниця температур між температурою стінки нагрівника t_{cm} і середовищем t_p .

У випадку, коли нагрівник електричний, то питомий тепловий потік визначається як

$$q = \frac{U \cdot I}{F}, \quad (2.2)$$

де I – величина сили струму, А;

U – величина напруги на нагрівнику, В

F – площа теплообмінної поверхні, м².

Коли дійсний тепловий потік невідомий, використовують емпіричні залежності для визначення критерію Нуссельта [10-12]:

$$Nu = 0.50 \cdot (Gr_{p,d}^* \cdot Pr_p)^{0.25} \cdot (Pr_p / Pr_c)^{0.25}, \quad (2.3)$$

де $Gr_{p,d}^*$ – модифікований критерій Грасгофа, який з врахуванням залежностей (1.1-1.3) рекомендовано розраховувати за формулою:

$$Gr^* = g \cdot \beta_u \cdot \Delta t \cdot d^3 \cdot (1000 + 2,4 \cdot C) / \mu_6 \cdot \left[1 + 10 \cdot (c + 10 \cdot (c - 2) / (11 - \beta \cdot c)) \right], \quad (2.4)$$

де β_u – коефіцієнт температурного розширення рідини,

Pr_p – теплофізичний критерій Прандтля, взятий при температурі рідини;

Pr_c – теплофізичний критерій Прандтля, взятий при температурі стінки нагрівального елемента;

μ_6 – динамічна в'язкість води,

C – концентрація сухої речовини в субстраті,

c – теплоємність сухої речовини;

Δt – температурний напір між грійною стінкою і рідиною.

Отримавши значення коефіцієнта Нуссельта, легко перейти до коефіцієнта тепловіддачі за формулою:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (2.5)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності рідини (субстрату),

α – коефіцієнт тепловіддачі від грійної стінки до субстрату,

d – характерний розмір нагрівника (діаметр).

Енергозбереження та ресурсозбереження в системах альтернативної енергетики є пріоритетним завданням. Економія енергії та ресурсів при виробленні біогазу досягається за рахунок:

- термостабілізації процесу бродіння;
- утилізації теплоти виробленого біогазу;
- утилізації теплоти відпрацьованого шламу;
- тепло- і гідроізоляції реакторів;
- гнучкої системи тепlopостачання;
- зменшення розмірів теплообмінних апаратів;
- оптимізації конструкцій реакторів;
- використання інформаційно-вимірювальних систем для контролю та дотримання максимальної продуктивності реактора.

Утилізація тепла відробленого шламу для нагрівання свіжої біомаси може виконуватись за схемою, що зображена на рис. 2.10. Це теплообмінний апарат типу «труба в трубі», по якому у внутрішній трубці тече відпрацьований шлам, а в міжтрубному просторі - свіжий. Обмін теплоти відбувається через металеву стінку.

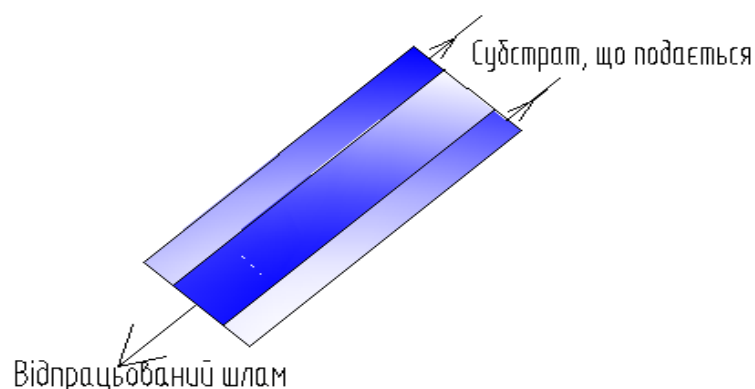


Рисунок 2.10 – Схема рекуперації тепла виробленого шламу

Розрахунок виконується за відомими рівняннями для теплообмінників такого типу. Така конструкція теплообмінного апарата дозволить економити енергоресурси та зменшити потреби тепла на нагрівання холодного субстрату.

При великих обсягах вироблення біогазу доцільно використовувати його теплову енергію. Наприклад, на нагрівання води для пиття худоби та прибирання хлівів за допомогою теплообмінних пристроїв для рекуперації тепла (рис. 2.11). Теплообмінник батарейного типу встановлюється в газгольдері. Вода, протікаючи по ньому, охолоджує газ, одночасно нагріваючись. Коли потреба у воді відпадає, система циркулює у замкнутому режимі, підтримуючи таким чином постійну температуру близько 16...22 °С.



Рисунок 2.11 – Теплообмінні пристрої для рекуперації тепла виробленого біогазу

Рекомендований температурний режим системи тепlopостачання біогазового реактора 60°C/40°C, тобто температура грійної води максимально можлива 60°C, зворотної – 40 °С. Тепlopостачання може бути виконано від газового котла, який працює на природному газі чи виробленому біогазі, котрий пройшов попереднє очищення від шкідливих домішок. Рекомендована схема обв'язки показана на рис. 2.12. Дана схема виконана двокільцевою:

- велике кільце: котел - теплообмінник;
- мале кільце: триходовий клапан - насос – теплообмінник.

Схема обв'язки виконана з байпасовою лінією і двома контурами циркуляції – малим і великим. У випадку, коли температура нагрівника і середовища стає більшою за необхідну величину, триходовий клапан підмішує оборотну воду у подачу. Коли температура поверхні нагрівника і субстрату починає зменшуватися – клапан працює на прямотечію. Для

спускання води при необхідності відключення системи слугують спусники 1. Для запобігання утворенню повітряних пробок встановлено автоматичний повітроспусник.

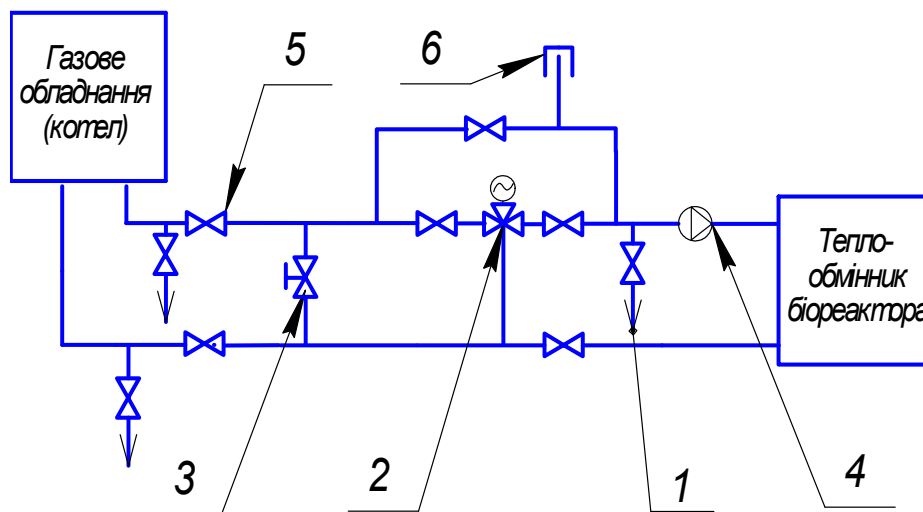


Рисунок 2.12 – **Схема обв'язки нагрівального елемента біореактора:** 1 – спусник води, 2 – триходовий клапан з сервоприводом “BELIMO”; 3 – перепускний диференційний клапан, 4 – насос циркуляційний “WILO”; 5 – вентиль шаровий, 6 – автоматичний спусник повітря

У випадку, коли трапляється поломка котла, для запобігання замерзання теплоносія у контурі циркуляції і зупинки реактора триходовий клапан працює у режимі малого контуру циркуляції теплоносія, підтримуючи температуру вищою за температуру замерзання. Відслідковування аварійних ситуацій з котлом відбувається за допомогою датчика, який вмонтовано в зворотний трубопровід. Коли температура у ньому знижується до $+10...+15^{\circ}\text{C}$, подається сигнал на закривання сервоприводом клапана.

Відслідковування аварійних ситуацій з газовим обладнанням відбувається за допомогою датчика t_1 . Коли температура на ньому знижується до $+10...+15$, подається сигнал на закривання сервоприводом клапану. У випадку, коли температурний градієнт між нагрівальною поверхнею і субстратом починає зростати, активізується перемішування середовища за рахунок збільшення частоти обертання двигуна. Регуляція кількості обертів двигуна здійснюється за допомогою частотного

перетворювача. Визначення кількості обертів двигуна виконується індукційним тахометром.

Для циркуляції теплоносія рекомендуються сучасні насоси фірм «WILLO» та «Grundfos» з «мокрим» ротором та сервоприводи з триходовим клапаном (рис. 2.13).

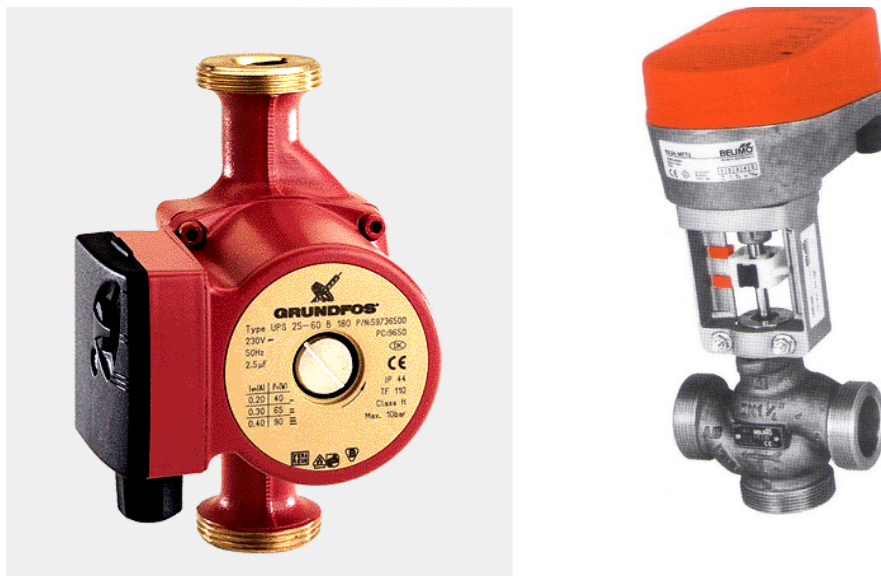


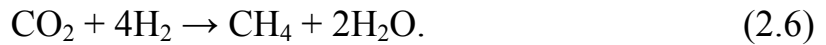
Рисунок 2.13 – Загальний вигляд циркуляційного насоса Grundfos UPS та сервопривода з триходовим клапаном

За матеріалом виготовлення насоси найчастіше виготовляють з чавуну, бронзи чи нержавіючої сталі. Живлення їх відбувається від мережі 220 і 380 В. Максимальний робочий тиск – до 20 бар.

Сервоприводи для триходових клапанів йдуть в комплекті з клапанами і працюють від напруги 220 В або 24 В залежно від схеми керування. Основна задача сервопривода з плавним або дискретним регулюванням - забезпечити розрахункову витрату води зворотної магістралі для підмішування в пряму воду. Даний тип регулювання є якісним і дозволяє економити енергоносії в період невеликих морозів і перехідний. На рис. 2.13 зображено загальний вигляд сервопривода з триходовим клапаном виробництва швейцарської компанії BELIMO.

2.3 Газгольдери систем біоконверсії

Отриманий біогаз в процесі анаеробної ферментації починає скупчуватися в верхній частині реактора, створювати надлишковий тиск та змінювати протікання реакції отримання нового біогазу:



Коли тиск досягне певного критичного значення, розчинні у субстраті водень та вуглекислий газ будуть ще краще розчинятися у воді, таким чином не вступаючи в реакцію утворення біогазу. Тому для подальшого протікання процесу вироблення та акумулювання біогазу необхідно використовувати певні резервуари – газгольдери. Споживання біогазу має сезонну і добову нерівномірність. Найбільше його використання в зимовий та перехідний період, а протягом доби – зранку, в обідню пору та надвечір. Спалювати надлишковий газ в періоди його перевитрати і знижувати енергоспоживання в час недостатнього вироблення є нераціональним. Для акумулювання біогазу використовують декілька типів газгольдерів:

- підземний резервуар, що утворився природним шляхом або внаслідок виробничої діяльності людини – шахти, копальні, ями тощо. Даний тип газгольдерів потрібно влаштовувати в газонепроникних ґрунтах або в газопроникних, що обмежені пластами газонепроникних;
- газгольдер абсорбційного типу. В такому газгольдері метан під тиском розчиняється в пропан-бутані. При такому способі запасують в шість разів більше, ніж при аналогічному тиску в ємностях;
- криогенний газгольдер. В даному газгольдері за рахунок наднизьких температур (мінус 161°C) біогаз і його компоненти переходять при нормальному тиску в рідкий стан, при цьому об'єм його зменшується приблизно в 600 разів;
- газгольдер високого тиску використовується в промисловості при великих обсягах вироблення біогазу. Дозволяє зберігати велику кількість газу при незначних об'ємах газгольдера. Зберігання відбувається при тиску 1 МПа;
- газгольдер низького тиску використовується при зберіганні невеликих об'ємів газу, може мати форму дзвона, кулі, циліндра.

На рис. 2.14 зображено основні типи газгольдерів для зберігання біогазу.

Вибір газгольдера для зберігання біогазу необхідно здійснювати за критеріями вартості, економічності у використанні, необхідного об'єму тощо. У малих фермерських господарствах буде доцільним обмежитись газгольдерами низького тиску, які можна виготовити з цистерн або інших

ємностей. У промисловості вибір газгольдера може обмежуватися лише специфічними вимогами до зберігання та подальшого використання.

Потрібно пам'ятати, що біогаз – це отруйний газ, що може викликати отруєння людини при його протіканні з газгольдерів назовні. Окрім отруйності небезпеку викликає надлишковий тиск, що може утворитися у газгольдері при відсутності контролю з боку оператора установки. При концентрації метану у повітрі приміщення біля 5...15% утворюється вибухонебезпечна суміш [3]. Тому приміщення, де знаходяться газгольдери, повинні відповідати вимогам пожежної безпеки, бути обладнані вентиляцією. Система газопостачання повинна складатися з таких елементів: пристрій від зворотного полум'я, редуктор, комплекс очищення біогазу від домішок, газоаналізатор, що зв'язаний з відсікаючим клапаном. Неочищений біогаз має велику корозійну здатність, тому металеві газопроводи необхідно періодично перевіряти на герметичність.

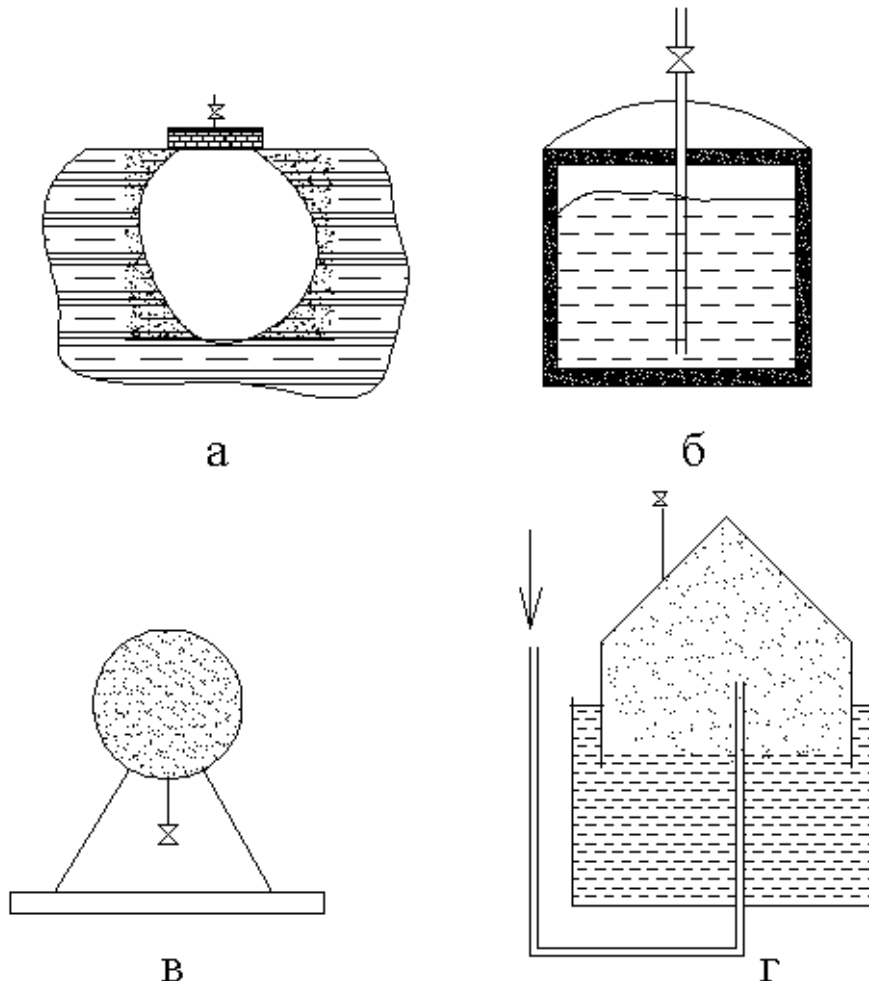


Рисунок 2.14 – **Основні типи газгольдерів:** а – газгольдер – порожнина у землі; б – газгольдер для зрідженого газу; в – циліндричний газгольдер високого тиску; г – газгольдер низького тиску

Контрольні питання

1. Які за формою бувають біогазові реактори ?
2. Які вимоги до біогазового реактора?
3. Перелічіть основні матеріали, з яких будують резервуари біореакторів.
4. Яким чином відбувається нагрів і перемішування органічної суміші в біореакторі?
5. Які способи енергозбереження процесу виробництва біогазу ви знаєте?
6. Поясніть поняття: питомий тепловий потік, критерій Нуссельта, критерій Рейнольдса.
7. В чому полягають переваги багатореакторних установок бродіння?
8. Як визначити коефіцієнт тепловіддачі від нагрівача до суспензії?
9. Які нагрівальні елементи використовують в системах біоконверсії?
10. Що таке малий і великий контур циркуляції теплоносія?
11. Наведіть схему обв'язки нагрівального елемента біореактора.
12. Що таке сервопривод триходового клапана?
13. Поясніть принцип роботи рекуператора відпрацьованого шламу.
14. Які основні типи газгольдерів використовують на практиці?
15. Поясніть принцип роботи газгольдера низького і високого тиску.
16. Що таке кріогенний газгольдер?
14. Як впливає тиск на протікання процесу бродіння?

3 ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРІВ

3.1 Термостабілізація процесу анаеробного бродіння, тепловий баланс БГУ

Недоліком відомих типів біогазових реакторів є те, що за рахунок недостатнього та нерівномірного прогрівання суміші коливання температур в об'ємі субстрату стають значними. Це порушує технологічні вимоги та зменшує продуктивність щодо виходу біогазу порівняно з теоретичним. За рахунок вертикального градієнта температур у нижній зоні утворюється холодний малорухомий шар, а верхня зона перегрівається. Також до основних недоліків можна віднести великі площі теплообмінників, що призводить до значного зростання вартості спорудження реактора [13].

Процес бродіння протікає у трьох основних температурних режимах:

- кріофільному: температура бродіння 20 °С;
- мезофільному: оптимальна температура 32 – 33 °С;
- термофільному 52 – 54 °С.

Будь-які різкі зміни температури впливають негативно на процес. Для кожного режиму зброджування допустимі коливання температур ± 3 °С.

Процес термостабілізації в біореакторах – це вирівнювання полів температур по об'єму та дотримання температурних режимів. Досягнення термостабілізації можливе при автоматизованому контролі параметрів температурних режимів, активному перемішуванні та рівномірному прогріванні субстрату.

Метаболічна активність анаеробних бактерій знаходиться в прямій залежності від температури середовища. Згідно з останніми дослідженнями, зі зростанням температури вихід газу і розкладання органіки збільшується. Навпаки, зі зменшенням температури до 15 °С процес бродіння повністю припиняється.

При мезофільному процесі вихід газу буде складати 0,8...1,0 м³ на кілограм розкладеної органіки або 0,4...0,6 м³ на кілограм внесеної сирової органічної маси. Для підвищення вироблення біогазу з субстрату необхідно збільшити час бродіння або температуру бродіння. В обох випадках при порушенні термостабілізації процес погіршує своє протікання.

Термостабілізаційні процеси в біореакторі викликають значну увагу у дослідників, оскільки дозволяють зменшити енерговитрати та отримати

максимальну кількість біогазу з одиниці маси сировини при мінімальних витратах ресурсів. Процесів ресурсоощадності можна досягати шляхом конструктивних змін біореактора, поліпшення умов теплообміну, підготовки сировини, зміни температурних режимів тощо.

Анаеробне перероблення органічних відходів дозволяє отримати біогаз та зменшити техногенне навантаження на біосферу. Для виробництва біогазу використовують різні за конструктивними особливостями біогазові установки. Показником ефективної роботи такої установки є продуктивність, вихід біогазу з одиниці об'єму біомаси, тривалість робочого циклу та енергетичні затрати із забезпечення термостабілізації та інтенсифікації біоконверсії. Ці показники в основному визначають собівартість виробництва біогазу [29, 47, 58]. Тривалість робочого циклу біогазової установки для забезпечення максимального виходу біогазу з одиниці об'єму біомаси визначається за умови

$$t_{p.ц.} = f(t_z, t_{n.ф.}, t_{ф.}, t_{\sigma}) \rightarrow t_{\min}, \quad (3.1)$$

де t_z – час завантаження біомаси в біогазовий реактор;

$t_{n.ф.}$ – час підготовки біомаси до активної фази ферментації;

t_{σ} – час активної ферментації біомаси;

t_a – тривалість вивантаження відпрацьованої біомаси із реактора.

Суттєва частина тривалості робочого циклу біогазової установки (80% ... 90%) становить період активної ферментації біомаси, що визначається режимом анаеробного бродіння, кількісним та якісним вмістом в субстраті органічної речовини, енергетичними затратами із забезпечення термостабілізації процесу анаеробного бродіння [27, 28]. Основними напрямками оптимізації періоду активної ферментації біомаси є інтенсифікація та термостабілізація технологічного процесу виробництва біогазу.

Анаеробний процес, який проходить в біогазовій установці, споживає певну кількість енергії: теплової енергії – для підтримання термостабільності в реакторі та попереднього нагріву субстрату до температури зброджування; механічної енергії – для здійснення перемішування середовища в ємкостях і переміщення матеріальних потоків субстрату. Експлуатація біогазових реакторів вимагає забезпечення стабільного температурного режиму за різних умов навколишнього середовища. Коливання температур субстрату не повинно перевищувати сприятливих для ферментації бактерій меж. У зв'язку з цим

доцільним є дослідження тепломасообмінних процесів в реакторі при різних режимах: кріофільному, мезофільному та термофільному [3-5].

Технологія метанового бродіння в біогазовій установці потребує дотримання меж температурних режимів, інтенсифікації теплообміну між нагрівником і субстратом. Схему до моделювання тепломасообмінних процесів в біогазовій установці наведено на рис. 3.1.

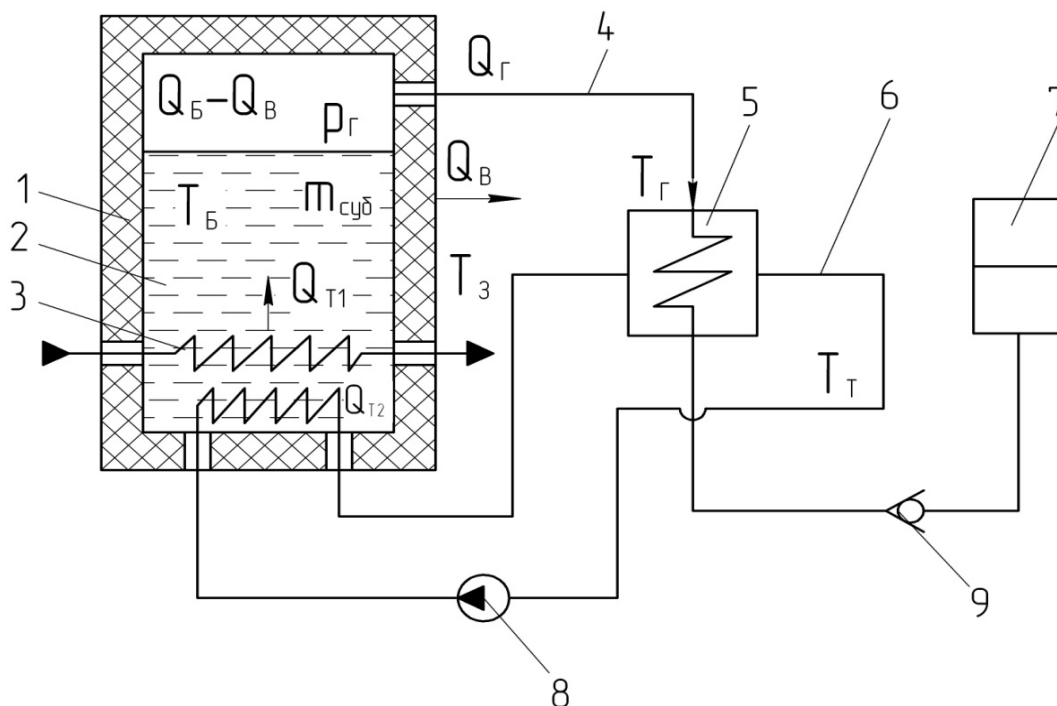


Рисунок 3.1 – Схема до моделювання тепломасообмінних процесів: 1 – теплоізоляційний корпус; 2 – субстрат; 3 – нагрівник; 4 – газопровід; 5 – утилізаційний теплообмінник; 6 – магістраль рециркуляції вторинного теплоносія; 7 – резервуар накопичення біогазу; 8 – нагнітач теплоносія; 9 – запобіжний клапан

Рівняння масообмінних процесів в біогазовій установці описується формулою:

$$m_{CVB} = m'_{CVB} - m_G, \quad (3.2)$$

де m_{CVB} – маса субстрату, який завантажується в реактор, кг;

m'_{CVB} – маса субстрату після перероблення в біогазовій установці, кг;

m_G – маса газу, який утворився із субстрату внаслідок анаеробного бродіння, кг.

Враховуючи питому вагу складових в біогазовому реакторі, рівняння (3.2) матиме вигляд:

$$V_T \rho_T + V_P \rho_P = \rho_T \frac{dV_T}{dt} + \rho_P \frac{dV_P}{dt} + V_G \rho_G,$$

(3.3)

де V_T – об'єм твердої фази субстрату на вході в біогазовий реактор, м³;

V_P – об'єм рідкої фази субстрату на вході в біогазові установки, м³;

V_G – об'єм газу, який утворюється внаслідок анаеробного бродіння субстрату, м³;

ρ_T – густина твердої фази субстрату, кг/м³;

ρ_P – густина рідкої фази субстрату, кг/м³;

ρ_G – густина біогазової суміші, кг/м³.

Вирази $\rho_T \frac{dV_T}{dt}$ та $\rho_C \frac{dV_C}{dt}$ характеризують зміну мас твердої та рідкої речовини субстрату після її перероблення в біогазовому реакторі.

Тепловий режим в біогазовій установці залежить від теплоізоляційних властивостей зовнішніх огорожень біогазової установки, додаткової енергії, яка надходить у біогазову установку для забезпечення термостабілізації, а також від режиму анаеробного бродіння, для підтримання якого повинен дотримуватись тепловий баланс втрат та надходжень теплоти.

Рівняння теплового балансу біогазової установки описується залежністю

$$Q_B = \alpha_T F_B (T_B - T_3) + m_B c_m \cdot \frac{d}{dt} (T_B - T_3) + Q_T - Q_G,$$

(3.4)

де Q_B – теплота, що надходить до внутрішнього середовища біогазового реактора, Дж;

α_T – загальний коефіцієнт теплопередачі через корпус та теплозахисні конструкції реактора, Вт/(м²·°C);

F_B – площа зовнішньої поверхні корпусу біогазової установки, м²;

T_B – температура внутрішнього середовища реактора, °C;

T_3 – температура зовнішнього середовища навколо біоустановки, °C;

$\alpha_T F_B (T_B - T_3)$ – вираз, який характеризує втрати теплоти біогазової установки у зовнішнє середовище;

m_B – маса субстрату, біогазової суміші та повітря в установці, кг;

c_m – приведена питома масова теплоємність субстрату, біогазової суміші та повітря в біогазовому реакторі, Дж/(кг·°C);

$$m_B c_m \cdot \frac{d}{dt}(T_B - T_3) = m_B c_m \cdot \frac{d}{dt} \Delta T - \text{ вираз, який описує зміну теплоти, що}$$

акумулюється в середовищі біогазової установки;

ΔT – поточна різниця температур під час анаеробного бродіння;

$Q_T = Q_{T1} + Q_{T2}$ – додаткова загальна теплота, яка надходить в установку для термостабілізації субстрату (де Q_{T1} і Q_{T2} – теплота, що надходить, відповідно, від основного нагрівача та від утилізаційного теплообмінника 5), Дж;

Q_G – теплота біогазової суміші, що відводиться з біогазової установки, Дж.

Основними шляхами досягнення термостабілізації процесу виробництва біогазу є:

- рівномірне прогрівання суміші, що досягається об'ємним нагрівальним елементом (наприклад – грючими стінками реактора);
- контрольоване перемішування субстрату за певним законом, завдяки чому вирівнюються поля температур;
- малочастотне високоамплітудне вібраційне перемішування субстрату;
- локальний і масовий барботаж теплообмінника;
- влаштування енергоефективної системи теплоізоляції для запобігання тепловтрат разом з наведеними вище способами перемішування;
- автоматизований контроль над температурними полями в реакторі та над станом теплоізоляції і управління процесом перемішування субстрату.

3.2 Особливості нестационарного теплообміну в біогазовому реакторі

Для дослідження особливостей нестационарного теплообміну розглянемо біогазовий реактор, що обладнаний лопатевою мішалкою і трубчастим нагрівником (рис. 3.2). По нагрівнику протікає теплоносій максимальна температура якого не повинна перевищувати 60° С для запобігання перегріву зони біля нагрівника і збереження технологічного процесу анаеробного бродіння.

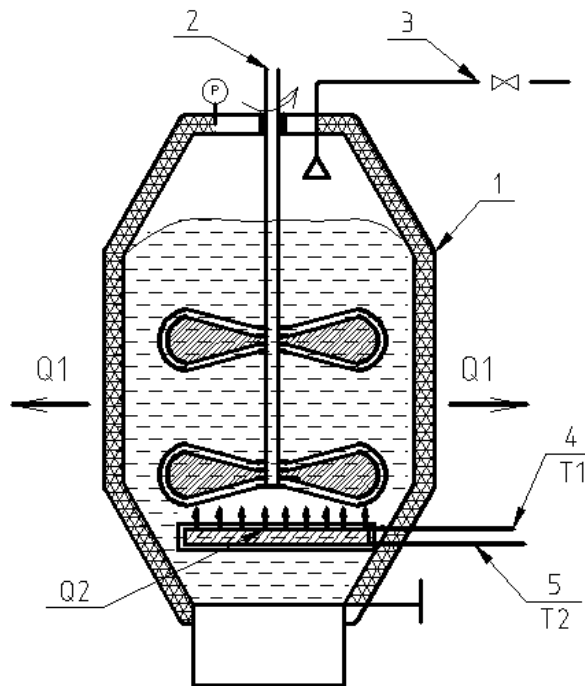


Рисунок 3.2 – Біогазовий реактор з лопатевою мішалкою та теплообмінником: 1 – утеплений корпус; 2 – лопатева мішалка; 3 – трубопровід відводу біогазу; 4 – подаючий трубопровід теплоносія; 5 – зворотний трубопровід теплоносія

Температура середовища в біогазовому реакторі $t_1 = f(\tau)$ є функцією від часу. Прийmemo постійними температуру теплоносія на подачі t_2^p , який передає субстрату тепло Q_2 , термічний опір стінки реактора R , площу теплообмінної поверхні нагрівника F_2 , площу бічної поверхні реактора F_1 , через яку відбуваються втрати тепла Q_1 , об'єм реактора W . Змінними величинами є температура зворотної води t_2^z ; коефіцієнт теплопередачі від нагрівника до середовища k_2 , що залежить від теплофізичних властивостей субстрату і теплоносія, режиму омивання теплообмінної поверхні; зовнішня температура t_{zv} . Диференціальне рівняння теплового балансу реактора при нестационарних умовах роботи запишемо у вигляді:

$$W \cdot \rho \cdot c_1 \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_2^p - t_2^z) - \frac{F_1}{R} \cdot (t_1 - t_{zv}), \quad (3.5)$$

де ρ – густина субстрату;

c_1 – теплоємність субстрату;

c_2 – теплоємність теплоносія;

У зв'язку зі нестационарністю процесу змінною є також температура зворотної води t_2^z , значення якої знайдемо з теплового балансу теплообмінного апарата:

$$dQ = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_2^p - t_2^z) d\tau = F_2 \cdot k_2 \cdot \Delta t_c d\tau. \quad (3.6)$$

Середній температурний напір Δt_c у теплообміннику знайдемо за відомою формулою

$$\Delta t_c = \frac{\Delta t_a - \Delta t_i}{\ln\left(\frac{\Delta t_a}{\Delta t_i}\right)}, \quad (3.7)$$

де $\Delta t_a = t_1 - t_2^p$, $\Delta t_i = t_1 - t_2^z$

Підставивши значення середнього температурного напору Δt_c у рівняння (3.6) визначимо, що температура зворотної води із теплообмінника

$$t_2^z = \left[t_1 \cdot \left(e^{\frac{k_2 \cdot F_2}{G_2 \cdot c_2}} - 1 \right) + t_2^p \right] / e^{\frac{k_2 \cdot F_2}{G_2 \cdot c_2}}. \quad (3.8)$$

Значення коефіцієнта теплопередачі k_2 знайдемо, використовуючи емпіричні рівняння для коефіцієнта тепловіддачі від теплоносія до стінки нагрівника:

$$Nu_1 = 0,021 Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \left(\frac{Pr_1}{Pr_{st1}} \right)^{0,25}. \quad (3.9)$$

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі від стінки нагрівника до субстрату при омиванні нагрівника мішалкою із максимальною технологічною швидкістю $v_0 = 0,7l / \tilde{n}$, скористаємось емпіричною залежністю для поперечного омивання одиначної труби в діапазоні $1000 \leq Re \leq 20000$,

$$Nu_2 = 0,25 Re_2^{0,6} \cdot Pr_2^{0,38} \left(\frac{Pr_2}{Pr_{st2}} \right)^{0,25}, \quad (3.10)$$

де Re_1 – критерій Рейнольдса при течії теплоносія в трубі;

Re_2 – критерій Рейнольдса при омиванні субстратом нагрівника;

Pr_1 – критерій Прандтля для теплоносія при середній його температурі;

Pr_{st1} – те ж саме при температурі стінки;

Pr_2 – критерій Прандтля для субстрату при середній його температурі;

Pr_{st2} – те ж саме при температурі стінки нагрівника.

Моделювання в математичному пакеті MathCad виконано відповідно до початкових умов: температура теплоносія $t_2^p = 60$ °C; термічний опір стінки утепленого реактора $R = 1$ м² °C/Вт; площа бічної поверхні реактора $F_1 = 12$ м²; витрата теплоносія $G_2 = 2$ м³/год; площа тепловіддачі нагрівника $F_2 = 2$ м²; об'єм реактора $W = 4,5$ м³ (об'єм субстрату прийнято

$W' = 4,0 \text{ м}^3$); зовнішня температура $t_{zv} = -5 \text{ °C}$; вміст сухих органічних речовин $s = 8\%$, відходи ВРХ $\beta_u = 0,7$; умовний діаметр труби нагрівника 25 мм. За результатами чисельного моделювання отримано графічну залежність часу нагрівання субстрату біореактора від температури процесу (рис. 3.3).

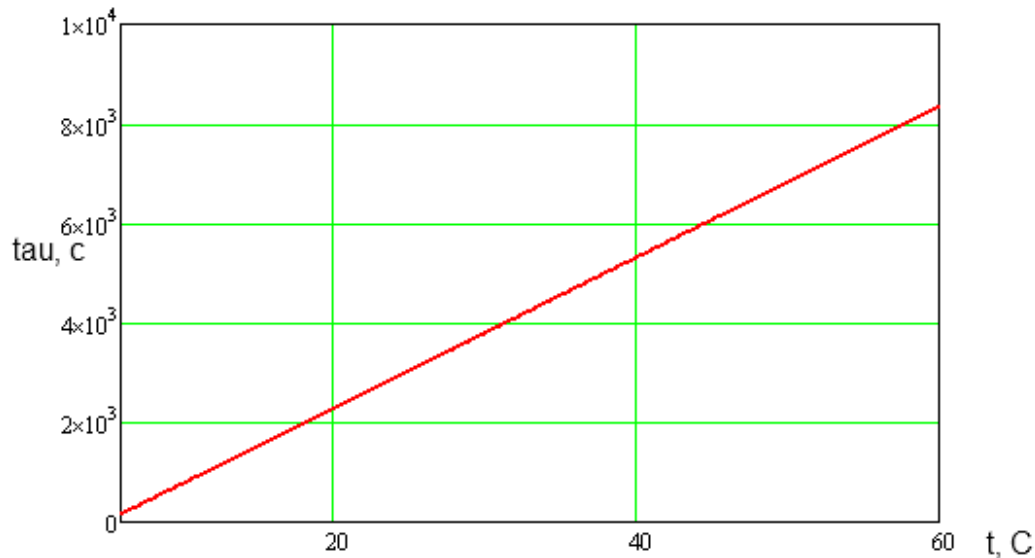


Рисунок 3.3 – Залежність часу нагрівання біореактора від температури процесу

При розробці математичної моделі прийнято, що температура субстрату є рівномірною по всьому об'єму. Рівномірності прогрівання субстрату в біореакторі можна досягти тільки при ретельному перемішуванні в межах технологічних швидкостей. При дослідженні температури зворотної води особливу увагу необхідно звернути на робочий температурний перепад $(t_2^p - t_2^z)$, який для нормального функціонування котельного обладнання повинен бути в межах 10...25 °C.

Якщо використовувати погано теплоізолюваний біореактор $R = 0,04 \text{ м}^2 \text{ °C/Вт}$ та з неправильно підібраним теплообмінником $F_2 = 0,2 \text{ м}^2$, то деяких необхідних температурних режимів взагалі неможливо досягти (рис. 3.4), про що свідчить характер залежності $\tau(t)$ – недосяжний термофільний режим в неправильно запроєктованому біореакторі. Це відбувається тому, що зі збільшенням часу нагрівання субстрату в неутепленому біореакторі температура анаеробного процесу практично не досягає оптимального значення для збереження максимальної продуктивності з виробництва біогазу.

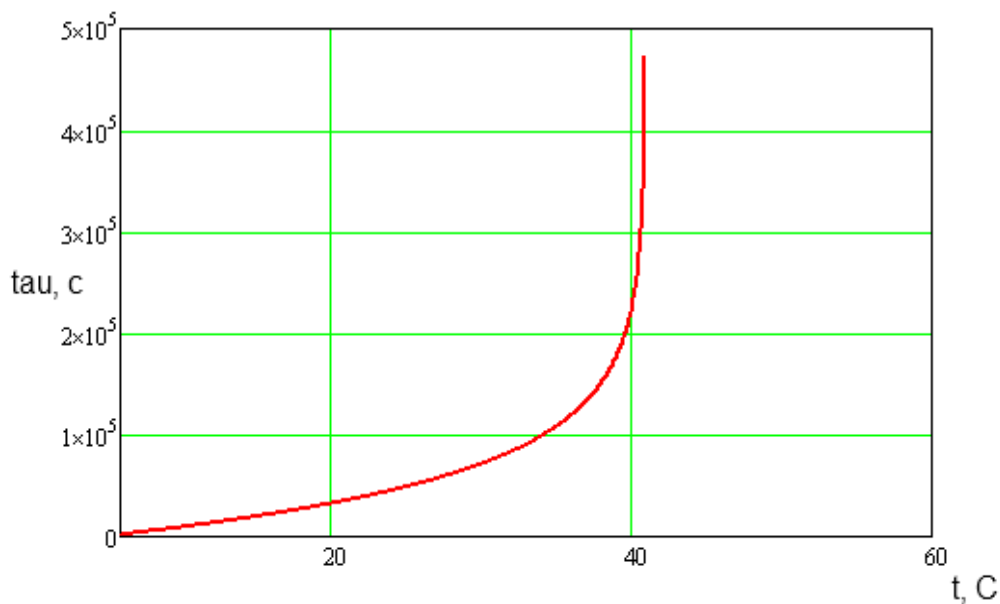


Рисунок 3.4 – Залежність часу нагрівання неутепленого біореактора від температури процесу

Моделювання відповідно до наведених початкових умов дало змогу визначити, що нагрівання утепленого реактора об'ємом 4,5 м³ до режиму мезофільного бродіння відбудеться за 67 хвилин, а термофільний режим досягнеться через дві години.

3.3 Тепловтрати в біогазових установках при різних температурних режимах анаеробного бродіння

Анаеробне перероблення органіки з метою отримання біогазу відбувається при заданих температурних режимах: кріофільному, мезофільному та термофільному [3 - 5]. Ці режими з оптимальними параметрами важко підтримувати, особливо при від'ємних температурах. Термостабілізація та інтенсифікація процесу анаеробного бродіння можуть бути забезпечені шляхом зниження тепловтрат через захисні конструкції біогазової установки.

При виробництві біогазу шляхом анаеробного бродіння органіки метаболічна активність і репродуктивна здатність мікроорганізмів знаходяться в функціональній залежності від температури в біогазовому реакторі. Температура впливає на об'єм газу, який можна отримати із певної кількості органічної речовини протягом заданого часу в реакторі, а також на технологічний час процесу зброджування, необхідний для вивільнення певної кількості газу при відповідній температурі [40].

Залежно від температурного інтервалу, що підтримується в біогазовій установці в процесі роботи, розрізняють режими зброджування [11, 30]:

- кріофільний ($T < 23^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{опт}} = 20^{\circ}\text{C}$);
- мезофільний ($T = 25 \dots 45^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{опт}} = 32 \dots 42^{\circ}\text{C}$);
- термофільний ($T = 45 \dots 55^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{опт}} = 48 \dots 51^{\circ}\text{C}$).

Кріофільний режим зброджування не вимагає спеціального підігріву субстрату, протікає при температурі навколишнього середовища і використовується на невеликих індивідуальних установках у країнах з теплим кліматом.

Мезофільний режим зброджування, як це підтверджено численними дослідженнями і практикою експлуатації установок, протікає найбільш інтенсивно в температурному інтервалі $32 \dots 42^{\circ}\text{C}$ [3, 61]. При цьому найбільш активно «працюють» метаногенні бактерії з максимальним утворенням біогазу. Підігрівання і підтримування стабільної температури зброджування здійснюється, як правило, прокачуванням нагрітої води через спеціальні теплообмінники, що змонтовані в біогазовій установці. Нагріту воду одержують у котельному агрегаті, використовуючи для його роботи частину виробленого біогазу, витрати якого складають 30 – 40% загального виходу.

Термофільний режим дає можливість одержувати максимальну кількість біогазу за короткий термін зброджування. Інтенсивність зброджування вдвічі вище, а час перебування субстрату в біогазовій установці вдвічі менший, ніж при мезофільному.

Отже, визначення складових теплового балансу біогазової установки та тепловтрат через захисні конструкції при різних режимах зброджування залежно від зовнішніх температур є актуальною задачею.

Згідно з рівнянням теплового балансу (3.4) біогазової установки умови оптимізації складових цього рівняння для забезпечення заданого процесу анаеробного бродіння такі.

Витрати теплоти для термостабілізації потребують додаткових витрат енергоносіїв у процесі регулювання реакцій анаеробного бродіння в біогазовому реакторі [8, 9]. Вони повинні бути мінімальними, тобто наблизитись до нуля:

$$Q_T \rightarrow 0. \quad (3.11)$$

Втрати теплоти з реактора у зовнішнє середовище також повинні бути мінімальними для забезпечення оптимального процесу бродіння та зменшення енерговитрат на процес термостабілізації:

$$\alpha_T F_B (T_B - T_3) \rightarrow \min. \quad (3.12)$$

Теплота, що акумулюється в середовищі біогазової установки, повинна набути оптимального значення при відповідному режимі

зброджування для забезпечення найбільшої продуктивності біогазової установки:

$$m_B c_m \cdot \frac{d}{dt} \Delta T \rightarrow \text{opt} . \quad (3.13)$$

Одним із варіантів оптимізації складових рівняння теплового балансу (3.4) біогазової установки є зменшення втрат теплоти внутрішнього середовища реактора у зовнішнє навколишнє середовище через захисні конструкції корпусу установки [32, 33]. Ці втрати мають прямо пропорційну залежність від коефіцієнта теплопередачі α_T матеріалу захисних конструкцій реактора. Для оптимізації складової теплового балансу, яка відображає втрати тепла у зовнішнє середовище, коефіцієнт теплопередачі матеріалу α_T повинен наближатись до свого мінімального значення:

$$\alpha_T \rightarrow \min . \quad (3.14)$$

Величина тепловтрат із внутрішнього середовища Q_B (Вт) характеризується термічним опором матеріалу захисних конструкцій, різницею температур між внутрішнім і зовнішнім середовищем реактора та обчислюються за формулою [34]:

$$Q_B = \alpha_T (T_B - T_3) n_1 F_B \eta_n , \quad (3.15)$$

де $\alpha_T = \frac{1}{R}$ – коефіцієнт теплопередачі захисних конструкцій реактора, Вт/(м²·°C);

R – термічний опір теплопередачі матеріалу захисної конструкції та тепловіддачі з обох боків захисних конструкцій, (м²·°C)/Вт;

$(T_B - T_3)$ – розрахункова різниця температур між внутрішньою та зовнішньою температурами, °C;

n_1 – поправковий множник, що враховує зменшення розрахункової різниці температур для захисних конструкцій біогазової установки (для даного випадку $n = 1$);

F_B – площа поверхні захисної конструкції біогазової установки, м² (ведеться розрахунок для $F_B = 1 \text{ м}^2$);

η_n – коефіцієнт, що враховує додаткові тепловтрати, які можуть помітно змінюватись від впливу сонячного випромінення, інфільтрації та ексфільтрації, $\eta_n = 1$.

Таким чином, з врахуванням наведених припущень щодо роботи біогазового реактора, формула (3.9) матиме вигляд:

$$Q_B = \frac{\Delta T}{R}. \quad (3.16)$$

Для різних теплових режимів анаеробного бродіння проведено числові експерименти із визначення тепловтрат через захисні конструкції при різних зовнішніх температурних режимах за формулою (3.15), результати яких наведено в табл. 3.1 – 3.3.

Таблиця 3.1 – Тепловтрати для кріофільного режиму зброджування
($T < 20^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{опт}} = 5\text{--}15^{\circ}\text{C}$)

Термічний опір та режим роботи	Температура зовнішнього середовища $T_{\text{зовн}}, ^{\circ}\text{C}$								
	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
$R=1 \text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт,}$ $T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=10^{\circ}\text{C}$	-10,0	-5,0	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
$R=1 \text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт,}$ $T_{\text{мак}}^{\text{БГУ}}=15^{\circ}\text{C}$	-5,0	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0
$R=2 \text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт,}$ $T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=10^{\circ}\text{C}$	-5,0	-2,5	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
$R=2 \text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт,}$ $T_{\text{мак}}^{\text{БГУ}}=15^{\circ}\text{C}$	-2,5	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5
$R=3 \text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт,}$ $T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=10^{\circ}\text{C}$	-3,3	-1,6	0,0	1,7	3,3	5,0	6,7	8,3	10,0
$R=3 \text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт,}$ $T_{\text{мак}}^{\text{БГУ}}=15^{\circ}\text{C}$	-1,6	0,0	1,7	3,3	5,0	6,7	8,3	10,0	11,7
$R=4 \text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт,}$ $T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=10^{\circ}\text{C}$	-2,5	-1,2	0,0	1,3	2,5	3,8	5,0	6,3	7,5
$R=4 \text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт,}$ $T_{\text{мак}}^{\text{БГУ}}=15^{\circ}\text{C}$	-1,2	0,0	1,25	2,5	3,8	5,0	6,3	7,5	8,8

Графічно зміни тепловтрат від зовнішніх температур при кріофільному, мезофільному та термофільному режимах зброджування зображено на рис. 3.5 – 3.7. Також визначені зони втрат при оптимальних температурних режимах $T_{\text{опт}}$ анаеробного бродіння.

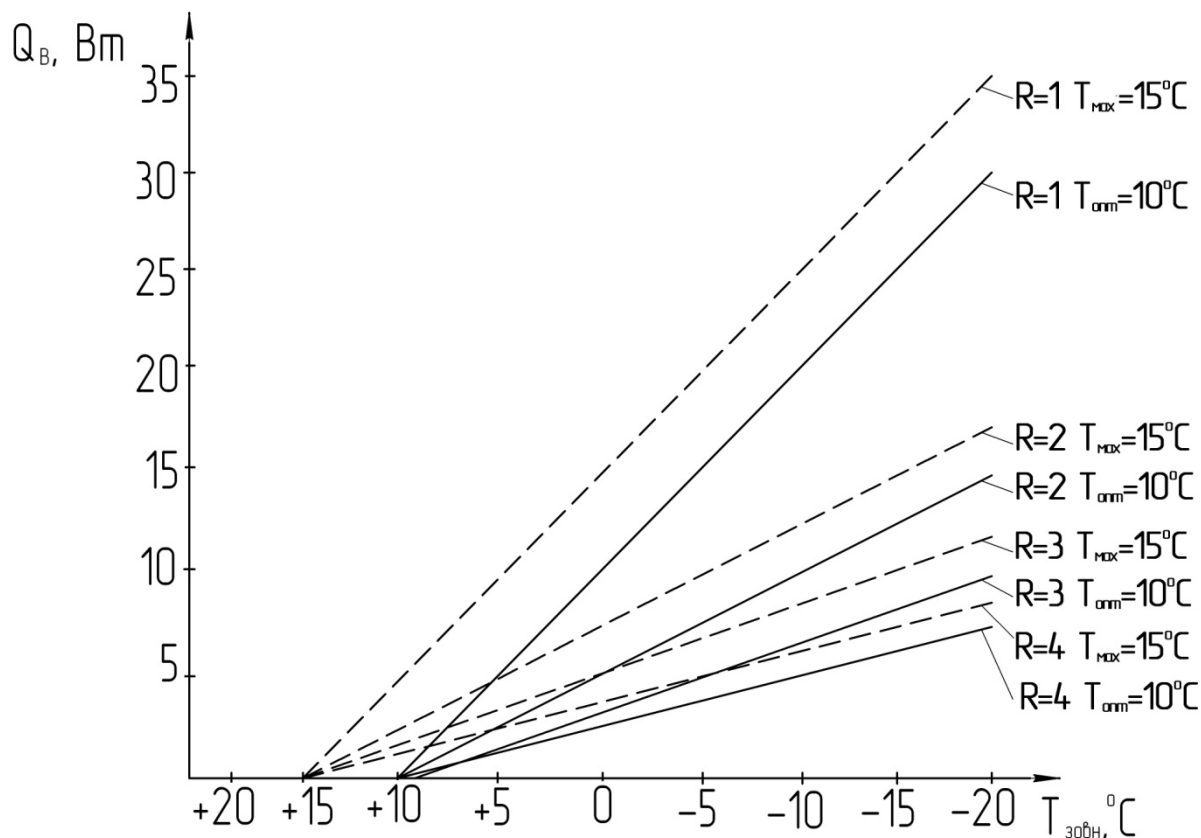


Рисунок 3.5 – Тепловтрати для кріофільного режиму залежно від зовнішніх температур

Таблиця 3.2 – Тепловтрати для мезофільного режиму зброджування
($T = 25-45^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{опт}} = 32 - 42^{\circ}\text{C}$)

Термічний опір та режим роботи	Температура зовнішнього середовища $T_{\text{зовн}}, ^{\circ}\text{C}$									
	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$R=1 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/Вт, } T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=32^{\circ}\text{C}$	12,0	17,0	22,0	27,0	32,0	37,0	42,0	47,0	52,0	
$R=1 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/Вт, } T_{\text{мак}}^{\text{БГУ}}=45^{\circ}\text{C}$	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	
$R=2 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/Вт, } T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=32^{\circ}\text{C}$	6,0	8,5	11,0	13,5	16,0	18,5	21,0	23,5	26,0	
$R=2 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/Вт, } T_{\text{мак}}^{\text{БГУ}}=45^{\circ}\text{C}$	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	
$R=3 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/Вт, } T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=32^{\circ}\text{C}$	4,0	5,7	7,3	9,0	10,6	12,3	14,0	15,6	17,3	

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R=3 \text{ (M}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$ $T_{\text{max}}^{\text{БГУ}}=45\text{°C}$	8,3	10,0	11,6	13,3	15,0	16,6	18,3	20,0	21,7
$R=4 \text{ (M}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$ $T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=32\text{°C}$	3,0	4,3	5,5	6,8	8,0	9,3	10,5	11,7	13,0
$R=4 \text{ (M}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$ $T_{\text{max}}^{\text{БГУ}}=45\text{°C}$	6,3	7,5	8,8	10,0	11,2	12,5	13,7	15,0	16,3

Таблиця 3.3 – Тепловтрати для термофільного режиму збродження
($T = 45 \dots 55\text{°C}$; $T_{\text{опт}} = 48 \dots 51\text{°C}$)

Термічний опір та режим роботи	Температура зовнішнього середовища $T_{\text{зовн}}, \text{°C}$								
	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
$R=1 \text{ (M}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$ $T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=50\text{°C}$	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0
$R=1 \text{ (M}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$ $T_{\text{max}}^{\text{БГУ}}=55\text{°C}$	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0
$R=2 \text{ (M}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$ $T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=50\text{°C}$	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0
$R=2 \text{ (M}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$ $T_{\text{max}}^{\text{БГУ}}=55\text{°C}$	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5
$R=3 \text{ (M}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$ $T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=50\text{°C}$	10,0	11,7	13,3	15,0	16,7	18,3	20,0	21,7	23,3
$R=3 \text{ (M}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$ $T_{\text{max}}^{\text{БГУ}}=55\text{°C}$	11,7	13,3	15,0	16,7	18,3	20,0	21,7	23,3	25,0
$R=4 \text{ (M}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$ $T_{\text{опт}}^{\text{БГУ}}=50\text{°C}$	7,5	8,8	10,0	11,3	12,5	13,8	15,0	16,3	17,5
$R=4 \text{ (M}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$ $T_{\text{max}}^{\text{БГУ}}=55\text{°C}$	8,8	10,0	11,3	12,5	13,8	15,0	16,3	17,5	18,8

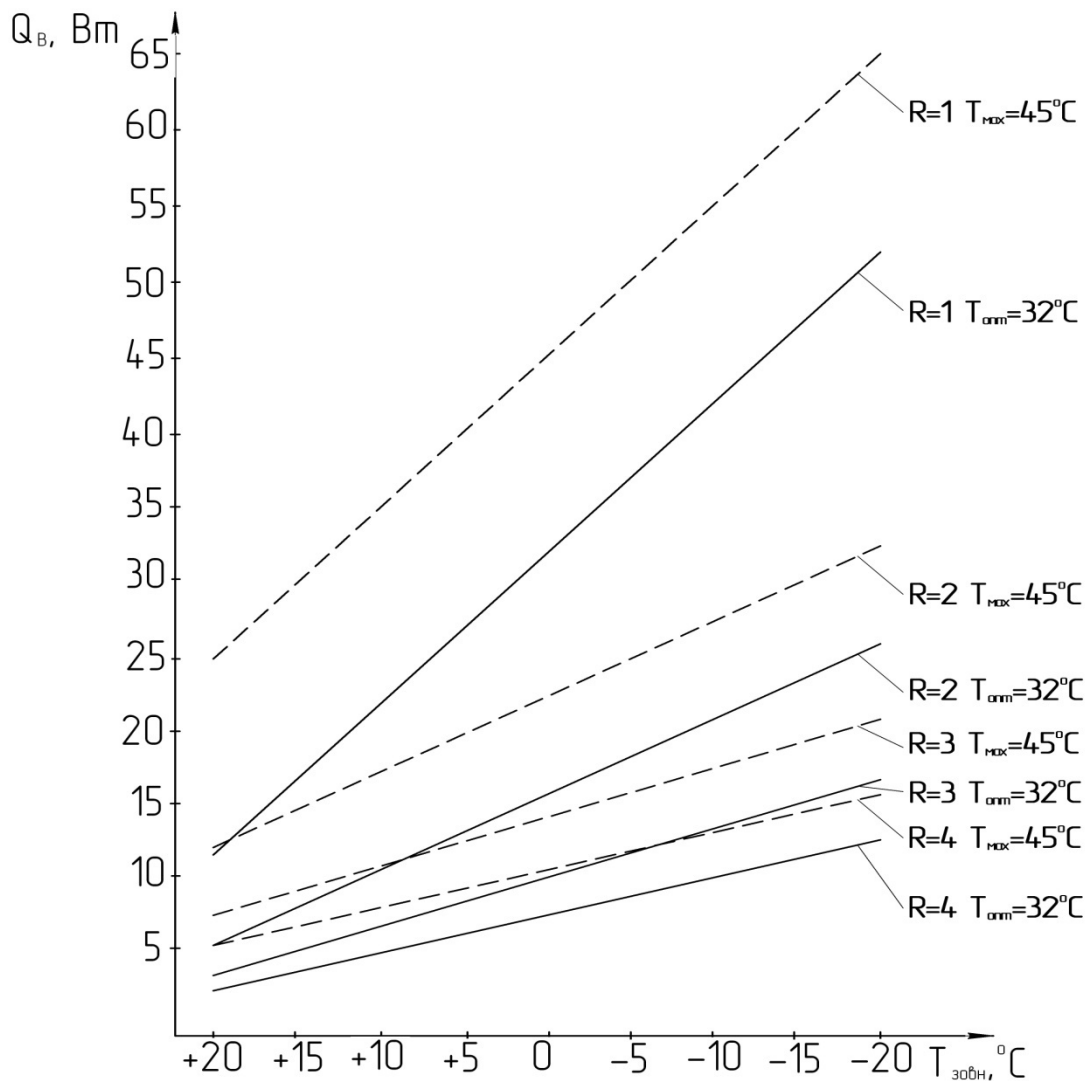


Рисунок 3.6 – Тепловтрати для мезофільного режиму залежно від зовнішніх температур

Аналіз даних чисельного експерименту щодо тепловтрат в системах біоконверсії свідчить про те, що при кріофільному режимі (рис. 3.2) анаеробний процес, який протікає в біогазовій установці при від’ємних температурах та термічному опорі, що дорівнює одиниці, є неефективним. При кріофільному режимі тепловтрати захисних конструкцій установки досягають 20...35 Вт. Для мезофільного режиму (рис. 3.3) при від’ємних температурах і термічному опорі, який дорівнює одиниці, вони досягають величини 45...65 Вт.

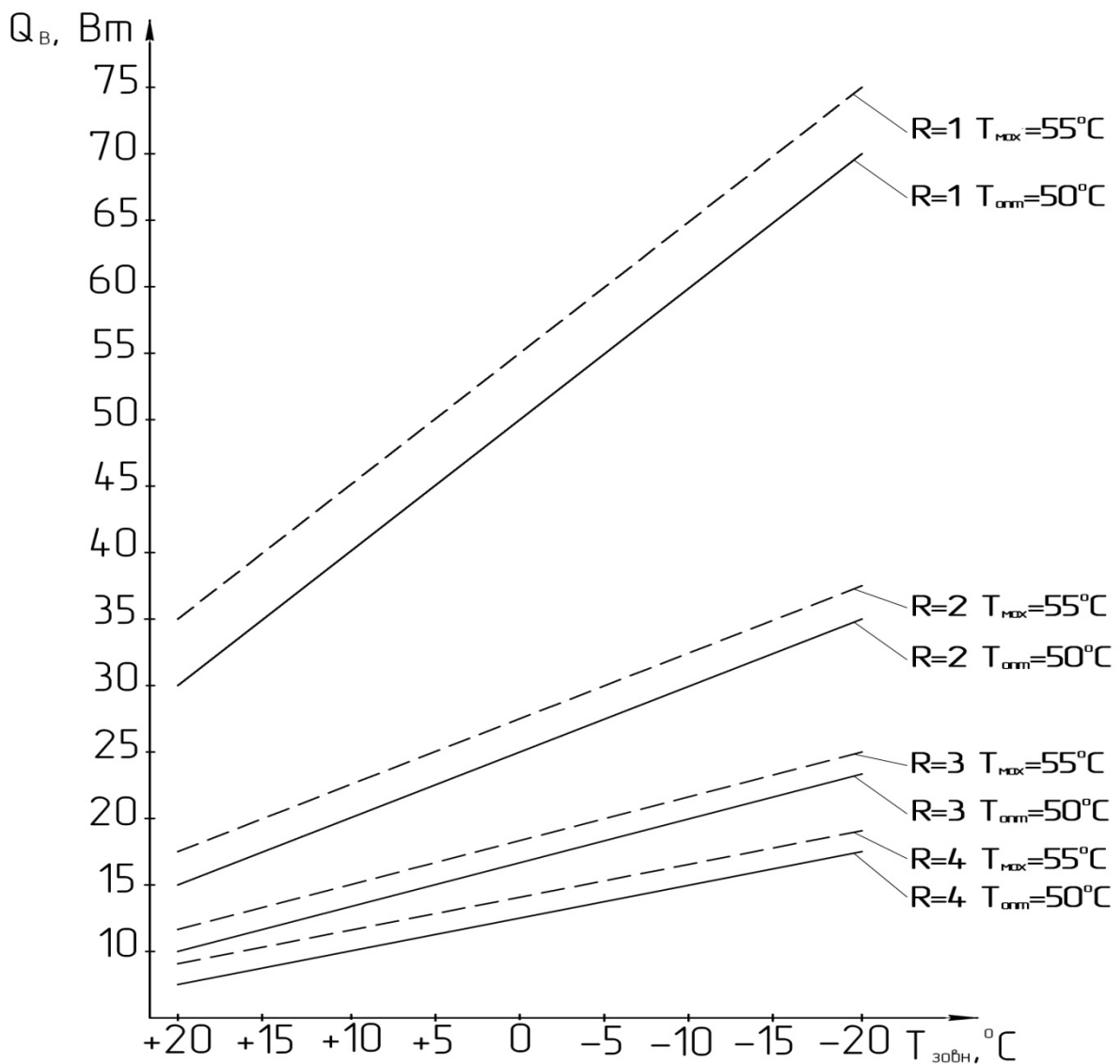


Рисунок 3.7 – Тепловтрати для термофільного режиму залежно від зовнішніх температур

Найбільш суттєві тепловтрати при термофільному режимі (рис. 3.7) при температурі $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ можуть досягати величини 75 Вт . З рис. 3.5 – 3.7 видно, що найменші тепловтрати досягаються при термічному опорі більше $3\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$. Це свідчить про те, що оптимальний тепловий баланс (2.4) може бути забезпечений шляхом підвищення термічного опору захисних конструкцій та зменшення тепловтрат з біогазової установки.

3.4 Багатошарові захисні конструкції біогазових установок

Використання теплоізоляційних матеріалів є необхідним заходом в комунально-побутовому секторі, системах інженерного забезпечення будинків, а також для підтримання температурного режиму, уникнення

температурних перепадів та зменшення витрат енергоресурсів в біогазових установках.

Температурний режим суттєво впливає на якість технологічного процесу та продуктивність біогазової установки, оскільки коливання температур в межах 4...5 °С різко змінює мікробіологічну активність анаеробних організмів [9]. Особливістю процесу в біогазових реакторах є те, що за рахунок недостатнього та нерівномірного прогрівання суміші коливання температур в об'ємі субстрату стають значними, що не відповідає технологічним вимогам. Це зменшує вихід біогазу порівняно з теоретичним [14, 31]. Вирішення задач термостабілізації біогазових реакторів можливо за рахунок підвищення термічного опору матеріалу захисних конструкцій.

Завдяки теплоізоляції зменшуються перепади температури і втрати теплоти між внутрішнім та зовнішнім середовищами біогазової установки. Головною технічною характеристикою теплоізоляційних матеріалів є теплопровідність – здатність матеріалу передавати теплоту. Варто відзначити, що величина теплопровідності теплоізоляційних матеріалів залежить від щільності матеріалу, виду, розміру, розташування пор та інших параметрів. Значний вплив на теплопровідність має температура і вологість матеріалу.

З метою підвищення термічних опорів конструкцій, зниження маси і вартості їх найчастіше виконують з повітряними прошарками [38]. В конструкції утеплення з вентиляльованим повітряним прошарком між утеплювачем і захисним облицюванням є вентиляльований повітряний прошарок. У холодну пору року водяна пара дифундує з приміщення назовні і потрапляє в утеплювач. У результаті вологість утеплювача зростає, а його теплозахисні властивості погіршуються. Завдяки наявності вентиляльованого повітряного прошарку волога не затримується в товщі утеплювача, а видаляється з неї висхідним потоком повітря [28]. Влаштування повітряного прошарку є розповсюдженим прийомом теплоізоляції, тому що коефіцієнт теплопровідності повітря має досить низьке значення (при $t = 0^{\circ} \text{C}$, $\lambda_{\text{в}} = 0,023 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$) [28]. Використання повітряного прошарку дозволяє підвищити термічний опір в середньому в 1,4...1,8 рази. Повітря, що знаходиться у прошарку, буде виступати як додатковий теплоізолятор.

Найбільш ефективним методом збільшення термічного опору конструкції з повітряним прошарком є її екранування. Один екран з алюмінієвої фольги зменшує тепловий потік у 20 разів. Зі збільшенням

числа екранів цей ефект зростає. На цьому принципі заснована теплоізоляція „альфоль”, виконана у вигляді плоских аркушів фольги на відстані 10...15 мм один від одного чи у вигляді м’ятих гофрованих листів фольги. Умовний коефіцієнт теплопровідності такого теплоізоляційного шару при гладких аркушах складає 0,031 Вт/(м²·град), при гофрованих – 0,028 Вт/(м²·град).

У зв’язку з цим з метою впровадження енергозберігаючих технологій актуальною задачею є розроблення багатошарових конструкцій з герметичним повітряним прошарком та із застосуванням тепловідбиваючих екранів, а також дослідження їх термічних опорів.

Запропоновано теплоізоляційну панель [35], що складається з каркасу та секцій, заповнених наповнювачем. Як секції використані пластикові пляшки з відрізаным дном, які герметично закріплені на вертикально встановлених на каркасі дротах, причому як наповнювач використовують сухе повітря, а каркас розміщений в захисному повітронепроникному корпусі. Загальну схему запропонованої конструкції теплоізоляційної панелі наведено на рис. 3.8.

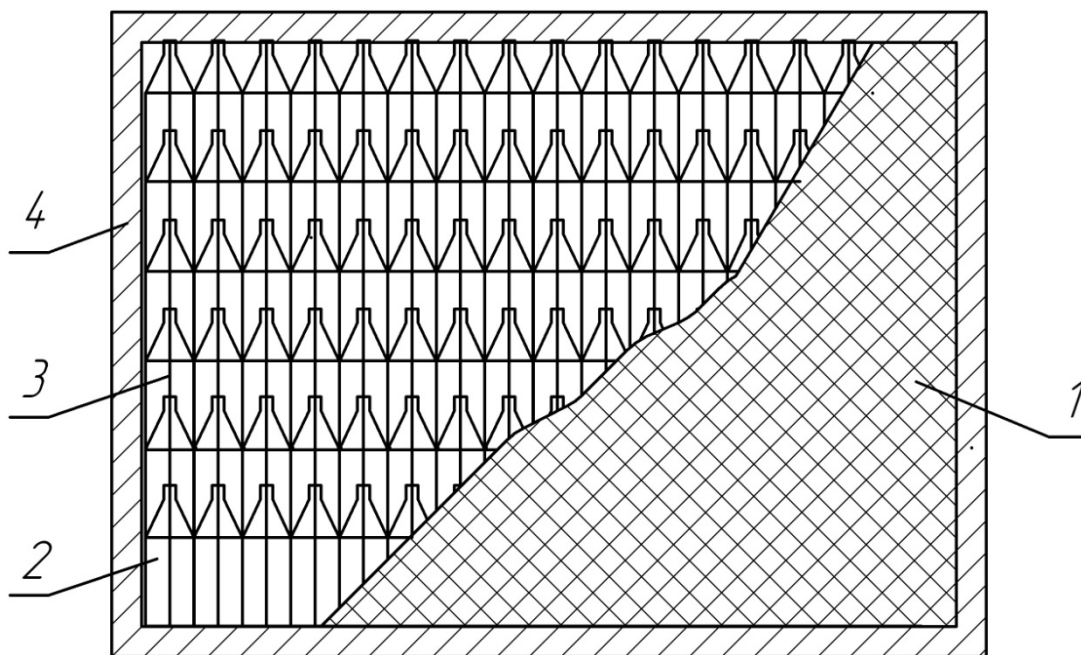


Рисунок 3.8 – Теплоізоляційна панель: 1 – каркас; 2 – пластикові пляшки з відрізаным дном; 3 – дріт; 4 – захисний повітронепроникний корпус

Багатошарова захисна конструкція від тепловтрат з герметичним повітряним прошарком підвищує термічний опір конструкції. Сухе повітря, яке знаходиться в пластикових пляшках 2, що розміщені в

каркасі 1, має низький коефіцієнт теплопровідності ($\lambda_b = 0,023 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$), завдяки чому значно знижується теплообмін між біогазовою установкою або приміщенням та навколишнім середовищем. Оскільки пластикові пляшки 2 з відрізанним дном з'єднані між собою у пакети герметично, то це перешкоджає проникненню водяної пари до наповнювача – сухого повітря. Захисний корпус 4 перешкоджає прямому контакту теплоізоляційної панелі із матеріалом захисної конструкції, а також надає панелі більшої міцності і довговічності.

Запропоновано також теплогідроізоляційну багатошарову конструкцію [40], в якій за рахунок введення теплоізоляційної панелі та алюмінієвої фольги зменшуються тепловтрати в навколишнє середовище. Теплогідроізоляційна багатошарова конструкція містить утеплювальний шар, що включає гідроізолювальний шар, металеву сітку та шар пароізоляції, а також додатковий шар теплоізоляції, як такий використовується алюмінієва фольга. Поверх нього розташовано шар пластикових пляшок із сухим повітрям, а зверху встановлено захисний матеріал від механічних пошкоджень.

Загальну схему запропонованої теплогідроізоляційної багатошарової конструкції наведено на рис. 3.9.

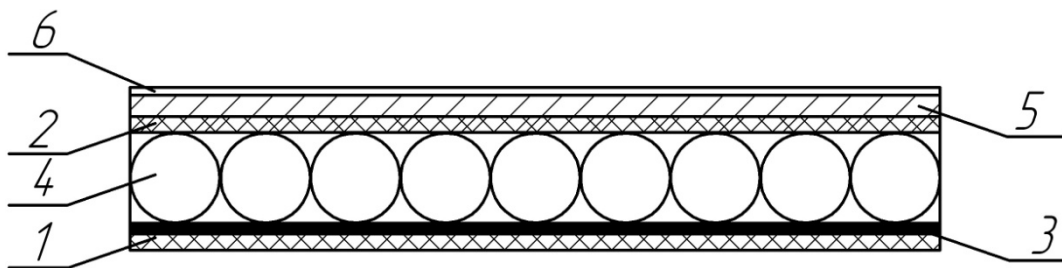


Рисунок 3.9 – Теплогідроізоляційна багатошарова конструкція: 1,2 – гідроізолювальні шари; 3 – алюмінієва фольга; 4 – теплоізоляційна панель із пластикових пляшок з сухим повітрям; 5 – металеву сітку; 6 – захисний матеріал від механічних пошкоджень

Теплогідроізоляційну багатошарову конструкцію виконано таким чином. Гідроізолювальні шари 1 і 2 захищають від проникнення вологи в приміщення або до корпусу біогазової установки. Поверх шарів 1 і 2 укладено алюмінієву фольгу 3, що служить для відбивання довгохвильового тепла та погіршення умов паропроникнення. На алюмінієву фольгу встановлено теплоізоляційну панель із пластикових пляшок 4, яка перешкоджає проникненню вологи. Це приводить до зниження теплообміну між біогазовою установкою чи приміщенням та

навколишнім середовищем. Металева сітка 5, що розташована поверх теплоізоляційної панелі, підвищує механічну міцність. Над сіткою 5 укладено захисний матеріал від механічних пошкоджень 6, який захищає від зовнішніх механічних пошкоджень та утеплює конструкцію.

Оцінивши ситуацію на українському ринку, можна відзначити, що в 2006 році продовжувалася тенденція перерозподілу ринку між видами технічної ізоляції. Сучасні спінені матеріали (на основі спіненого поліетилену і синтетичного каучуку) активно займали частину ринку, де раніше застосовувались вироби із мінерального і скловолокна. Цьому посприяли дефіцит і підвищення цін на технічну ізоляцію на основі базальтового і скловолокна. В 2006 р. спостерігалась ще одна тенденція. Вітчизняні підприємства почали усвідомлювати необхідність використання технічної ізоляції взагалі і якісної ізоляції особливо.

Мінеральна вата – волокнистий матеріал, який отримують із силікатних розплавів гірських порід, металургійних шлаків тощо. Головні властивості виробів з мінеральної вати – високий рівень тепло- і звукоізоляційності, стійкість до температурних деформацій, негігроскопічність, хімічна і біологічна стійкість, екологічна безпечність і легкість у монтажі. До того ж, вони належать до класу негорючих матеріалів.

Пінополістирол – спінений і екструдований – вже понад сорок років застосовується як теплоізоляційний матеріал. Він є міцним, характеризується низькими показниками теплопровідності і густини, що дає змогу використовувати його як конструктивний елемент [39]. Пінополістирол – екологічно чистий матеріал, виключно стійкий до дії агресивних хімічних середовищ.

Термічний опір конструкції, що складається з кількох шарів матеріалу, розташованих перпендикулярно до напрямку теплового потоку, визначається згідно з формулою [28]:

$$R_{\text{заг}} = \sum R_i, \quad (3.17)$$

де R_i – термічний опір теплопередачі для окремого шару, що обчислюється за формулою [38]:

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (3.18)$$

де δ_i і λ_i – товщина шарів захисної конструкції і теплопровідність їх матеріалів.

Для теплоізоляційних конструкцій із різних матеріалів, а саме мінеральної вати, пінополістиролу, багатошарової конструкції із

герметичним повітряним прошарком проведено числові експерименти з визначення термічних опорів цих матеріалів залежно від їх товщини для отримання оптимальних теплоізоляційних характеристик при підтриманні теплового режиму в біогазовій установці. Результати числових експериментів наведено в табл. 3.4, а графічні зміни термічних опорів залежно від товщини шару матеріалу зображено на рис. 3.10.

Таблиця 3.4 – Термічний опір теплоізоляційних матеріалів

Товщина матеріалу, см	Термічний опір R, (м ² ·град)/Вт			
	Мінеральна вата, $\lambda=0,050$ Вт/(м ² ·град)	Пінополістирол, $\lambda=0,038$ Вт/(м ² ·град)	Теплоізоляційна панель $\lambda=0,024$ Вт/(м ² ·град)	Теплогідроізоля- ційна багат шарова конструкція $\lambda=0,026$ Вт/(м ² ·град)
5	1,0	1,3	2,1	1,9
10	2,0	2,6	4,2	3,8
15	3,0	3,9	6,3	5,7
20	4,0	5,2	8,4	7,6
25	5,0	6,5	10,5	9,5

Аналіз результатів чисельного експерименту із визначення термічних опорів теплоізоляційних матеріалів залежно від їх товщини свідчить про те, що для отримання оптимальних теплоізоляційних характеристик для підтримання теплового режиму в біогазовій установці найефективнішим є використання запропонованих теплоізоляційних багат шарових конструкцій із герметичним повітряним прошарком. Крім того, затрати на виготовлення запропонованих багат шарових конструкцій є мінімальними завдяки використанню вторинних ресурсів.

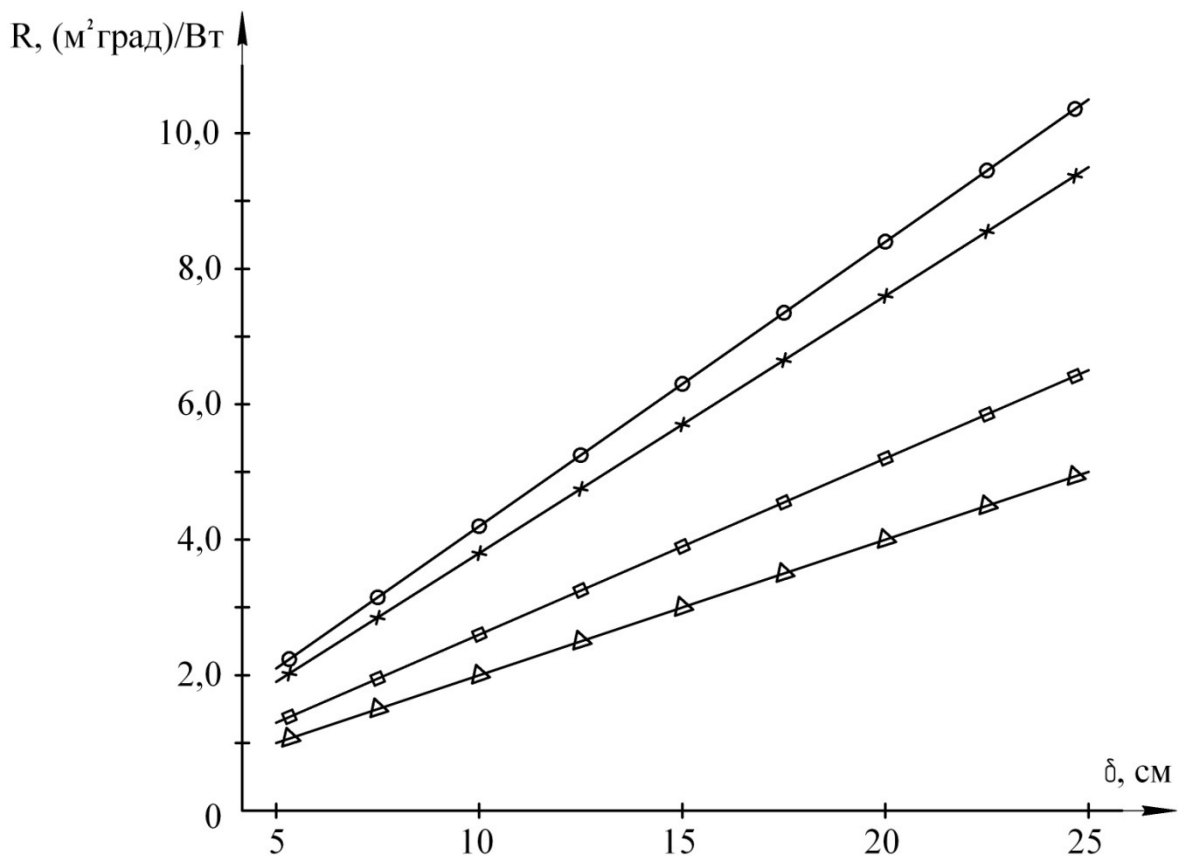


Рисунок 3.10. – Залежність термічного опору теплоізоляційного матеріалу від його товщини

- — теплогідроізоляційна багатошарова конструкція;
- x—x— — теплоізоляційна панель;
- — пінополістирол;
- △—△— — мінеральна вата

3.5 Шляхи вдосконалення устаткування для інтенсифікації процесу анаеробного бродіння субстрату в біогазових установках

Рентабельність біогазових установок пропорційна витратам енергії на обігрівання реактора. Мікробіологічні особливості протікання процесу анаеробного бродіння вимагають дотримання меж температурних режимів і температурної стабілізації, рівномірного прогріву середовища, відсутності зон переохолодження і перегріву [31, 42, 48].

Щоб отримати необхідну для процесу бродіння температуру і по можливості підтримувати її на сталому рівні, варто перш за все підігріти

до необхідної температури субстрат, який подається в реактор. Додаткове підведення теплоти необхідне для компенсації теплових втрат. Теплоту можна підводити до субстрату в робочому середовищі реактора або в пристрої, який його підживлює. Оскільки перепади температури негативно впливають на хід біологічного процесу анаеробного бродіння, необхідно по можливості поєднувати підведення теплоти до реактора з інтенсивним перемішуванням субстрату. Крім того, в системі підведення теплоти необхідно передбачати, щоб на поверхнях теплопередачі не відкладалися тверді частинки субстрату. Тому рекомендовані, наприклад, високі швидкості руху субстрату відносно поверхонь теплопередачі або поверхні, які легко очищуються. На роботу теплообмінника не повинна впливати присутність в субстраті твердих матеріалів (наприклад, стебел соломи, пір'я, шерсті) [3].

Для невеликих реакторів як пристрої перемішування використовуються теплообмінні нагрівні агрегати (наприклад, гнучкі неметалеві трубопроводи, циліндричні або плоскі теплообмінники), через які проходить гаряча вода і які можна виймати із реактора при його очищенні. Нагрівачі, вбудовані в стінки реактора, доцільно застосовувати з точки зору їх коефіцієнта корисної дії лише в тому випадку, коли вони можуть передавати теплоту до субстрату з обох сторін стінки так, як це відбувається в двокамерному реакторі з внутрішньою перегородкою. Крім того, підігрівання субстрату можна здійснювати безпосередньо, подаючи в нього гарячу воду або пару. Оскільки вода служить одночасно для розбавлення і турбулізації субстрату, який при завантаженні містить велику кількість твердих частинок, цей метод може виявитись ефективним [3]. Підігрівання субстрату шляхом введення пари під тиском призводить до підвищення вмісту вологи в біогазі, для усунення якої при підготовці газу до використання необхідні додаткові заходи. У великих установках, особливо в комунальних установках для очищення стічних вод, цим недоліком нехтують, зважаючи на більш високий енергетичний коефіцієнт корисної дії теплопередачі.

Рівномірну передачу теплоти до субстрату можна забезпечити за допомогою теплообмінників, розташованих поза реактором. Проте їх слід використовувати лише в поєднанні з системою вимушеної циркуляції субстрату, що спричиняє відповідне підвищення витрат енергії, але дозволяє надійно регулювати температуру бродіння. Ця система підігрівання має переваги завдяки одночасному підігріву та перемішуванню свіжого та циркулюючого субстрату. Різниця між

температурами субстрату, який надходить в реактор та тим, що там знаходиться, буде незначною. До того ж, надійно підтримується швидкість переміщення субстрату, яка є необхідною для запобігання випадіння твердого осаду на поверхнях теплообмінника. Розташування теплообмінників поза межами реактора значно полегшує доступ до них для обслуговування та ремонту.

Постійне рівномірне розподілення та переміщення рідини і твердих речовин, які містяться в ній та різняться за розміром, формою та щільністю, є передумовою безперешкодного та ефективного протікання процесу бродіння.

У бродильних камерах необхідно проводити стрімке перемішування для попередження виникнення у верхній частині реактора спливаючої речовини. Це значно прискорює процес бродіння і вихід біогазу. Без перемішування для отримання такої ж продуктивності об'єм реактора повинен бути значно збільшений.

Перемішування здійснюється [9, 41, 27]:

- механічними мішалками різної форми або насосами з приводом від електродвигуна;
- гідравлічними насадками за рахунок енергії струменя, перекачуваного насосом зброджуваного гною або рециркуляцією;
- надмірним тиском біогазу, що пропускається через барботер або трубку, розташовану в нижній частині реактора.

При застосуванні обертових перемішувальних пристроїв висувуються високі вимоги до форми реактора, оскільки він повинен забезпечувати необхідні умови для зменшення утворення осаду і плаваючої кірки. Швидкість переміщення, що потрібна для інтенсивного перемішування субстрату, визначається умовами турбулентності в усіх зонах реактора. Тому такі мішалки можуть ефективно використовуватись лише в невеликих реакторах при дії на важкі субстрати. Для субстратів малої в'язкості, що містять мало речовин, схильних до осадження чи утворення плаваючої кірки, механічні перемішувальні пристрої є більш ефективними і у відносно великих реакторах.

У великих реакторах, особливо циліндричної форми, субстрат можливо перемішувати гідравлічним способом, тобто за допомогою струменя рідини. В численних біогазових установках, збудованих в Федеративній Республіці Німеччині 20 років тому, добре зарекомендувала себе система з рухомим соплом. При горизонтальному направленні сопла, яке обертається навколо осі реактора та може переміщуватись вздовж неї,

струмінь рідини потрапляє в усі зони робочого простору реактора. Гідравлічні системи з нерухомим соплом вимагають, навпаки, ретельного підбору згідно з розмірами і формою реактора, щоб забезпечувати достатнє перемішування субстрату в усіх зонах реактора.

Високу якість перемішування можна отримати, нагнітаючи отриманий в результаті бродіння газ в рідкий субстрат. Проте при цьому субстрат не повинен мати високу в'язкість та схильність до утворення плаваючої кірки. В іншому випадку слід безперервно видаляти частинки, які спливають, або відокремлювати великі частинки твердого матеріалу від субстрату перед завантаженням його в реактор.

Структурну схему шляхів інтенсифікації теплового процесу анаеробного бродіння субстрату в біогазових установках наведено на рис. 3.8.

Перспективними шляхами вдосконалення устаткування для інтенсифікації процесу анаеробного бродіння субстрату в біогазових установках з метою збільшення виходу біогазу та зменшення часу перебування субстрату в установці є механічне перемішування. Одним із напрямків інтенсифікації та зменшення енерговитрат на виробництво біогазу є також зменшення тепловтрат через захисні конструкції корпусу установки.

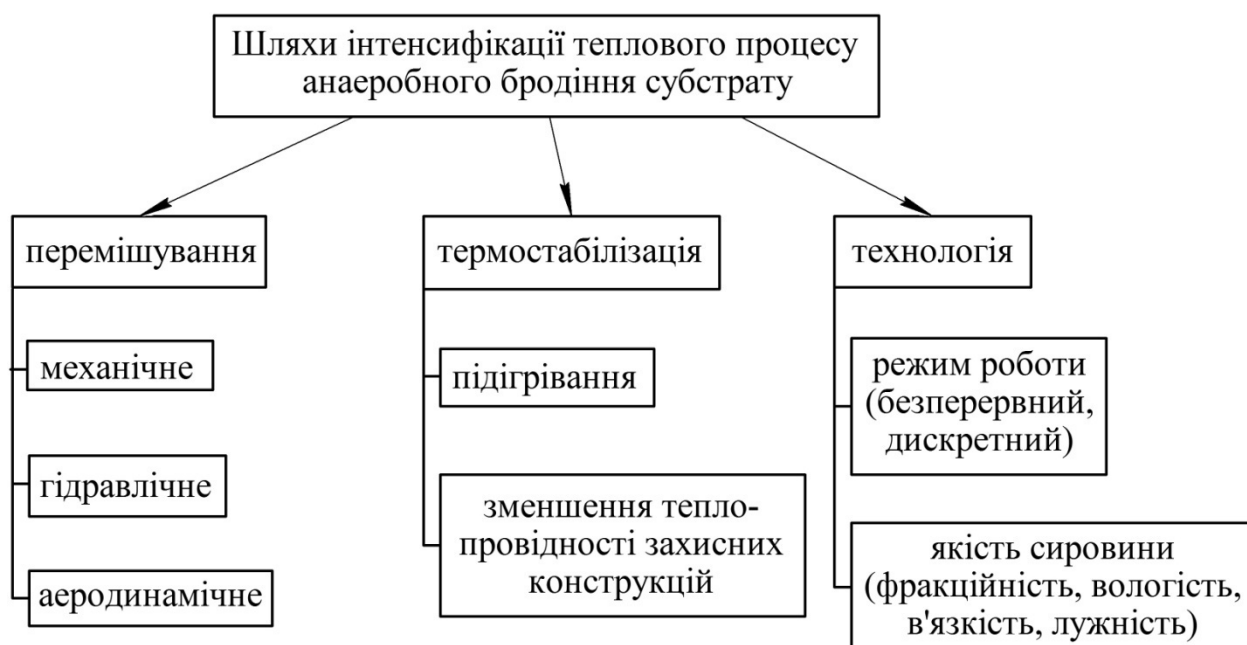


Рисунок 3.11 – Структурна схема шляхів інтенсифікації теплового процесу анаеробного бродіння субстрату в біогазових установках

3.5.1 Барботажна інтенсифікація теплообміну між теплообмінником і середовищем

Для покращення протікання процесу бродіння, термостабілізації, активного перемішування, інтенсифікації теплообміну між нагрівальним елементом і середовищем авторами пропонується конструкція біореактора з барботажною інтенсифікацією теплообміну [32]. Рециркуляція виробленого біогазу в зону теплообміну позитивно впливає на процес бродіння. Масове барботування є недоцільним, оскільки створює навколо теплообмінника газову «подушку», що погіршує передачу тепла від нагрівника до середовища. Тому рекомендується локальне газорідинне омивання теплообмінної поверхні. Струмини газу будуть створювати підйомні течії і омивати нагрівник двофазним середовищем. Реактор (рис. 3.9) містить утеплений корпус 1, до якого за допомогою верхньої 4 та нижньої 2 опорних газорозподільних решіток кріпиться робочий резервуар 3. В верхній частині робочого резервуара 3 закріплено газопровід 5. Газопровід 5 сполучає низ утепленого корпусу та верх робочого резервуара. У нижній частині робочого резервуара 3 розміщено нагрівальний елемент 6 та гребінку 8. До газопроводу приєднано компресор 7, патрубок відведення біогазу на потреби господарства та запірна арматура 9.

Процес вироблення біогазу протікає таким чином. Із накопиченням біогазу він проходить у газопровід 5 і, набуваючи потрібного тиску за допомогою компресора, частина його повертається у робочий резервуар, де розподіляється за допомогою гребінки і струменями обтікає теплообмінну поверхню. Це приводить до інтенсифікації теплообмінних процесів, активного перемішування та термостабілізації процесу бродіння біомаси.

Конструкція біореактора з прошарком між утепленим корпусом та робочим резервуаром (рис. 3.12) дозволяє підвищити термічний опір стінки реактора. Підведення виробленого газу в зону розташування теплообмінника дозволить не тільки інтенсифікувати процеси теплообміну між стінкою нагрівника та середовищем, але й досягти більш рівномірного перемішування середовища. В результаті досягається покращення процесу анаеробного бродіння біомаси, що приводить до збільшення виходу біогазу і зниження енерговитрат.

Аналізуючи результати досліджень [9], слід відзначити, що інтенсивність тепловіддачі мало залежить від теплового потоку. Це можна пояснити незначним впливом вільної конвекції.

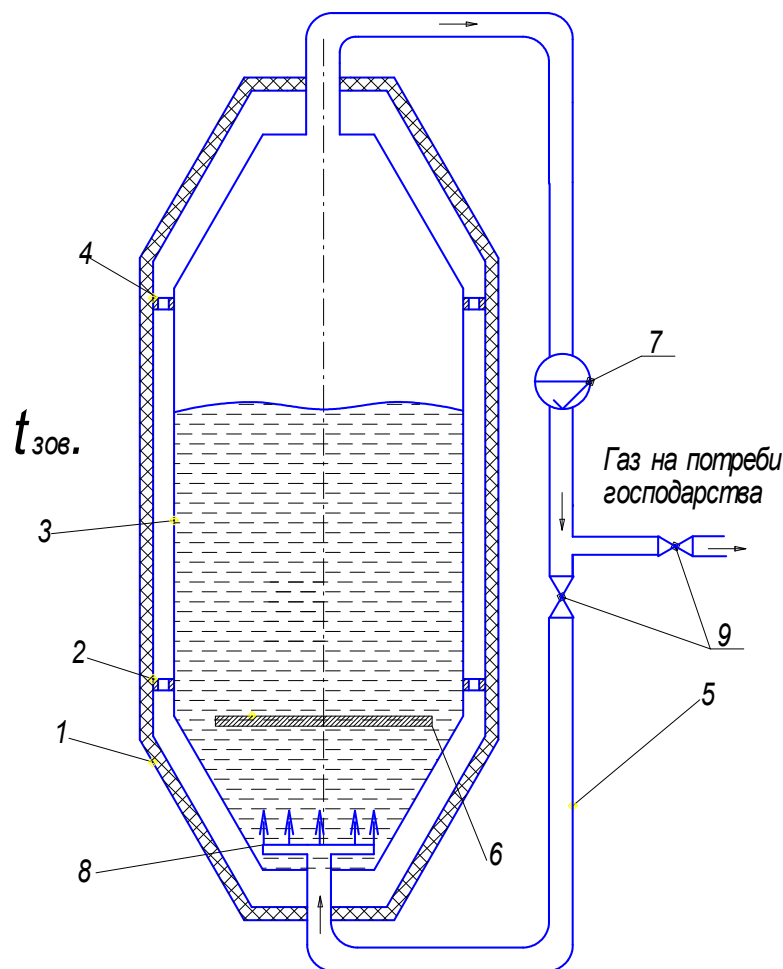


Рисунок 3.12 – Біогазовий реактор з барботажною інтенсифікацією теплообміну

Основний фактор інтенсифікації – рух бульбашок, який викликає конвективні потоки. Швидкість циркуляції визначається площею перерізу, якою проходить підйомний потік біогазу. Тому безпосереднє барботування знизу в каналі, що утворений стінками навколо нагрівника, інтенсифікує тепловіддачу від стінки нагрівника до середовища. Оптимальним вирішенням поставленої задачі можна назвати спрямування газових потоків на теплообмінну поверхню без обмежувальних стінок при безпосередньому контакті струменя і стінки теплообмінника.

Результати експериментального дослідження інтенсифікації теплообміну для суспензії з концентрацією сухої речовини $C=8\%$ і $C=3,5\%$ та води наведені на рис 3.13 [10]. Необхідно відзначити, що коефіцієнт тепловіддачі для суспензії коливається в діапазоні 53...69% відповідно до показника для води. Попередні дослідження довели незначний вплив теплового потоку та температури середовища на інтенсивність теплообміну.

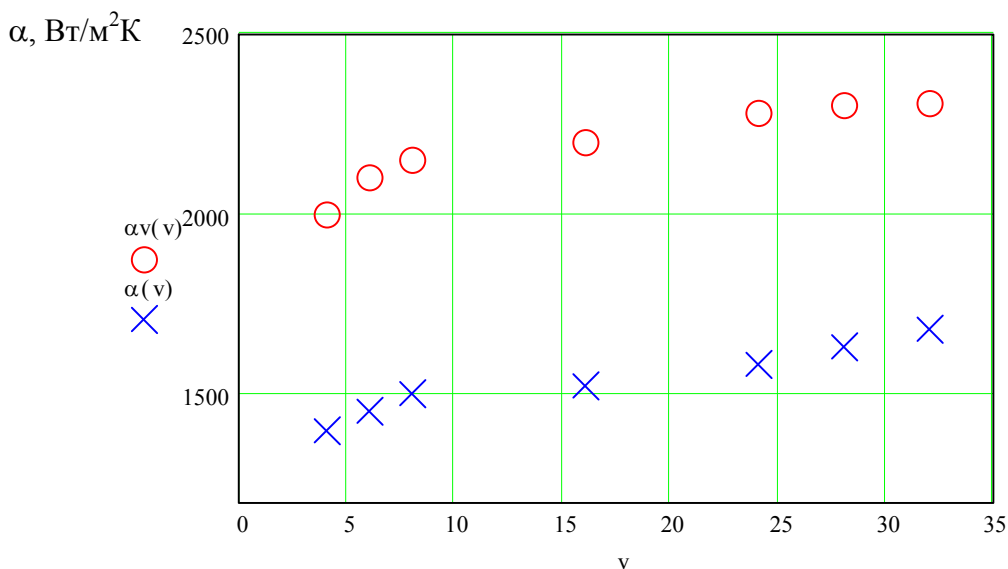


Рисунок 3.13 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі α від приведеної швидкості газорідного потоку в субстраті: X – середовище: суспензія $C=8\%$; O – середовище: вода; V- приведена швидкість газового потоку.

Як видно з рис. 3.13, коефіцієнт тепловіддачі для води більший коефіцієнта тепловіддачі для суспензії $C=8\%$ в 1,3...1,8 раза. Це обумовлено в'язкістю рідини, яка перешкоджає піднімальному руху бульбашок газу в середовищі [10, 39, 44, 72].

Результатами експериментальних досліджень встановлено, що безпосереднє барботування теплообмінної поверхні підвищує коефіцієнт тепловіддачі як для води, так і для суспензії в середньому в 1,5...2,5 раза (рис. 3.13). Безпосереднє барботування в каналі має ще більший вплив на зростання коефіцієнта тепловіддачі, але даний спосіб є недоцільним для реальних умов технологічних реакторів, оскільки буде викликати застійні явища та стінки каналів будуть заважати перемішуванню й вільному руху субстрату.

Використовуючи отримані залежності і середні значення параметрів питомого теплового потоку (q), швидкості газорідної фази ($w_{Г}$), температури рідини (t_p), побудовано залежність впливу відстані від краю ділянки газорідного омивання на відношення $\beta = \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\text{вк}}}$ (рис. 3.14), де Δt_{\max} – різниця температур стінки нагрівального елемента і рідини в точці максимального омивання, $\Delta t_{\text{вк}}$ – те ж саме за умов вільної конвекції. Дане співвідношення характеризує вплив струменів газу на тепловіддачу.

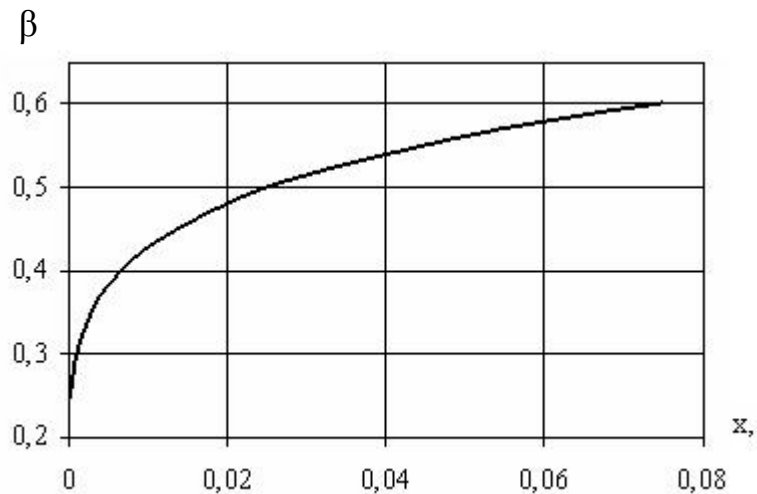


Рисунок 3.14 – Розрахункові значення відношення температурних напорів при значеннях параметрів : $q = 7,6 \text{ кВт/м}^2$; $w_2 = 0,052 \text{ м/с}$; $t_p = 30^\circ\text{C}$

Згідно з рис. 3.14 найефективніше газові струмені впливають на тепловіддачу в центрі однофазної області на відстані до 50 мм від струменя. На більших відстанях ($X > 50 \text{ мм}$) крива згладжується, тобто вплив незначний. Таким чином, отвори барботажного пристрою доцільно встановлювати на відстані не більше 100 мм один від одного, що забезпечить високу інтенсивність тепловіддачі від стінки до локального нерівномірного газорідного середовища.

Використання повітряного прошарку між утепленим корпусом та робочим резервуаром дозволить підвищити термічний опір стінки біореактора в середньому в 1,4...1,8 рази. Повітря, що знаходиться у прошарку, буде виступати не тільки як додатковий теплоізолятор, але й передавати тепло від більш нагрітих зон в менш нагріті. Це дозволить термостабілізувати процес анаеробного бродіння в запропонованій конструкції біореактора (рис. 3.12) порівняно зі звичайною конструкцією реактора.

3.5.2 Вібраційна інтенсифікація процесу анаеробного бродіння

Активне перемішування та інтенсифікацію анаеробного бродіння біомаси теплообміну можна досягти, використовуючи вібраційні процеси прискорення теплообміну. Авторами пропонуються конструкції біореакторів, які отримані внесенням додаткових секцій та віброактиватора у стандартні конструкції (рис. 3.15) [50]. Ці конструктивні рішення дозволяють позбавитись таких недоліків в

існуючих біореакторах: застійних зон, значних площ теплообміну, недостатнього використання потенціалу сировини. Крім того, це дозволяє підвищити продуктивність біореактора за рахунок більш глибокого бродіння та активації з перемішуванням сировини.

Біореактор містить резервуар 1 (рис. 3.15), який зверху закривається теплою на каркасі 8, ковпак 3, який рухається по напрямних ковпака 2, і в якому розміщені труба споживача 4, манометр 5 та гідрогерметизатор 6. В середині реактора розміщений підігрівач біомаси 7 та біомаса 9, яку приводить у рух пластина-активатор 10. Пластина-активатор кінематично зв'язана з штоком 11 підпружиненого гідроциліндра 12, робоча камера якого гідравлічно сполучена із напірною магістраллю 13 гідронасоса 16, до якої приєднаний імпульсний клапан - пульсатор 15.

Біореактор працює таким чином. При завантаженні біомаси в резервуар останній закривають ковпаком, що рухається по напрямних ковпака 2 та герметизують гідрогерметизатором 6. В ковпаці 3 розташований манометр 5 для спостереження за тиском газу та труба споживача 4 для відведення газу. Гідронасос 16 з імпульсним клапаном-пульсатором 15 змушують здійснювати коливальні рухи шток підпружиненого гідроциліндра 12, що в свою чергу приводить у рух пластину-активатор 10. Імпульсні коливання суміші дозволяють активніше перемішуватись субстрату. Також за рахунок омивання поверхні підігрівача 7 біомаси інтенсифікується тепловіддача від стінки нагрівального елемента до середовища. Причому прогрів в біореакторі буде рівномірним завдяки активному перемішуванню біомаси. Також пульсація рідини дозволить біогазу легше прориватися крізь суміш та відбиратися через трубу споживача 4.

Дана конструкція сприяє процесам термостабілізації та інтенсифікації анаеробного бродіння, а також збільшенню виходу кінцевого продукту – біогазу з мінімальними енерговитратами на одиницю маси субстрату.

Для досягнення безперервності анаеробного бродіння, термостабілізації і інтенсифікації теплообміну пропонується конструкція секційного біореактора з віброактиватором [51, 71, 80]. Біореактор (рис. 3.16) працює таким чином. Завантажують біомасу в резервуар 1 через шахти 12, регулюючи подачу заслінками 8. Біомаса опиняється в першій секції резервуара, де вона нагрівається підігрівачем 3 і проходить першу стадію анаеробного бродіння. Після завершення першої стадії за рахунок зміни гідравлічного опору колосникових решіток 4 за допомогою

регулятора 13 біомаса опиняється в другій секції, де проходить другу стадію бродіння. В першу секцію завантажуються нова порція біомаси. Отриманий біогаз відводиться за рахунок труб споживача 6. Завершальну стадію бродіння біомаса проходить в третій секції резервуара. 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 ковпак 2 рухається по напрямних 10 і знімається. Регуляція гідравлічного опору провальних колосникових решіток відбувається за рахунок регулятора 13.

Гідронасос 16 з імпульсним клапаном-пульсатором 15 вимушують здійснювати коливальні рухи шток 17 підпружиненого гідроциліндра 18. Це, в свою чергу, приводить у рух пластину-активатор 14. Імпульсні коливання суміші дозволяють активніше перемішуватись субстрату, а також за рахунок омивання субстратом поверхні підігрівача 7 біомаси інтенсифікувати тепловіддачу від стінки нагрівального елемента до середовища. Основну стадію бродіння субстрат проходить в першій секції при температурі $+33\text{ }^{\circ}\text{C}$, активно перемішуючись вібропластиною.

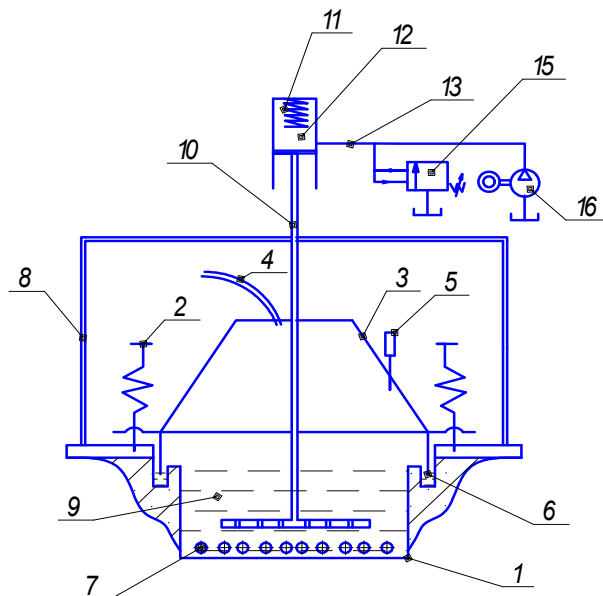


Рисунок 3.15 – Біореактор з віброактивацією анаеробного бродіння

Тепловіддача від стінки нагрівального елемента до суспензії з концентрацією сухої речовини $C=3,5\%$ і $C=8\%$ відповідає умовам роботи біогазового реактора. Використання коливань середовища дозволить попередити налипання часточок суспензії на нагрівальний елемент, уникнути застійних зон і активізувати теплообмін. Для

експериментального визначення активуючого впливу вібраційних коливань на інтенсифікацію теплообмінних процесів між нагрівальним елементом БГУ і субстратом було проведено серію дослідів.

Як середовище в дослідах використовувалася суспензія з концентрацією сухої речовини $C=8\%$.

Діапазон зміни основних параметрів дослідження:

- питомий тепловий потік $q = 0,5 \dots 16 \text{ кВт/м}^2$;
- температура рідини вдалині від стінки $t_p = 20 \dots 43 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температурний напір $\Delta t = 1 \dots 18 \text{ }^\circ\text{C}$;
- амплітуда коливань пластини-активатора коливань $A = 0 \dots 100 \text{ мм}$;
- частота коливань пластини-активатора $f = 0 \dots 5 \text{ Гц}$;
- концентрація сухої речовини $C=8\%$.

Активне коливання дозволяє утворити середовище в біореакторі з мінімальним розшаруванням. Активному перемішуванню в більшій мірі піддаються легкі частки в верхній зоні і вода. Важкі частки нижньої зони виконують коливання в зоні, що не перевищує товщини свого шару намулювання. Експериментальну залежність $Nu = f(Re_{\Delta u})$ наведено на рис 3.16.

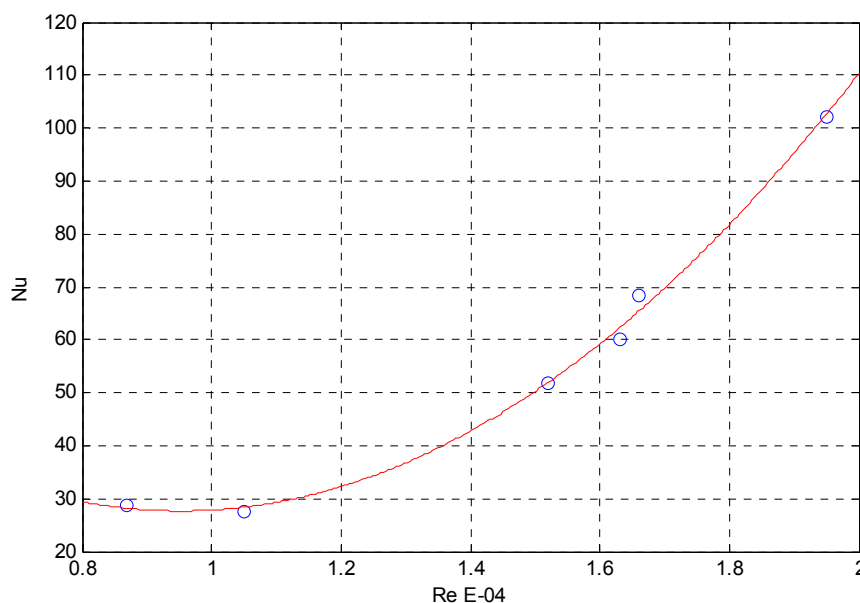


Рисунок 3.16— Експериментальна залежність $Nu = f(Re_{\Delta u})$ при значенні $q = 15000 \text{ Вт/м}^2$ апроксимована кубічним сплайном

Критерій Нуссельта і вібраційний критерій Рейнольдса визначалися за формулами:

$$Nu = \frac{(\alpha \cdot l)}{\lambda} , \quad (3.19)$$

де $Re_{\Delta u}$ – коливальний критерій Рейнольдса, який визначається за формулою

$$Re_{\Delta u} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot d \cdot \frac{A}{\nu} . \quad (3.20)$$

де f – частота коливань, Гц;

d – діаметр нагрівального елемента, м;

A – амплітуда коливань, м;

ν – кінематична в'язкість субстрата, м²/с.

Згідно з розрахунками, при вібрації середовища біореактора коефіцієнт тепловіддачі від нагрівника до середовища зростає у 2...4 рази.

Другу і третю стадію анаеробного бродіння субстрат буде проходити в наступних секціях реактора, що дозволяє першу заповнити новою порцією сировини. Управління процесом отримання біогазу можливо автоматизувати за рахунок використання триходового крана на обв'язці теплообмінника та заслінки на колосникових решітках з сервоприводами.

Використання додаткових секцій реактора дозволяють досягти більш глибокого ступеня очищення сировини та збільшити питому вагу отримання біогазу на одиницю маси субстрату.

Розрахунок енергетичного балансу свідчить, що збільшення виходу газу з одиниці маси субстрату за рахунок бродіння у додаткових секціях резервуара визначається таким чином:

$$\nu = \frac{V_0}{V} , \quad (3.21)$$

де V_0 – вихід біогазу при стандартному циклі бродіння;

V – вихід біогазу в реакторі запропонованої конструкції,

ν – коефіцієнт виходу біогазу.

При циклі бродіння в першій секції 10 діб, в другій і в третій відповідно по 5 діб. Загальний час бродіння субстрату складе 20 діб. Це збільшує вихід біогазу порівняно з односекційним реактором в $\nu = 1,8...2,2$ рази залежно від виду субстрату.

Тобто з кожного кілограма органічної речовини за рахунок секційності буде виділятися додатково 0,35...0,4 м³ біогазу через збільшення часу бродіння у додаткових секціях бродіння. У зв'язку з тим, що з 10 по 20 добу в першій секції буде бродити нова порція субстрату, то загальна витрата біогазу з реактора складе ще додаткових 0,4...0,45 м³ з кожного кілограма органічної речовини нової порції.

Затрати енергії на вібраційне перемішування середовища субстрату для реактора об'ємом до 500 м³ складають 40...60 Вт/м³.

Реактор (рис 3.17) працює таким чином: при завантаженні біомаси в резервуар 1 через шахти завантаження біомаси 12 подачу регулюють заслінками 8. Біомаса опиняється в першій секції 13 резервуара 1, де вона нагрівається підігрівачем, що вмонтований в колосникові решітки 4, і проходить першу стадію бродіння.

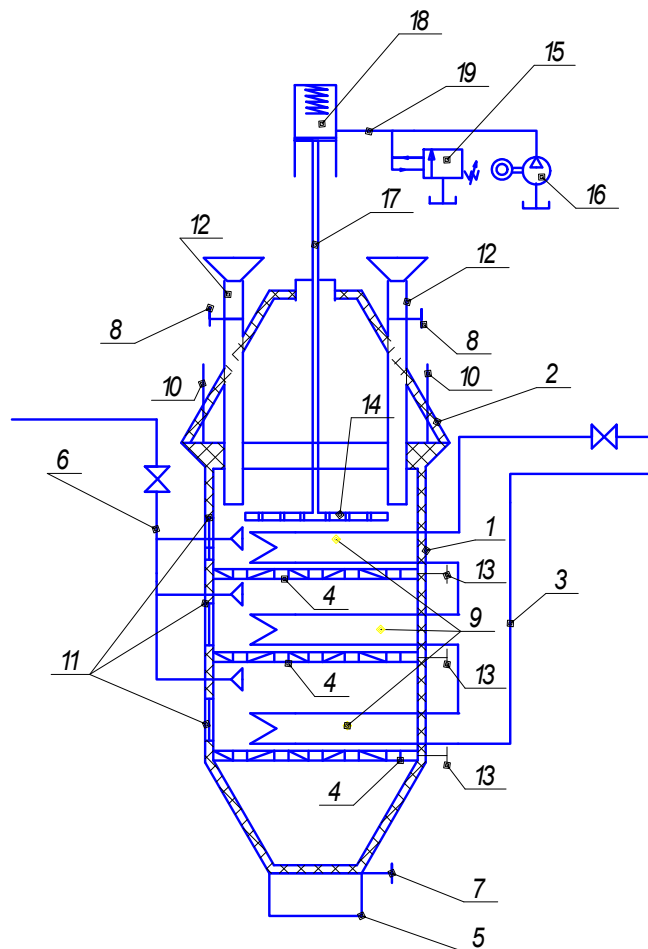


Рисунок 3.17 – Секційний біогазовий реактор з віброінтенсифікацією бродіння

Модифікацією секційного біореактора з вібраційною інтенсифікацією бродіння є реактор, який показано на рис. 3.18.

За рахунок зміни гідравлічного опору колосникових решіток 4 за допомогою регулятора 14, біомаса опиняється в другій секції 13, де проходить другу стадію бродіння. В першу секцію завантажуються нова порція біомаси. Отриманий біогаз відводиться за рахунок труб споживача 6. Третю стадію бродіння біомаса проходить в третій секції 13 резервуара 1, де після завершення бродіння біомаса потрапляє в ємність збирання біодобрих 5, завантаження якої регулюється заслінкою 7. Процеси бродіння візуально оцінюють за допомогою оглядових вікон 11. При

необхідності відкрити резервуар 1 ковпак 2 рухається по напрямних 10 і знімається. Регуляція гідравлічного опору провальних колосникових решіток відбувається за рахунок регулятора 14.

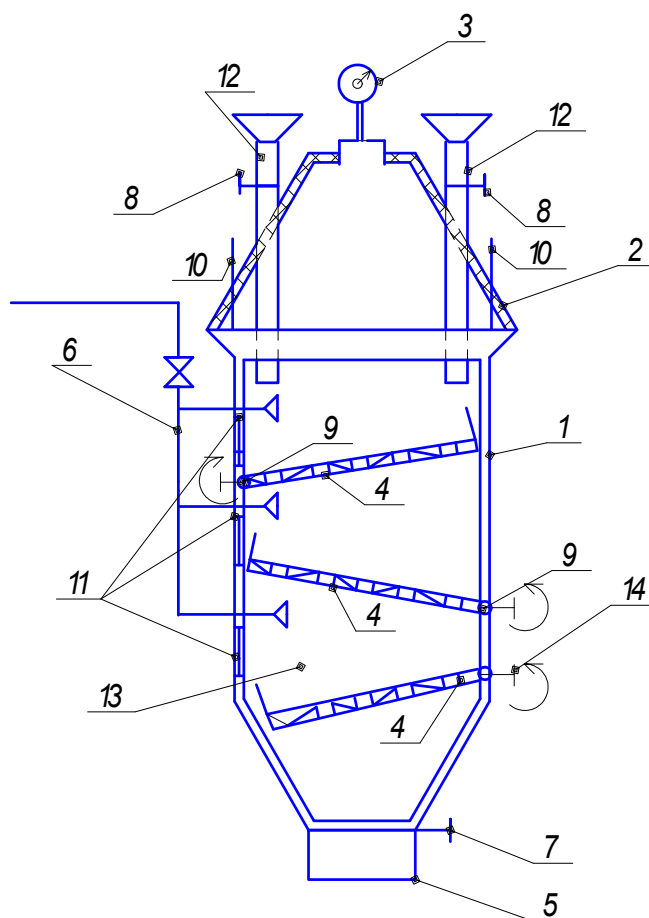


Рисунок 3.18– Біогазовий реактор з віброінтенсифікацією бродіння, що секційно регулюється

Вібратор примушує здійснювати коливальні рухи колосникові решітки 4. Імпульсні коливання суміші дозволяють активніше 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. Пульсація рідини дозволить біогазу легше прориватися крізь суміш та відбиратися через трубу споживача 6. В кожній секції реактора 1 колосникові решітки виконують коливання з індивідуально заданими частотами і амплітудами, що дозволяє досягти індивідуальних параметрів бродіння.

3.5.3 Перемішувальні пристрої для інтенсифікації теплообмінного процесу анаеробного бродіння

Для збільшення виходу біогазу в результаті анаеробного бродіння субстрату в біогазовій установці широко застосовується процес перемішування суміші. Перемішування інтенсифікує процеси всередині біореактора та запобігає утворенню осаду і плаваючої кірки на поверхні біомаси, що призводить до збільшення утворення біогазу із органічних відходів, а, отже, і до зростання ефективності біогазової установки. Відомо механічне, гідравлічне і аеродинамічне перемішування сумішей. Найбільш перспективним устаткуванням для інтенсифікації процесу анаеробного бродіння субстрату є біореактори із механічним перемішуванням.

Механічне перемішування сумішей здійснюється лопатевими, пропелерними, турбінними та спеціальними мішалками. Класифікацію перемішувальних пристроїв для біогазових реакторів наведено на рис. 3.19

Турбінні мішалки оснащено лопатями, і вони мають чітко окреслений ротор. Залежно від способу кріплення лопатей і їх конфігурації в анаеробній біоконверсії зустрічаються різні типи турбінних мішалок. Найбільш простою та одночасно вискоефективною є мішалка з прямими радіально розміщеними лопатями. Плоскі лопаті можуть бути нахилені під певним кутом відносно площини обертання мішалки для кращого перемішування субстрату. Пропелерні мішалки вважаються найбільш ефективними в тих випадках, коли необхідно створити значну циркуляцію субстрату в біогазовій установці при мінімальній витраті механічної енергії. Вони виконують цю задачу краще, ніж мішалки іншого типу, наприклад, турбінні. Пропелерні мішалки створюють осьову циркуляцію органічних відходів всередині реактора за рахунок насосного ефекту, тому вони легко піднімають тверді частинки з його дна.



Рисунок 3.19 – Класифікація перемішувальних пристроїв для біогазових реакторів

Лопатеві мішалки почали першими використовуватись в системах біоконверсії та в хімічній промисловості взагалі. На сьогодні вони використовуються у тих випадках, коли немає необхідності в інтенсивній радіально-осьовій циркуляції органічної суміші в біогазовій установці. Основною перевагою лопатевих мішалок є їх простота та низька вартість.

Якірні та рамні мішалки вирізняються виключно низьким числом обертів. Діаметр таких мішалок наближається до діаметра біогазового реактора, а зазор між лопаттю та стінкою реактора є незначним. Таким чином, у випадку застосування цих мішалок можна уникнути місцевого перегріву субстрату чи виникнення осаду на дні реактора.

Шнекові мішалки працюють за тим принципом, що і пропелерні, але при менших числах обертів. Вони застосовуються для перемішування сумішей значної в'язкості, зокрема для органічного субстрату всередині біогазової установки. В цьому випадку вони затрачають менше енергії, ніж пропелерні мішалки для створення однакової циркуляції субстрату в біореакторі.

Використання дискових та скребкових мішалок в процесах біоконверсії є неефективним, тому майже не застосовується.

3.5.4 Конструкції біогазових установок з інтенсифікацією анаеробного бродіння шляхом перемішування субстрату

Запропоновано біогазові реактори з різними конструкціями мішалок, а саме з лопатевим перемішувачем, із шнековим перемішувачем, із вертикальною пропелерною мішалкою.

Біогазовий реактор [59] містить резервуар 1, який зверху накритий каркасом теплиці 8 (рис. 3.20). Всередині резервуара 1 розміщений лопатевий перемішувач 9, що служить для перемішування біомаси. На валу 2 лопатевого перемішувача 9 закріплений підігрівач біомаси 3. Над лопатевим перемішувачем 9 змонтована захисна газорозподільна решітка 7, над якою влаштований штуцер відведення біогазу до труби споживача 4. Під лопатевим перемішувачем 9 розміщене дно 10, яке шарнірно прикріплене до корпусу 1 з можливістю опускання вниз. Наверху

конструкції міститься бункер завантаження біомаси 5 з шиберною засувкою 6.

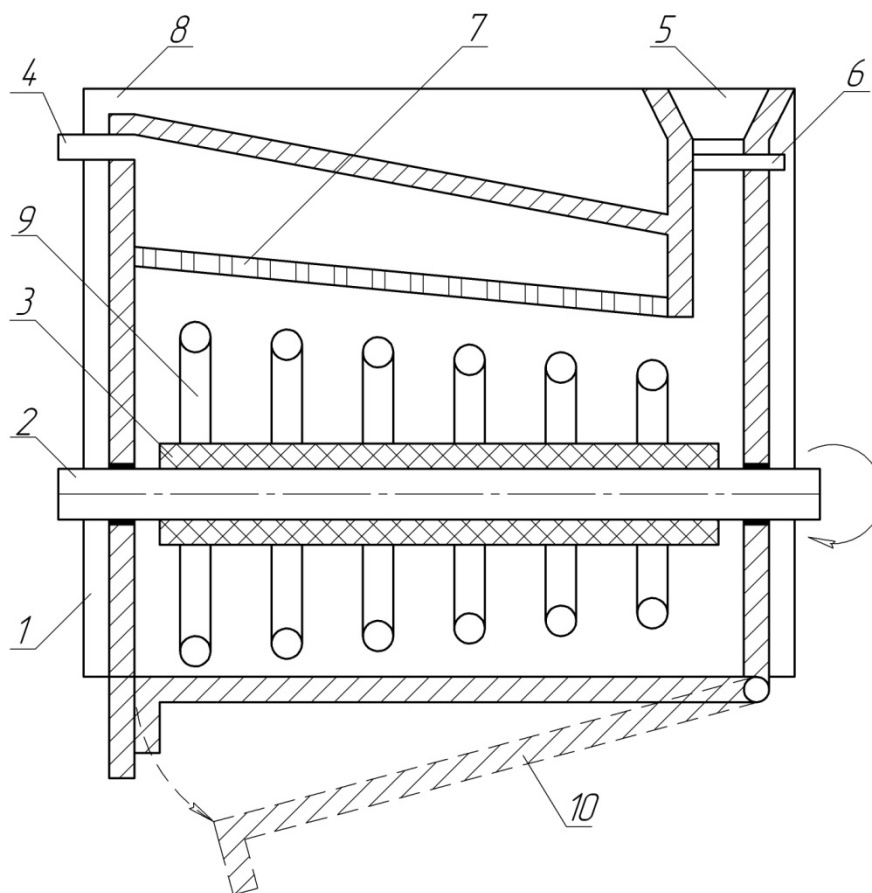


Рисунок 3.20 – Біогазовий реактор з лопатевим перемішувачем

Біогазовий реактор [79] працює за таким принципом. Біомаса завантажується через бункер завантаження біомаси 5 та рухається всередину конструкції крізь шиберну засувку 6 у резервуар 1. На підігрівачі біомаси 3 суміш нагрівається та за допомогою лопатевих перемішувачів 9 змішується та рівномірно прогрівається. З резервуара 1 утворений біогаз, рухаючись через захисну газорозподільну решітку 7, виходить крізь штуцер відведення біогазу до труби споживача 4. Дно 10 опускається вниз і біодобриво видаляється.

Шнековий перемішувач надає біогазовому реактору більшої продуктивності за рахунок рівномірності прогріву (рис. 3.21). Пристрій містить резервуар 1, який зверху накритий каркасом теплиці 8. Всередині резервуара 1 розміщений шнековий перемішувач 9, що служить для перемішування біомаси. Всередині валу 2 шнекового перемішувача 9

закріпленій підігрівач 3. Над шнековим перемішувачем 9 змонтована захисна газорозподільна решітка 7, над якою влаштований штуцер відведення біогазу до труби споживача 4. Під шнековим перемішувачем 9 розміщене дно 10, яке шарнірно прикріплене до корпусу 1 з можливістю опускання вниз. Наверху конструкції міститься бункер завантаження 5 з шиберною засувкою 6.

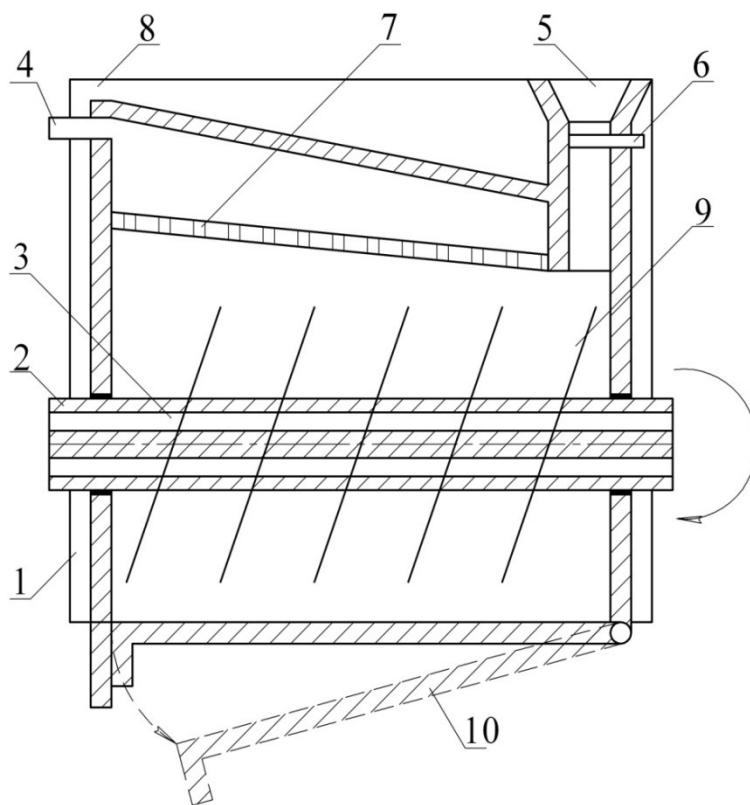


Рисунок 3.21 – Біогазовий реактор із шнековим перемішувачем

Біореактор працює таким чином. Біомаса завантажується через бункер завантаження 5 та рухається всередину конструкції крізь шиберну засувку 6 у резервуар 1. Завдяки підігрівачу 3 біомаси суміш нагрівається та за допомогою шнекового перемішувача 9 змішується й рівномірно прогрівається. З резервуара 1 утворений біогаз, рухаючись через захисну та газорозподільну решітку 7, виходить крізь штуцер відведення біогазу до труби споживача 4. Дно 10 опускається вниз і біодобриво видаляється.

Біогазова установка з вертикальною пропелерною мішалкою з покращеним процесом перемішування суміші збільшує виробництво біогазу з одиниці ваги біомаси (рис. 3.22).

Біореактор містить резервуар 1, який зверху накритий каркасом теплиці 8. Всередині резервуара 1 на валу 2 розміщена вертикальна

пропелерна мішалка 9, що служить для перемішування біомаси. Всередині валу 2 встановлений підігрівач біомаси 3. Над вертикальною пропелерною мішалкою 9 змонтована захисна газорозподільна решітка 7, над якою влаштований штуцер відведення біогазу до труби споживача 4.

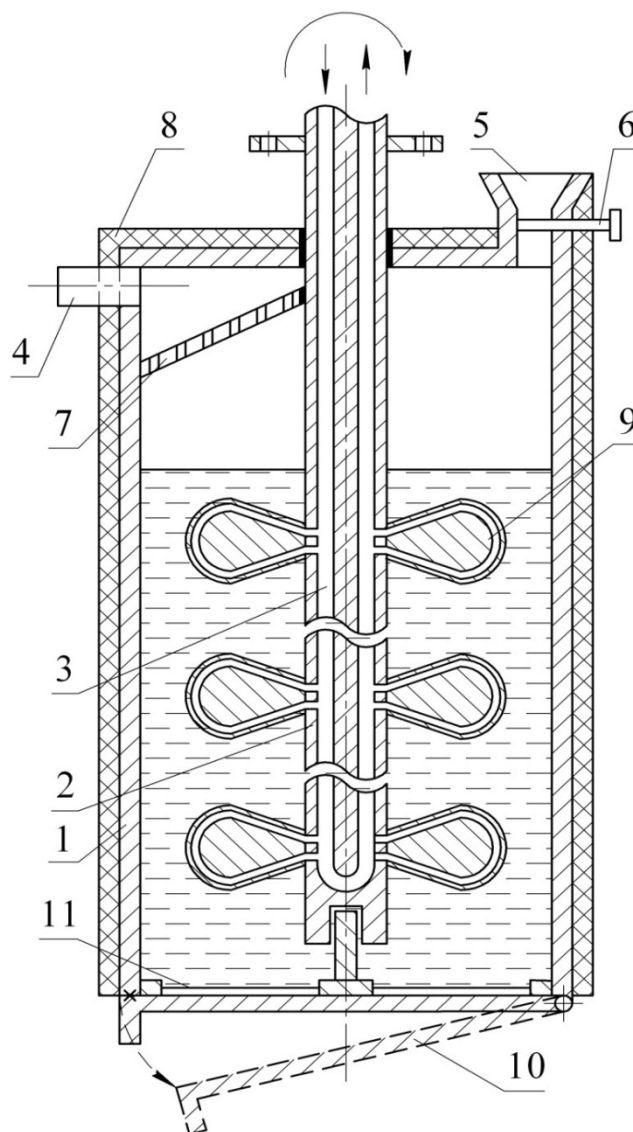


Рисунок 3.22 – Біогазовий реактор з вертикальною пропелерною мішалкою

Під вертикальною пропелерною мішалкою 9 розміщений опорний елемент з отворами для проходження відпрацьованої маси 11 та дно 10, яке шарнірно прикріплене до корпусу 1 з можливістю опускання вниз. Наверху конструкції міститься бункер завантаження 5 з шиберною засувкою 6.

Інтенсифікація процесу анаеробного бродіння в біогазовій установці є досить ефективною з використанням різноманітних перемішувальних пристроїв. Введення в конструкцію біогазової установки перемішувача приводить до зростання її ефективності. В запропонованих біогазових реакторах перемішувальні пристрої інтенсифікують процес біоконверсії.

Механічне перемішування субстрату в біогазовій установці є простим та ефективним способом інтенсифікації бродіння з метою оптимізації процесу утворення біогазу. В біогазовій установці (рис. 3.19) завдяки підігріванню субстрату вивільнення біогазу пришвидшується, а наявності вертикального пропелерного перемішувача теплота рівномірно розподіляється по всій масі субстрату в біогазовій установці. До того ж перемішування перешкоджає утворенню плаваючої кірки на поверхні субстрату та запобігає утворенню осаду на дні біогазової установки. Оскільки субстрат є органічною сировиною важливо визначити оптимальні параметри його перемішування для забезпечення ефективності роботи біогазової установки. Параметри процесу перемішування (швидкість обертання пропелерного перемішувача та руху субстрату), а також їх взаємозв'язок з часом перемішування залежать від фізичних властивостей завантаженого субстрату. Встановлення оптимальних параметрів перемішування субстрату в біогазовій установці для забезпечення інтенсивного утворення біогазу можливо за результатами математичного моделювання процесу перемішування.

Математичне дослідження процесу перемішування субстрату в біогазовій установці дозволяє визначити залежності параметрів процесу бродіння, зокрема швидкості обертання субстрату, від інтенсивності перемішування. Залежно від кутової швидкості обертання субстрату в біогазовій установці, змінюється швидкість перемішування пропелерним лопатевим перемішувачем, а це в свою чергу впливає на термостабілізацію процесу бродіння та інтенсифікацію теплообмінних процесів в біогазовій установці. Обертаний рух пропелерного перемішувального пристрою забезпечується електродвигуном, що створює момент, який долає силу опору субстрату в біогазовій установці. Таким чином, визначивши залежності параметрів процесу бродіння органічної маси, можливо досягти ефективної роботи біогазової установки. Кінематичну схему руху вертикального перемішувального пристрою наведено на рис. 3.23.

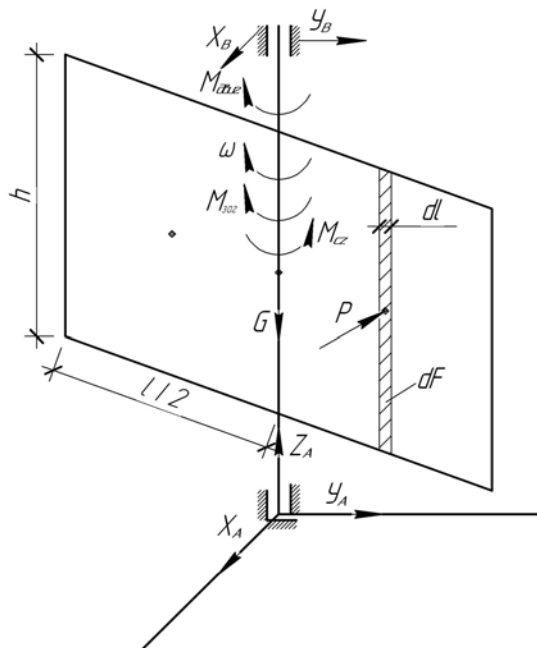


Рисунок 3.23 – Кінематична схема процесу перемішування субстрату в біогазовій установці

Загальний обертовий момент, що виникає під час процесу перемішування субстрату в біогазовій установці визначається співвідношенням

$$M_{заг} = M_{двиг} - M_{cz}, \quad (3.21)$$

де M_{cz} – момент опору обертання лопаті вертикального пропелерного перемішувального пристрою в біогазовій установці;

$M_{двиг}$ – обертовий момент двигуна, який приводить в дію перемішувальний пристрій.

Загальний момент обертання лопаті пропелерного перемішувального пристрою визначимо з диференційного рівняння обертання тіла навколо нерухомої осі

$$M_{заг} = J_{cz} \cdot \ddot{\varphi}, \quad (3.22)$$

де J_{cz} – момент інерції обертання лопаті перемішувального пристрою;

$\ddot{\varphi}$ – друга похідна кута обертання перемішувача в біогазовій установці.

Для визначення сил, що діють на систему під час процесу перемішування субстрату (рис. 3.23), виокремимо елементарну ділянку довжиною dl . Момент інерції обертання елементарної ділянки вертикального пропелерного перемішувача має вигляд

$$\Delta J_{cz} = \frac{m_i \cdot dl_i^2}{12}, \quad (3.23)$$

де ΔJ_{cz} – момент інерції обертання елементарних ділянок, з яких складається лопать перемішувача субстрату;

m_i – маса елементарної ділянки;

dl_i – елементарна довжина перемішувача.

Враховуючи, що маса субстрату m дорівнює відношенню ваги субстрату G та прискоренню вільного падіння g , після інтегрування рівняння (3.18) по довжині перемішувача l , визначимо, що рівняння (3.23) матиме вигляд:

$$J_{cz} = \frac{G \cdot l^2}{12g}. \quad (3.24)$$

Елементарна сила опору субстрату лопаті пропелерного перемішувача, яка виникає під час процесу перемішування в біогазовій установці, визначається за формулою

$$dP = \frac{1}{2} C_{\text{тиск}} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot dF, \quad (3.25)$$

де $C_{\text{тиск}}$ – коефіцієнт тиску субстрату на лопаті пропелерного перемішувального пристрою;

ρ – густина субстрату, який завантажують в біогазову установку для подальшого бродіння;

V – швидкість перемішування органічної маси в біогазовій установці;

dF – елементарна площа лопаті вертикального пропелерного перемішувача.

Швидкість перемішування субстрату в біогазовій установці є добутком кутової швидкості обертання ω та довжини l . Площа перемішувача визначається його висотою h і елементарною довжиною dl . Враховуючи наведені залежності, рівняння (3.25) має такий вигляд:

$$dP = \frac{1}{2} C_{\text{тиск}} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot l^2 \cdot h \cdot dl. \quad (3.26)$$

Для спрощення подальших розрахунків прийнято $\frac{1}{2} \tilde{N}_{\text{двиг}} \cdot \rho = \alpha$. Тоді

$$dP = \alpha \cdot \omega^2 \cdot l^2 \cdot h \cdot dl. \quad (3.27)$$

Момент опору обертання лопаті в біогазовій установці подано у вигляді

$$dM_{cz} = -l \cdot dP. \quad (3.28)$$

Підставивши рівняння (3.27) в (3.28), отримаємо

$$dM_{cz} = -\alpha \cdot h \cdot \omega^2 \cdot l^3 \cdot dl. \quad (3.29)$$

Проінтегрувавши рівняння (3.29), одержимо вираз для визначення моменту опору. Інтегрування виконано в межах $0 - 0,5l$, оскільки центр ваги лопаті вертикального перемішувального пристрою припадає на половину його довжини l .

$$M_{cz} = -2 \cdot \int_0^{0,5l} \alpha \cdot h \cdot \omega^2 \cdot l^3 \cdot dl = -\frac{1}{32} \alpha \cdot h \cdot \omega^2 \cdot l^4 . \quad (3.30)$$

Після підстановки рівнянь (3.22) і (3.30) у формулу (3.31) вона набуває такого вигляду

$$\frac{G \cdot l^2}{12g} \cdot \ddot{\varphi} = -\frac{1}{32} \alpha \cdot h \cdot \omega^2 \cdot l^4 + M_{\text{двиг}} . \quad (3.31)$$

Прискорення обертання перемішувача в біогазовій установці виражено залежністю

$$\ddot{\varphi} = \frac{d\omega}{dt} , \quad (3.32)$$

де t – час перемішування субстрату лопатями перемішувача.

При підстановці залежності (3.31) в рівняння (3.32) та після перетворень отримаємо таке рівняння

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{3}{8} \cdot \frac{\alpha \cdot h \cdot g \cdot l^2}{G} \omega^2 + M_{\text{двиг}} \quad (3.33)$$

або

$$\frac{d\omega}{dt} = M_{\text{двиг}} - \frac{3}{8} \cdot \frac{\alpha \cdot h \cdot g \cdot l^2}{G} \omega^2 . \quad (3.34)$$

При малих швидкостях руху субстрату, які спостерігаються в біогазовому реакторі, коефіцієнт тиску $C_{\text{тиск}}$ визначимо за формулою Кармана:

$$C_{\text{тиск}} = 0,072 \cdot \text{Re}^{-0,2} . \quad (3.35)$$

Тоді, враховуючи, що число Рейнольдса $\text{Re} = \frac{V \cdot l}{\nu}$ і $V = l \cdot \omega$, де ν – кінематична в'язкість субстрату, отримаємо диференційне рівняння у вигляді

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = M_{\text{двиг}} - A \cdot \omega^{1,8} , \quad (3.36)$$

де

$$A = 0,0135 \cdot \frac{\rho \cdot h \cdot l^{2,8}}{m \cdot \nu^{-0,2}} . \quad (3.37)$$

Аналіз рівняння (3.36) свідчить, що час, витрачений на повне й рівномірне перемішування субстрату в біогазовій установці, залежить від фізичних властивостей субстрату, геометричних розмірів перемішувача і маси субстрату, а також обертового моменту двигуна, який приводить в дію перемішувальний пристрій. Варіюючи цими чинниками, як вихідними рішеннями рівняння (3.37), можна визначити оптимальні значення часу перемішування субстрату з метою отримання максимальної продуктивності біогазової установки.

З використанням отриманої математичної моделі перемішування субстрату в біогазовій установці вертикальним пропелерним перемішувачем виконаємо чисельне моделювання роботи перемішувача за таких початкових умов: $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$; $\nu = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $l = 1 \text{ м}$; $h = 0,8 \text{ м}$; $m = 15 \text{ кг}$; $M = 4 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\varphi_0 = 0$; $\omega_0 = 0$. Оптимальним режимом перемішування субстрату в біогазовій установці для отримання ефективності виходу біогазу є частота обертання перемішувального пристрою 5 об/хв, тому інтервал дослідження обрано 0...12 секунд. Моделювання виконано в математичному пакеті Matlab 6.1 чисельним багатокроковим методом Адамса–Башворта–Мултона змінного порядку, із записом підпрограми «**biogaz**» у відповідний М-файл. Результати моделювання для заданих початкових умов наведено на рис. 3.24.

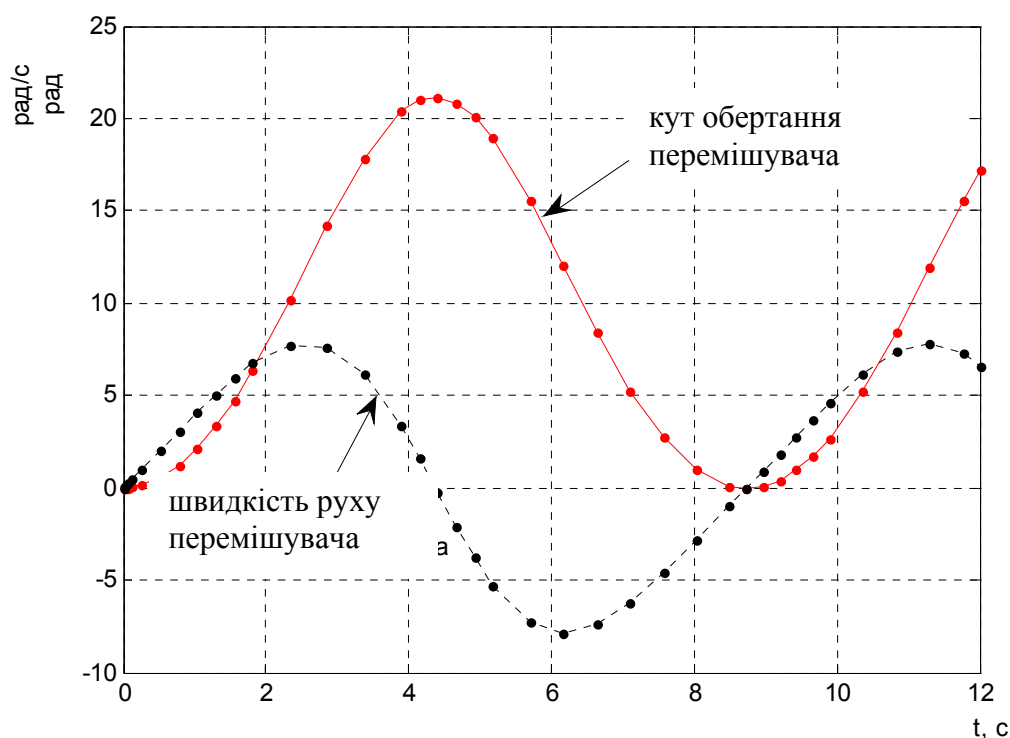


Рисунок 3.24 – Результати чисельного моделювання роботи перемішувального пристрою в біогазовій установці

Аналіз рис. 3.24 свідчить, що лопать вертикального пропелерного перемішувального пристрою, обертаючись навколо осі, надає середовищу всередині біогазової установки необхідної швидкості обертання. При чому, оскільки субстрат є неоднорідним та органічним середовищем, лопать перемішувача при своєму русі викликає збурення середовища органічної

маси, що є причиною десинхронізації синусоїд графіків кута обертання та швидкості перемішувача.

Контрольні питання

1. Що таке термостабілізація роботи БГУ?
2. При яких температурних режимах протікає процес анаеробного бродіння?
3. Як залежать тепловтрати БГУ від температурних режимів бродіння?
4. Для чого потрібна інтенсифікація теплообміну між нагрівником і субстратом?
5. Які способи інтенсифікації теплообміну ви знаєте?
6. Наведіть властивості барботажної інтенсифікації.
7. Наведіть властивості вібраційної інтенсифікації.
8. Поясніть принцип роботи секційного біореактора.
9. Виконайте порівняльну характеристику способів інтенсифікації теплообміну.
10. Як впливає в'язкість субстрату на теплообмін при вільній конвекції?
11. Як впливає вологість субстрату на теплообмін при вільній конвекції?
12. Яка зона впливу струменів газу при локальному газорідинному омиванні теплообмінної поверхні?
13. Які ви знаєте перемішувальні пристрої для біогазових реакторів?
14. Чому інтенсифікація теплообміну в біореакторі здійснюється локальним барботажем, а не суцільним?
15. Де спостерігається більший коефіцієнт тепловіддачі при вібрації і локальному барботажі: в субстратах чи у воді?

4 ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ БІОКОНВЕРСІЇ

4.1 Контроль та управління процесами анаеробного бродіння

Для процесів анаеробного бродіння виділяють три температурних режими, дотримання в межах яких є необхідною умовою безперебійного вироблення біогазу і життєдіяльності метаноутворювальних бактерій. Також до обмежувальних умов належить максимальна температура нагрівального елемента, яка не може перевищувати 60°C. Нагрівання субстрату відбувається за рахунок передачі тепла води, що протікає через нагрівальний елемент. Вода гріється в котлі за рахунок спалювання виробленого біогазу. При обертанні пластини активатора відбувається активне перемішування субстрату, вирівнювання полів температур, інтенсифікація теплообміну між нагрівником і субстратом. Для зменшення енерговитрат і збільшення виходу біогазу необхідно контролювати і регулювати такі величини: температуру поверхні нагрівального елемента; температуру субстрату в трьох шарах – верхньому, середньому і нижньому; швидкість вібрування пластини-активатора чи обертання мішалки. Для контролю і управління параметрами анаеробного бродіння в біореакторі пропонується така схема управління (рис. 4.1) [37 - 39]. Управління за даною схемою можливе в реакторі з інтенсифікацією теплообміну, запропонованому авторами (див. рис. 2.3). Температура субстрату відслідковується сенсорами t_2 , t_3 , t_4 , температура поверхні нагрівника – сенсором t_1 . За даними сенсора t_1 сервопривод триходового клапана на подачі теплоносія на нагрівник регулює ступінь підмішування зворотного теплоносія.

За показами всіх температурних сенсорів згідно із закладеною програмою в ЕОМ відбувається управління двигуном – збурювачем перемішувань субстрату за допомогою частотного регулятора. Кількість обертів двигуна відслідковується тахометром. Для передачі інформації в ЕОМ від датчиків і тахометра слугують пристрої спряження ПС1...ПС3. Для передачі сигналів керування від ЕОМ до сервопривода і частотного регулятора слугують пристрої спряження ПС4...ПС5.

Для інтенсифікації теплообміну вибрано спосіб вібрації середовища, що в окремих випадках дозволяє збільшити тепловіддачу у десятки разів. Вібрація чи перемішування середовища або нагрівального елемента приводить до активного перемішування середовища, вирівнювання температури в об'ємі, інтенсифікації теплообміну. Це в кінцевому випадку

приводить до зменшення площ теплообміну, покращення протікання технологічних процесів та енергозбереження.

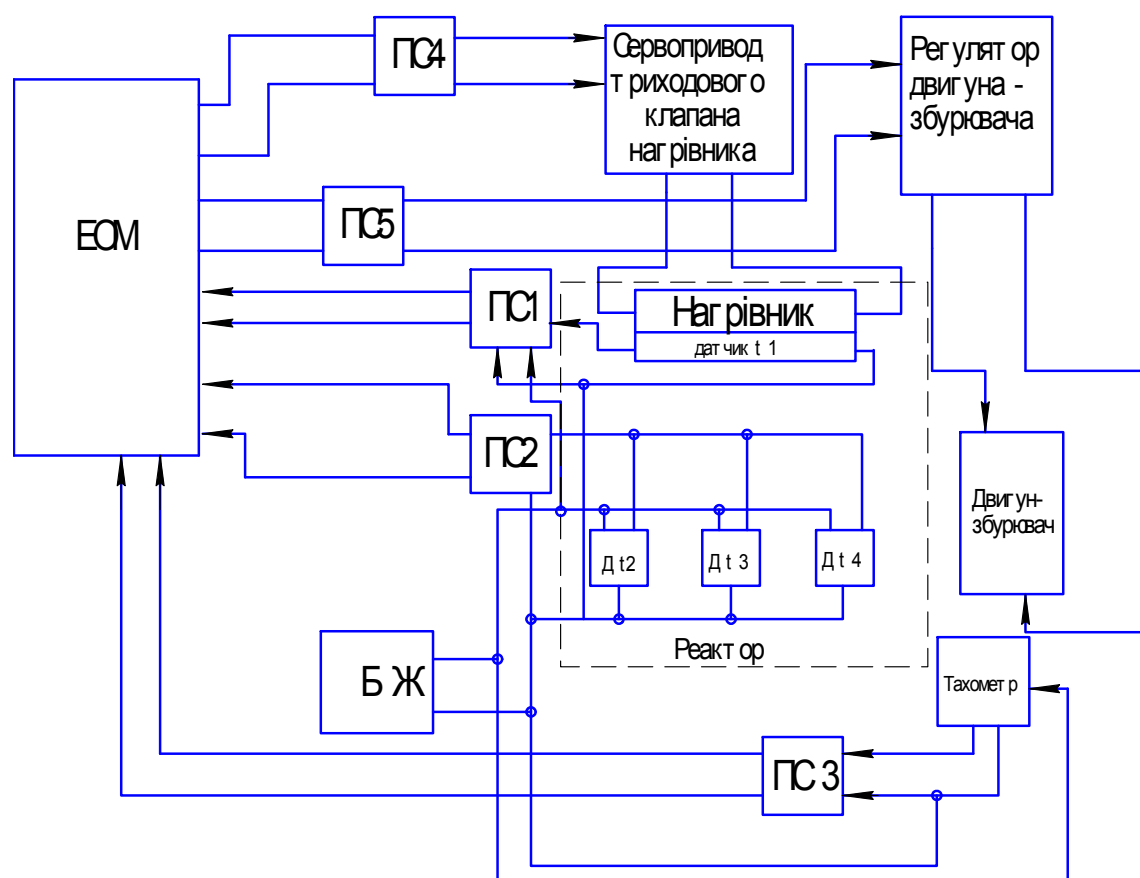


Рисунок 4.1 – **Схема автоматичного управління параметрами реактора для анаеробного бродіння:** ЕОМ – контролер (мікрокомп'ютер), БЖ – блок живлення, t_1 , t_2 , t_3 , t_4 – сенсори температури, ПС1...ПС5 – пристрої спряження.

За показами всіх температурних сенсорів згідно з закладеною програмою в стаціонарному комп'ютері відбувається управління двигуном – збурювачем перемішувань субстрату за допомогою частотного регулятора. Кількість обертів двигуна відслідковується тахометром. Для передачі інформації в ЕОМ від датчиків і тахометра слугують пристрої спряження ПС1...ПС3. Для передачі сигналів керування від ЕОМ до сервопривода і частотного регулятора слугують пристрої спряження ПС4-ПС5.

Від мікрокомп'ютера (контролера) оброблена інформація направляється на стаціонарний комп'ютер, в якому за допомогою спеціально розробленої програми вона подається у графічному вигляді і записується у текстовий файл. Принципову схему інформаційних зв'язків експериментальної установки наведено на рис. 4.1.

Алгоритм програми автоматичного моніторингу роботи БГУ реалізований на мові програмування Object Pascal з використанням IDE Delphi 7. Робочі вікна програми обробки та збору даних від експериментальної установки наведено на рис. 4.2.

В головному вікні 1 (рис. 4.2) будуються графіки залежності температур і кількості обертів вала двигуна від часу дослідження. На інформаційній панелі 2 у відповідних комірках динамічно фіксуються дані параметрів у вигляді числових значень.

Кнопки 3 – “R” ,“P”, “S” відповідно: початок зчитування даних, пауза і стоп – зупинення роботи. У вікнах 4 і 5 відбувається налагодження роботи програми і роботи СОМ порта:

- інтервал таймера (1–20 сек, з інтервалом 0,1 сек);
- режим роботи програми (безперервно, дискретно);
- мінімальні значення відображення для всіх параметрів;
- максимальні значення відображення для всіх параметрів.

Параметри настроювання СОМ порту:

- номер порту;
- швидкість передачі/прийому даних;
- кількість біт інформації;
- тип контролю достовірності інформації;
- кількість стоп-біт.

Загальний вигляд експериментального контролера наведено на рис. 4.3.

Структурно-логічні схеми програми обробки та збору даних від експериментальної установки зображено на рис. 4.4.

Всі пристрої спряження конструктивно виконано у вигляді мікрокомп'ютера. Мікрокомп'ютер виконано на базі однокристалічного мікроконтролера PIC 16F876.

Програма дозволяє записувати дані з інтервалом в 1 секунду у текстовий файл, який потім можна прочитати у табличному редакторі. Запис даних ведеться у форматі: дата, час, кількість обертів валу двигуна, температура першого датчика, температура другого датчика, температура третього датчика, усереднена температура датчиків, що розміщені в нагрівальному елементі.

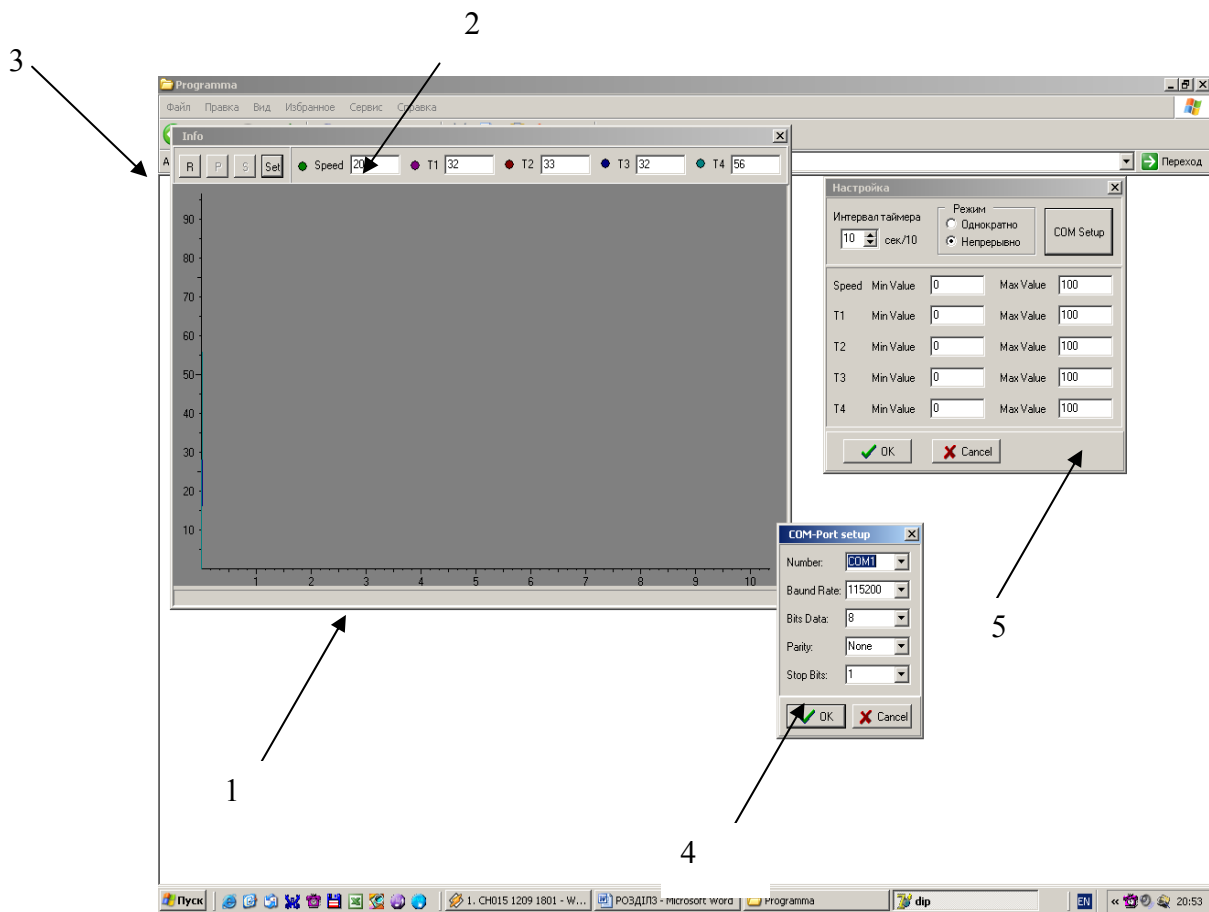


Рисунок 4.2 – Робочі вікна програми оброблення та збору даних від експериментальної установки

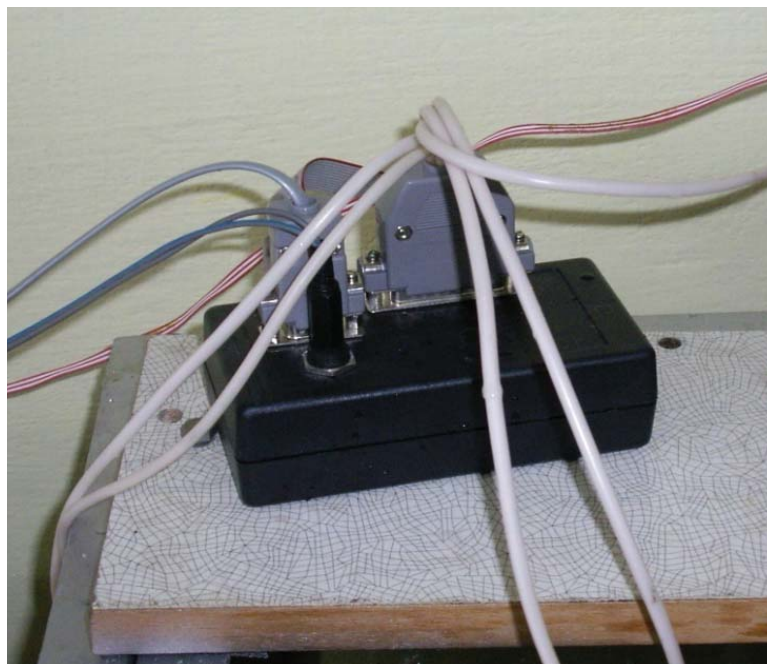


Рисунок 4.3 – Загальний вигляд експериментального контролера

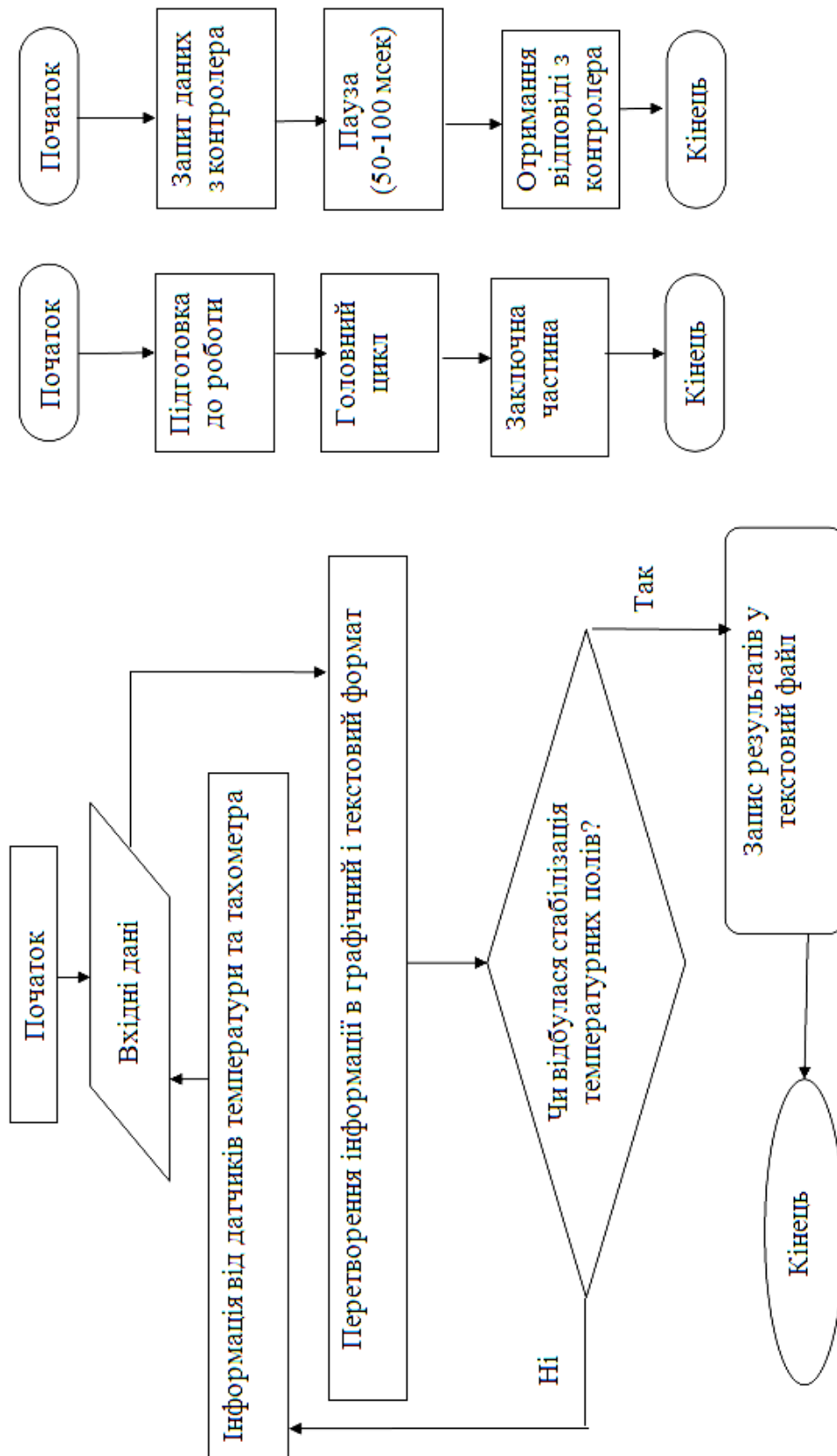


Рисунок 4.4 – Структурно-логічні схеми програми обробки та збору даних від БГУ

Загальний вигляд файла звіту проведеного експерименту зображено на рис. 4.5

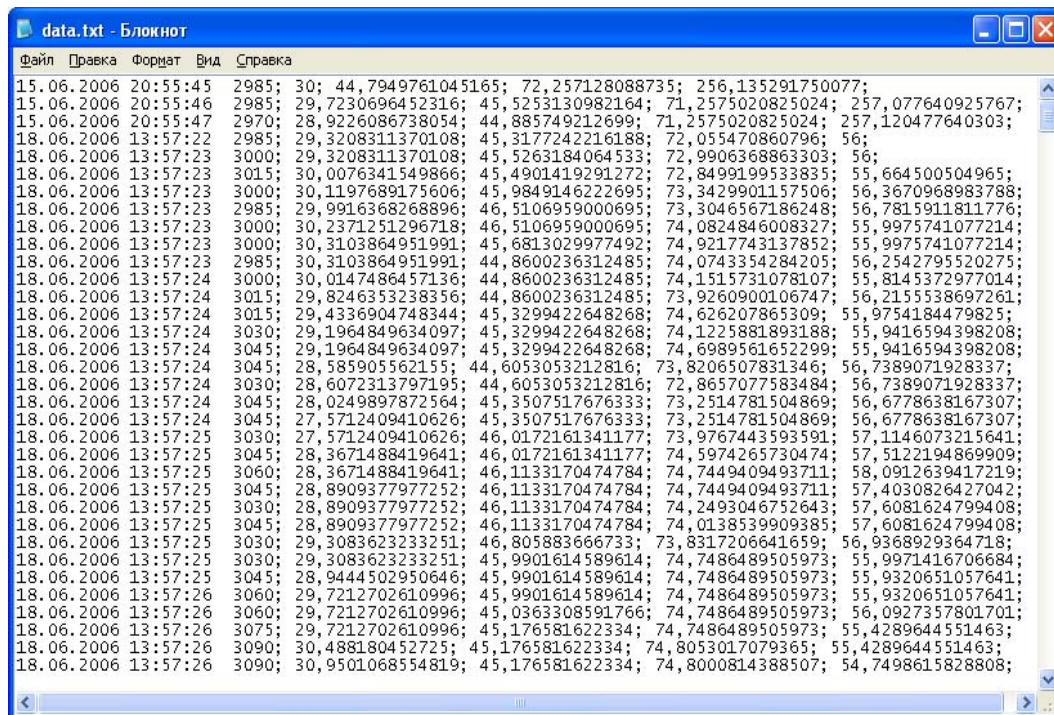


Рисунок 4.5 – Загальний вигляд файла звіту роботи системи термостабілізації та інтенсифікації БГУ

Згідно з [27] рівняння, що узагальнює відносний коефіцієнт тепловіддачі через розмірні величини, апроксимується виразом

$$K = \frac{\alpha}{\alpha_0} = 2,67(d)^{0,25} \cdot (\Delta T)^{1/12} \cdot (\Delta A \cdot f)^{2/3}, \quad (4.1)$$

де K – коефіцієнт інтенсифікації, що є відношенням коефіцієнта тепловіддачі віброконвекції до коефіцієнта тепловіддачі при вільній конвекції;

d – діаметр циліндра теплонагрівального елемента, мм;

ΔT – різниця між температурою стінки нагрівника і середовищем С;

ΔA – амплітуда коливань нагрівального елемента, мм;

f – частота коливань нагрівального елемента, Гц.

В промисловості система автоматизованого контролю за роботою БГУ виготовляється в вигляді шафи з набором елементів для роботи установки: контролера, частотних перетворювачів, автоматичних вимикачів тощо (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – Шафа з пристроями автоматичного керування БГУ

4.2 Підготовка біогазу для використання в теплотехнічному обладнанні

Вироблення та використання біогазу не тільки як палива, а й у вигляді основних чистих компонентів (метану й діоксиду вуглецю) значно підвищує економічну цінність цього нетрадиційного джерела енергії й сировини, поліпшує екологічну ситуацію та дозволяє отримати цінні органічні добрива.

Метан може використовуватися як паливо, а діоксид вуглецю – як інертний газ для зварювальних робіт, для заправлення вогнегасників, у харчовій промисловості, як «добриво» у тепличних господарствах тощо.

Діоксид вуглецю (CO_2) та сірководень (H_2S) – це найпоширеніші шкідливі домішки в біогазі. Кількість H_2S варіюється від відсотків до десятих часток відсотка залежно від джерела: метантенк очисної установки каналізаційних стоків, смітник побутових відходів, біореактор для анаеробної переробки тваринницьких відходів й ін. Діючі в Україні технічні

умови [43] на біогаз метантенків та, відповідно, біогазових реакторів з утилізації органічних відходів вимагають зниження вмісту H_2S до $0,2 \text{ г/м}^3$.

Біогаз містить баластові і шкідливі домішки, здатні викликати корозію і забруднення апаратури. Для видалення цих домішок газ піддається очищенню. При виробленні біогазу його очищають від сірчистих сполук, діоксиду й оксиду вуглецю. Залежно від необхідного ступеня очищення умовно розрізняють грубе, середнє і тонке очищення. Часто для досягнення необхідного, особливо високого, ступеня очищення застосовують кілька послідовних стадій очищення. При цьому в кожній стадії створюються найефективніші та найекономічніші умови роботи [44, 45, 46, 67, 69, 81].

Основні властивості забруднювачів біогазу такі:

Діоксид вуглецю (вуглекислий газ, діоксид вуглецю, вуглекислота) – це кислотний оксид, що здатен обмежено розчинятися у воді і добре взаємодіє з лугами, розчинами солей, що мають лужні властивості, карбонатами натрію і калію, органічними сполуками, що містять гідроксильні групи (етаноли), і при зниженій температурі і підвищеному тиску вони добре розчиняються в спиртах (метанолі, ацетоні й інших органічних розчинниках). Діоксид вуглецю міститься в природному і коксовому газах, у біогазі. В останньому вміст CO_2 найбільший і складає залежно від вихідної сировини і методу біоконверсії 20 – 40 % об'ємних частин [67].

Сірководень – безбарвний газ з характерним запахом білка, який гниє. Він трохи важчий за повітря, зріджується при $-60,8 \text{ }^\circ\text{C}$, твердне при мінус $85,7^\circ\text{C}$. На повітрі сірководень горить з утворенням діоксиду сірки і води [67].

Для грубого очищення біогазу від домішок застосовуються такі способи:

- водяне очищення під тиском;
- етаноламінове очищення;
- очищення гарячим розчином поташу.

Для тонкого очищення газу застосовуються такі способи:

- лужне очищення газу від CO_2 ;
- очищення газу від CO_2 методом низькотемпературної абсорбції метанолом;
- біокаталітична безреагентна технологія очищення від H_2S природного газу і біогазу.

Вибір способу очищення залежить від необхідної чистоти біогазу та подальшого його використання. Грубе очищення дозволяє використовувати біогаз у пальниках плит та водогрійних котлів, тонке очищення потрібно для використання біогазу як палива у транспорті, при транспортуванні його на великі відстані та спалюванні у котлах, призначених для роботи на природному газі. Вибір способу очищення залежить також від фінансових можливостей господарства, що його виробляє, та потребує відповідного технологічного обладнання. Рекомендується вибір способу очищення біогазу від шкідливих домішок виконувати за допомогою алгоритму, що наведений на рис. 4.7. При виборі оптимального способу очищення біогазу від шкідливих домішок відповідно зі структурно-логічною схемою (рис. 4.7) необхідно враховувати технологічні особливості різних способів.

4.2.1 Водяне очищення

Водяне очищення під тиском від сірководню та діоксиду вуглецю ґрунтується на різній розчинності у воді діоксиду вуглецю. При невисоких парціальних тисках розчинність CO_2 у воді невелика, але зі збільшенням тиску вона зростає. При подальшому зниженні тиску розчинений діоксид вуглецю виділяється з розчину.

Водяне очищення газу від діоксиду вуглецю під тиском ефективно при високому вмісті CO_2 у газі. Цей спосіб відрізняється простотою і дозволяє багаторазово використовувати оборотну воду. Співвідношення між концентрацією газу, розчиненого в рідині, і його рівноважним парціальним тиском p над поверхнею рідини описується законом Генрі [67]:

$$C = p \cdot k, \quad (4.2)$$

де C – вагова концентрація газу в насиченому розчині;

p – парціальний тиск;

k – коефіцієнт пропорційності, що називається константою Генрі.

Розчинність вуглекислого газу становить 87,7 мл в 100 мл води при атмосферному тиску і температурі води 20 °С. Збільшення коефіцієнта Генрі (константи фазової рівноваги) при зміні температури свідчить про зменшення розчинності діоксиду вуглецю в цих умовах.

У практичних розрахунках розчинність діоксиду вуглецю зручніше виражати в об'ємах газу (приведеного до нормальних фізичних умов), які поглинає один об'єм води.

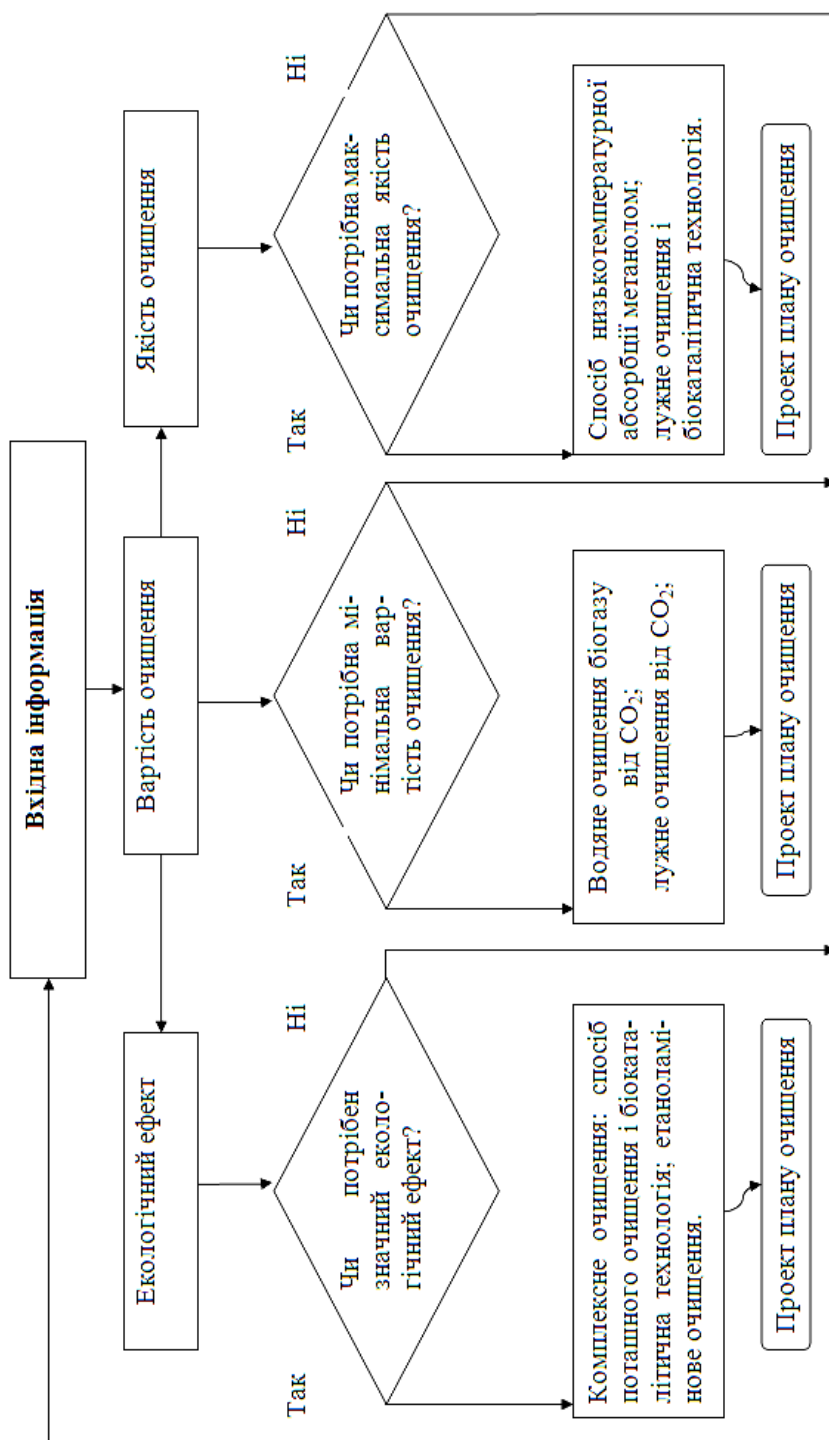


Рисунок 4.7 – Структурно-логічна схема вибору способу очищення

У технічній оборотній воді, що використовується для водневого очищення від CO_2 , містяться розчинені солі, що знижують розчинність CO_2 у технічній воді порівняно з чистою.

Для очищення біогазу від домішок можна використовувати газопромивач, принципово-технологічну схему якого наведено на рис. 4.8.

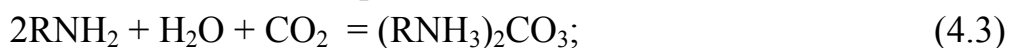
Суттєве значення для економічності процесу водяного очищення має витрата води на очищення і витрата енергії на подачу цієї води. Витрата води на очищення біогазу від діоксиду вуглецю залежить від ступеня очищення від CO_2 , температури, загального і парціального тиску CO_2 у газовій суміші до очищення. Якщо біогаз у процесі конверсії одержують при атмосферному тиску, то перед водяним очищенням газ стискають. Вибір тиску для водяного очищення від CO_2 залежить від декількох факторів. Зі збільшенням тиску зростає розчинність вуглекислого газу у воді і зменшується кількість води необхідної для промивання майже обернено пропорційне тиску. При цьому знижується витрата енергії для подачі води. З іншого боку, робота на стискуванні діоксиду вуглецю від початкового низького тиску до тиску абсорбції зі збільшенням тиску зростає. Сумарна витрата енергії на водневе промивання газу в межах 1–3 МПа практично не залежить від тиску. Однак зі збільшенням тиску зменшуються розміри абсорбера і зростає ступінь очищення газу від CO_2 .

4.2.2 Очищення газів від вуглекислого газу та сірководню розчинами етаноламінів

Для очищення газів від вуглекислого газу та сірководню розчинами етаноламінів застосовують розчини етаноламінів (аміноспиртів), що мають лужні властивості і при взаємодії з кислотами утворюють солі [67]. Використовують водяні розчини етаноламіна $\text{CH}_2\text{OH}-\text{CH}_2-\text{NH}_2$, діетаноламіна $(\text{CH}_2\text{OH}-\text{CH}_2)_2\text{NH}$ і триетаноламіна $(\text{CH}_2\text{OH}-\text{CH}_2)_3\text{N}$. Найсильнішою основою серед етаноламінів є моноетаноламін, який широко застосовується в промисловості для очищення газів [67].

При абсорбції CO_2 розчинами етаноламінів утворюються карбонати і бікарбонати. Водночас може абсорбуватися сірководень з утворенням сульфідів і бісульфідів. Ці з'єднання при температурі вище 100°C дисоціюють з виділенням з розчинів CO_2 і H_2S .

Взаємодією етаноламіну RNH_2 (де R – група $\text{CH}_2\text{OH}-\text{CH}_2$) із діоксидом вуглецю подано такими реакціями:



При поглинанні діоксиду вуглецю водяним розчином етаноламіну виділяється 66 кДж/моль тепла, при абсорбції сірководню – 65 кДж/моль. При спільному поглинанні CO_2 і H_2S розчинність кожного компонента зменшується. Незважаючи на те, що поглинальна здатність розчину етаноламіна відносно H_2S у присутності CO_2 знижується, коефіцієнт

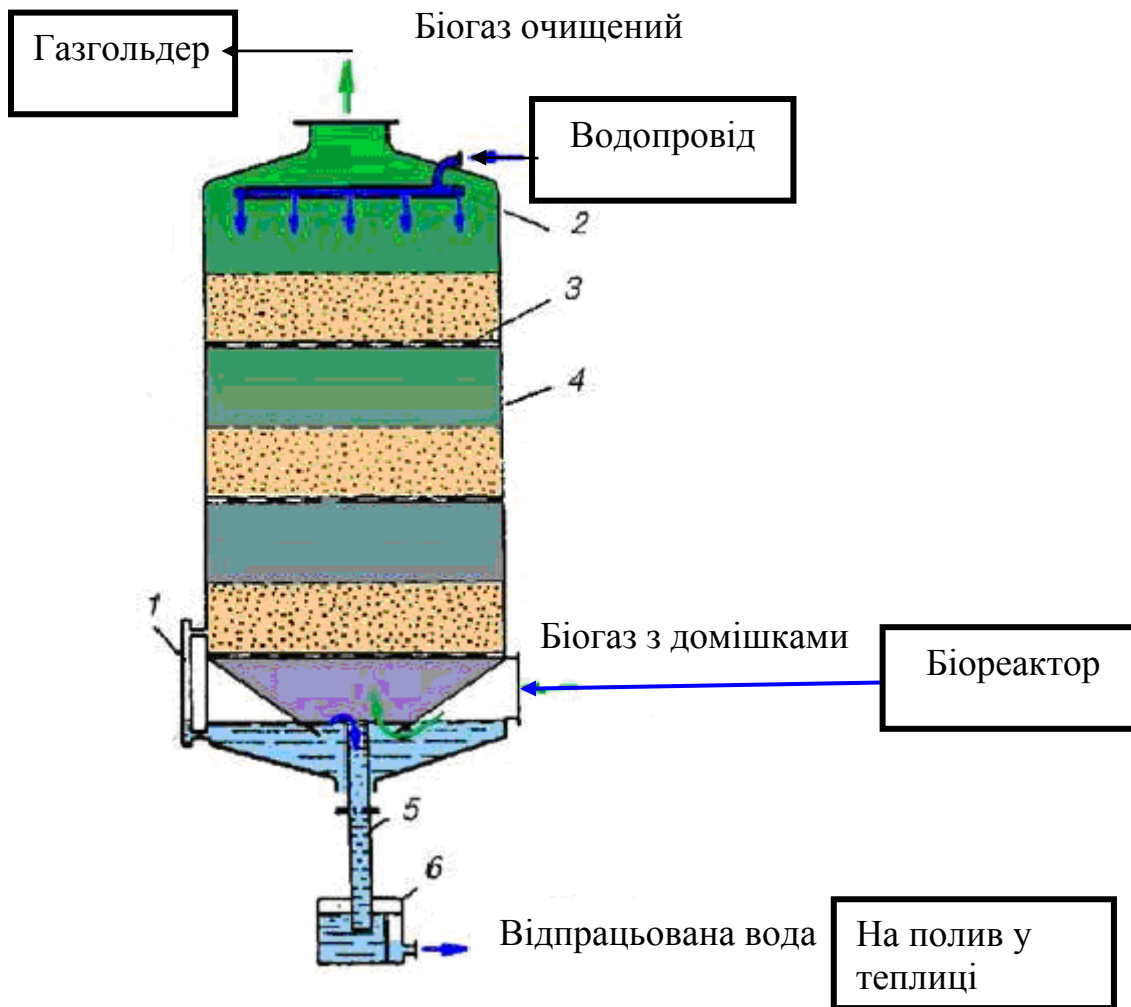


Рисунок 4.8 – Принципово-технологічна схема водяного очищення біогазу від домішок: 1 – водомірне скло; 2 – розподільвач; 3 – колосникові решітки; 4 – чавунні царги; 5 – переливна труба; 6 – збирач

абсорбції H_2S значно вищий, ніж CO_2 , і можлива вибіркова абсорбція сірководню з газу, що містить діоксид вуглецю.

Поглиналина здатність абсорбенту зростає зі зниженням температури і підвищенням тиску. При підвищенні температури і зниженні тиску рівновага хімічних реакцій, що протікають при абсорбції, зрушується вліво. На цьому заснована регенерація розчину моноетаноламінів, насиченого кислими газами при абсорбції. Насичений розчин нагрівають, при цьому відбувається розкладання хімічних сполук і десорбція кислих газів з розчину, супроводжувана також випаровуванням з розчину води.

У процесі етаноламінового очищення газу від CO_2 протікають побічні реакції, що викликають незворотні зміни складу розчину, що знижують його поглинальну здатність і призводять до втрат аміну. Розчини етаноламінів викликають корозійне руйнування устаткування у певних

умовах, особливо при високих ступенях насичення кислими газами. Подібно до розчинів аміаку, вони руйнівні діють на мідь, цинк і їхні сплави. Тому апарати і труби, що стикаються з розчинами амінів, не можна виготовляти з цих металів. У киплячих водяних розчинах етаноламіну маловуглецеві сталі також піддаються корозії під дією CO_2 . Присутність у розчинах моноетаноламінів сторонніх домішок збільшує швидкість корозії вуглецевої сталі. Тому необхідно застосовувати якомога більш чистий моноетаноламін і систематично піддавати очищенню поглинальний розчин шляхом його перегонки за наявності луку.

Також у промисловості на установках з очищення кислих газів як абсорбент, в основному, застосовується моноетаноламін (МЕА), а також діетаноламін (ДЕА). Аналіз світової практики показує, що спостерігається тенденція заміни МЕА на більш ефективний абсорбент – метилдіетаноламін (МДЕА).

Основні фізико-хімічні властивості МЕА і МДЕА наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Фізико-хімічні властивості МЕА і МДЕА

Показники	МЕА	МДЕА
Формула	$\text{HOOC}_2\text{H}_4\text{NH}_2$	$(\text{HOOC}_2\text{H}_4)_2\text{CH}_3\text{N}$
Молекулярна вага	61,1	119,2
Густина при температурі $T=20^\circ\text{C}$, г/см^3	1,015	1,018
Температура кипіння при тиску 101,333 кПа, $^\circ\text{C}$	170	247
Температура замерзання, $^\circ\text{C}$	10,5	- 21
Тиск пари при температурі $T=60^\circ\text{C}$, Па	660	24
Динамічна в'язкість при температурі $T=25^\circ\text{C}$, 10^3 , Па с	19	80
Питома теплоємність при температурі $T=30^\circ\text{C}$, кДж/(кг $^\circ\text{C}$)	2,72	2,32
Масова частка аміну в робочому розчині, %	10-20	30-50
Теплота реакції, кДж/кг:		
з H_2S	1511	1047
з CO_2	1919	1340

Переваги МДЕА (третинного аміну) порівняно з МЕА (первинний амін) полягають в меншій корозійній активності, що дозволяє застосовувати більш концентровані розчини МДЕА (30–50%) порівняно з МЕА (12–18%).

Економічність процесу очищення визначається, в основному, витратою тепла на регенерацію розчину етаноламіну. Зниження витрати тепла на регенерацію розчину в різних технологічних схемах МЕА очищення виконується різними шляхами.

4.2.3 Очищення біогазу від діоксиду вуглецю гарячим розчином поташу

Очищення біогазів від діоксиду вуглецю гарячим розчином поташу ґрунтується на поглинанні діоксиду вуглецю водяними розчинами карбонатів натрію і калію з утворенням бікарбонатів. У водяному розчині карбонат дисоціює на іони [67]



де Me – натрій чи калій.

Сумарний процес поглинання виражається як



Звичайно абсорбцію біогазу ведуть при низькій температурі, що пов'язано зі зменшенням розчинності газів у рідинах при підвищенні температури. В цьому випадку при поглинанні CO_2 розчинами карбонатів бікарбонати, що утворюються, менш розчинні у воді, ніж карбонати. Тому підвищення температури повинно сприяти збільшенню розчинності у воді солей – карбонатів і бікарбонатів. Розчинність солей калію вище розчинності солей натрію, тому для очищення застосовують водяний розчин карбонату калію (поташу) при підвищеній температурі. З підвищенням температури зростає концентрація солі в розчині, що дозволяє компенсувати негативний вплив температури на розчинність газу. Підвищення температури сприяє збільшенню швидкості гідратації, що сприяє зростанню швидкості усього процесу абсорбції CO_2 .

Розчинність CO_2 у гарячому розчині поташу значною мірою залежить від парціального тиску діоксиду вуглецю над розчином. Тому абсорбцію CO_2 гарячими розчинами поташу здійснюють при підвищеному тиску. Найменший парціальний тиск діоксиду вуглецю, при якому поташне очищення економічно доцільне, дорівнює 0,14 МПа. При зниженні тиску

рівновага реакції (4.6) зміщується вліво. На цьому заснована регенерація гарячого розчину поташу, насиченого CO₂.

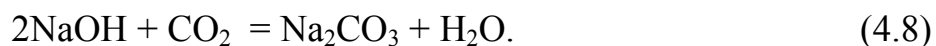
Таким чином, зазначені фізико-хімічні особливості процесу очищення дозволяють проводити абсорбцію і регенерацію майже при однаковій температурі. Абсорбція проходить при підвищеному тиску, а десорбція (регенерація) розчину – при зниженні тиску до атмосферного. Поглинальна здатність гарячих розчинів поташу у виробничих умовах коливається в межах 20–35 м³ CO₂/м³. Одноступінчасте очищення гарячим розчином поташу дозволяє досягти залишкового вмісту в очищеному газі 0,5–0,6% CO₂ (грубе очищення газу). Підвищення температури до 100°C в процесі абсорбції недостатнє для прискорення реакції і досягнення тонкого очищення газу. Тому для підвищення швидкості процесу абсорбції при більш низькій температурі застосовують різні активуючі добавки. З цією метою застосовуються з'єднання тривалентного миш'яку. Механізм каталітичної дії добавок вивчений неповністю. Припускають, що реакція протікає за такою схемою



При регенерації рівновага цих реакцій зміщується вліво. При вивченні поглинальної здатності миш'яково-поташних розчинів встановлено, що такі розчини при однаковій температурі здатні поглинути більшу кількість CO₂ при максимальному насиченні до моменту появи твердої фази KHCO₃, ніж відповідні для такої концентрації калію звичайні поташні розчини. Ця кількість CO₂ збільшується з підвищенням вмісту миш'яку. Найбільше зростання швидкості абсорбції CO₂ спостерігається при концентрації As₂O₃ до 30 г/л. У цих умовах швидкість абсорбції в 2,7 раза вища, ніж у неактивованих поташних розчинах. Гарячі розчини поташу викликають корозійне руйнування вуглецевої сталі. Тому в розчини додають інгібітори, а для виготовлення найвідповідальніших вузлів і деталей (насосів, клапанів і ін.) застосовують спеціальні нержавіючі сталі. Для виконання поташного очищення звичайно використовують абсорбери для поташного очищення біогазу. Принципово-технологічну схему для поташного очищення біогазу в абсорбері наведено на рис. 4.9.

4.2.4 Лужне очищення біогазу від вуглекислого газу

Лужне очищення біогазу від вуглекислого газу водяним розчином їдкого натрію NaOH засновано на необоротній реакції [44]



Парціальний тиск CO_2 над розчином їдкого натрію NaOH у процесі поглинання дорівнює нулю доти, доки весь луг не перейде в карбонат. Поглинання CO_2 розчином карбонату натрію протікає з утворенням бікарбонату



Диференціальна теплота розчинення CO_2 у розчинах їдких лугів незалежно від роду катіона складає 117 кДж/моль.

Швидкість абсорбції CO_2 лугом зростає з підвищенням температури. Збільшення концентрації карбонату в розчині сприяє зниженню швидкості абсорбції.

Регенерація відпрацьованого розчину лугу здійснюється вапном:

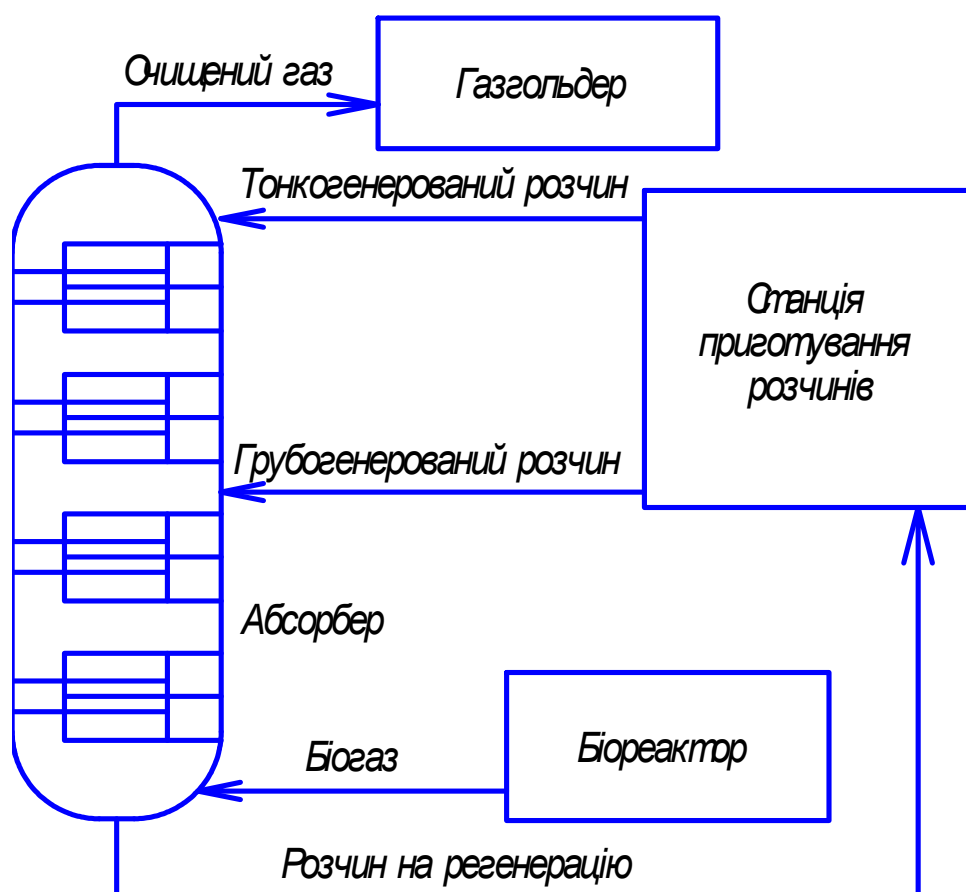


Рисунок 4.9 – Принципово-технологічна схема для поташного очищення біогазу в абсорбері

Процес проходить у рідкій фазі при 90–95 °С і при перемішуванні. Установка регенерації лугу вапном є громіздкою і процес недостатньо задовольняє сучасні санітарно-гігієнічні вимоги (здрібнювання і гасіння вапна, транспортування шламу у відвал і т. д.). Тому регенерацію відпрацьованого лугу передбачають тільки при значній витраті лугу і необхідності привезення його. В інших випадках водяні розчини відпрацьованого лугу намагаються використовувати для допоміжних процесів нейтралізації і скидають у спеціальні системи хімічно забруднених стоків. На очищення 1000 м³ газу витрачається 0,15–1,6 кг 92% -ої каустичної соди (залежно від концентрації CO₂ у вихідному газі). На регенерацію відпрацьованого розчину лугу витрачається 9 кг СаО і 30 кг пари при тиску 0,5 МПа.

4.2.5 Очищення біогазу від діоксиду вуглецю методом низькотемпературної абсорбції метанолом

Здійснюється в інтервалі температур від (-30) до (-60)°С і при тиску 1...3 МПа. Метанол є ефективним абсорбентом не тільки діоксиду вуглецю, але і сірководню та деяких інших домішок, що присутні у газовій суміші. Розчинність CO₂ у метанолі значно вища, ніж у воді, та зростає зі зниженням температури і збільшенням тиску. Так, при температурі (-60)°С розчинність діоксиду вуглецю в метанолі в 75 разів перевищує його розчинність у воді при температурі 25°С. Тому при промиванні газу метанолом в умовах низьких температур витрата абсорбенту на очищення одиниці об'єму газу значно менша, ніж при водяному очищенні від CO₂. Завдяки цьому відповідно зменшуються енергетичні витрати в процесі абсорбції. Витрати водню при низькотемпературній абсорбції також знижуються порівняно з їхніми втратами при водяному промиванні газу під тиском. Це пов'язано не тільки зі скороченням питомої витрати абсорбенту, але і зі зменшенням розчинності водню в метанолі при зниженні температури. Процес низькотемпературної абсорбції найдоцільніше проводити при тиску 1–3 МПа. Нижня межа тиску складає 0,5 МПа. Цей метод ефективний у випадку одночасного видалення з газової суміші декількох домішок при їх досить високому початковому вмісті. Незважаючи на необхідність застосування холодильної машини, енергетичні витрати в описаному процесі не перевищують витрат енергії при промиванні газу водою.

4.2.6 Безупинна біокаталітична технологія очищення від сірководню біогазу

Стандартні методики ґрунтуються на хімічних реакціях, що протікають у рідкій фазі, фізичній абсорбції і наступній хімічній конверсії. Вони мають декілька недоліків: велика витрата реагентів, корозія устаткування, застосування високої температури і тиску тощо. У результаті такі технології мають дуже високу ціну. Альтернативою для здешевлення такого роду технологій є застосування біокаталітичної безреагентної технології (рис. 4.10) [44]. У скрубєрі сірководень взаємодіє зі слабколужним розчином (рН 8.0...8.5), в якому відбувається абсорбція H_2S . Потім рідина зі скрубєра надходить у мікроаеробний реактор, що містить клітини бактерій, які у м'яких умовах окислюють сульфід до елементарної сірки з регенерацією слабколужної рідини для повернення в скрубєр. Елементарна сірка видаляється, і рідина повертається в скрубєр для абсорбції наступної порції H_2S .

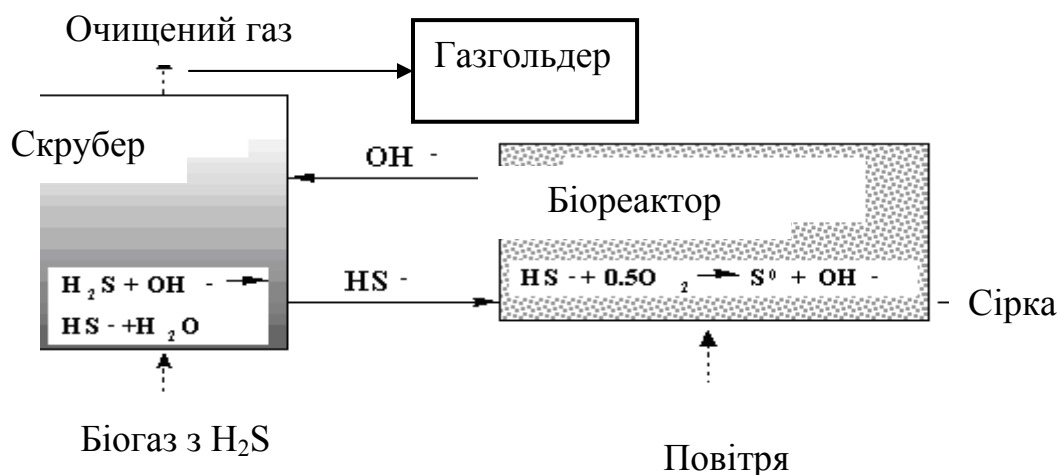


Рисунок 4.10 – Технологічна схема біокаталітичної технології очищення біогазу від сірководню

Переваги запропонованої технології порівняно з традиційними методами:

- практично безреагентний характер (необхідні тільки деякі солі для життєдіяльності бактерій);
- дешевизна;
- практично замкнутий цикл і мінімум стічних вод;
- основний кінцевий продукт (сірка) може бути легко повторно використаний (для виробництва сірчаної кислоти);
- процес проходить при температурі (15...25)°C і нормальному тиску.

4.3 Енергозберігаючі технологічні схеми роботи біогазових установок

Сучасна біогазова установка – це комплекс пристроїв, пов'язаних між собою гідравлічними, механічними, електричними та інформаційними зв'язками. В час високих технологій управління виробленням біогазу повинно бути максимально комп'ютеризованим та автоматизованим, щоб забезпечити максимальний ККД [37]. Досягти високої продуктивності БГУ можливо при комплексному поєднанні всіх інноваційних рішень. Авторами запропоновано принципову енергозберігаючу технологічну схему з виробництва біогазу з теплообмінником (рис 4.11) та тепловим насосом (рис 4.12), які втілюють всі попередні рекомендації. На рис. 4.11 зображено:

- 1 - реактор установки з конусами доверху і донизу;
- 2 - верхній конус установки для збору біогазу;
- 3 - нагрівальний елемент трубчастого типу;
- 4 - нижній конус для збору шламу;
- 5 - пристрій для видалення сірки;
- 6 - пристрій для видалення вуглекислого газу;
- 7 - газгольдер;
- 8 - трубопровід, що транспортує газ на потреби господарства;
- 9 - трубопровід, що транспортує газ на потреби БГУ;
- 10 - сервопривод з триходовим клапаном;
- 11- трубопровід, що транспортує рідку фазу шламу на полив;
- 12 - розділювач фаз відпрацьованого субстрату;
- 13 - теплообмінник типу «труба в трубі» для рекуперації тепла відпрацьованого шламу;
- 14 - фекальний насос;
- 15 - резервуар – збірник органічних відходів;
- 16 - циркуляційний насос системи теплопостачання БГУ;
- 17 - поле висушування сухої частини шламу.

Згідно з технологічною схемою біогазова установка працює таким чином. Із накопиченням в резервуарі 15 (рис. 4.11) органічних відходів вони фекальним насосом 14 відкачуються в трубопровід і подаються у верхню частину реактора 1. В реакторі 1 суміш перемішується і зволожується до необхідної концентрації сухої речовини. В процесі транспортування відпрацьований субстрат і свіжа органічна маса обмінюються теплом в теплообміннику 13. При цьому відпрацьований шлам втрачає тепло, а свіжа маса нагрівається. Підігрів субстрату

здійснює теплообмінник 3, що знаходиться в реакторі 1. Регуляція потужності теплообмінника виконується за допомогою змішувальної установки, до якої входить триходовий клапан з сервоприводом 10 та циркуляційний насос 16. Температура біогазу та його тиск контролюються манометром і термометром, що розміщені в кришці реактора.

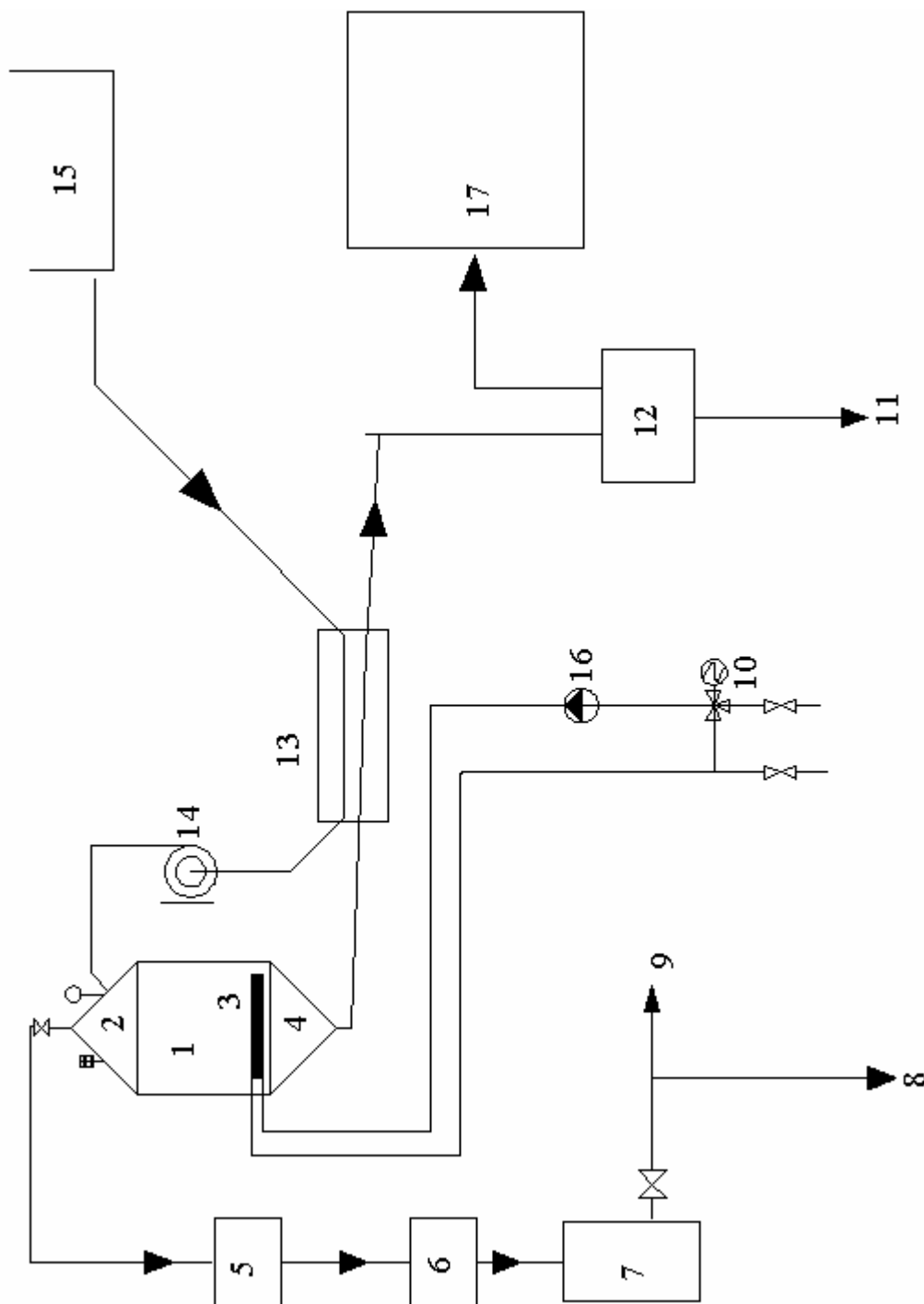


Рисунок 4.11 – Технологічна схема вироблення біогазу з рекуперативним теплообмінником

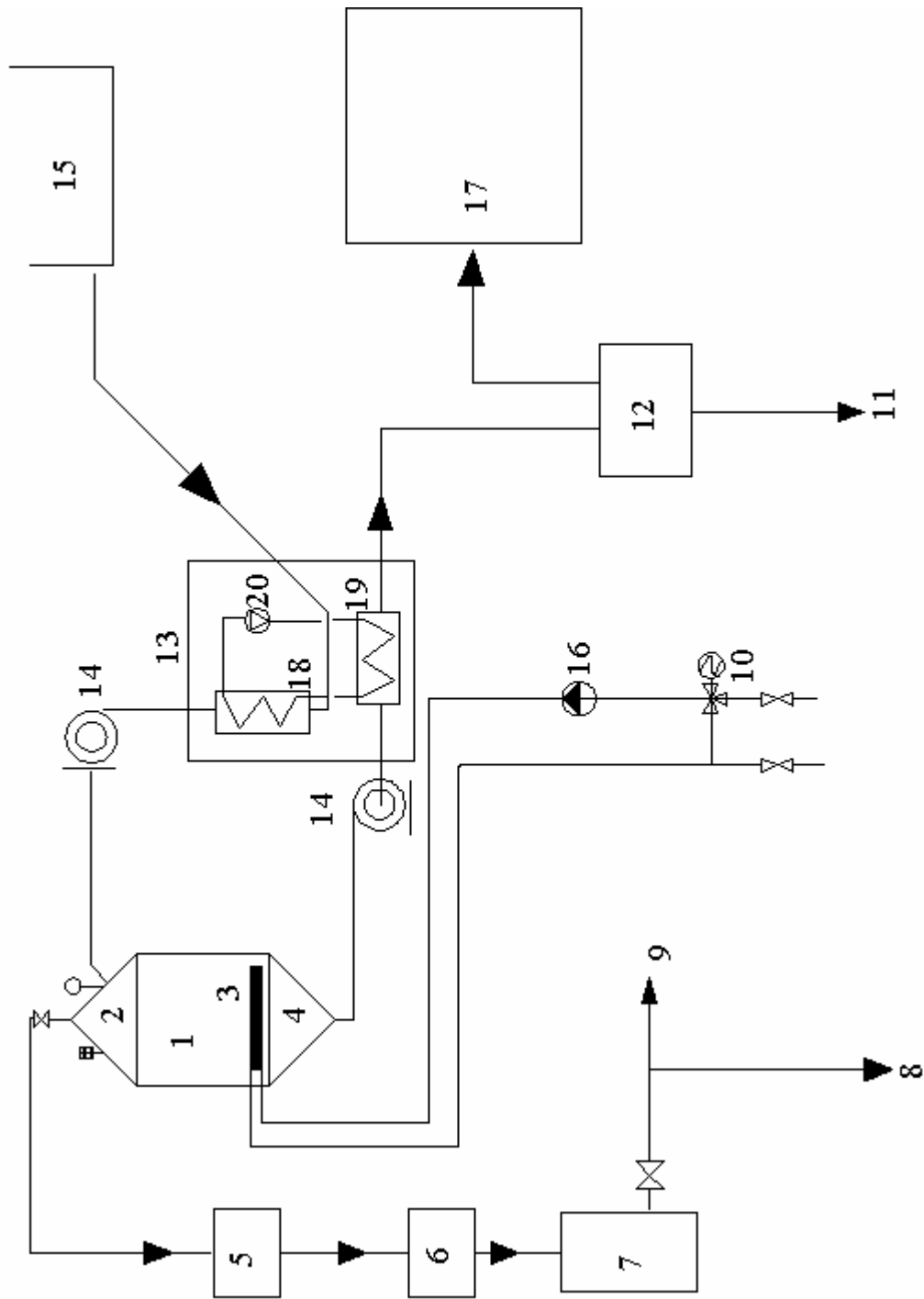


Рисунок 4.12 – Технологічна схема вироблення біогазу з тепловим насосом

Поступово накопичений біогаз випускають у пристрої видалення сірки 5, видалення вуглекислого газу – 6, та збирають у газгольдері 7. З газгольдера 7 газ направляють трубопроводом 9 на потреби самої БГУ, а трубопроводом 8 – на потреби господарства.

Відпрацьований шлам має високий запас теплової енергії, яка зазвичай розсіюється у атмосфері. В літній період різниця температур між органічною масою, що надходить в реактор, і тою, що його покидає, досягає $\Delta = 20$ °С. У зимовий дана різниця досить значна і може становити $\Delta = 40...50$ °С. Для максимально повної утилізації тепла рекомендується використовувати тепловий насос, який дозволить знизити витрати тепла на нагрівання вхідної сировини в декілька разів. Схема роботи БГУ з утилізатором тепла – тепловим насосом зображена на рис. 4.12.

На рисунку 4.12 зображено:

- 1 - реактор установки з конусами доверху і донизу;
- 2 - верхній конус установки для збору біогазу;
- 3 - нагрівальний елемент трубчастого типу;
- 4 - нижній конус для збору шламу;
- 5 - пристрій для видалення сірки;
- 6 - пристрій для видалення вуглекислого газу;
- 7 - газгольдер;
- 8 - трубопровід, що транспортує газ на потреби господарства;
- 9 - трубопровід, що транспортує газ на потреби БГУ;
- 10 - сервопривод з триходовим клапаном;
- 11 - трубопровід, що транспортує рідку фазу шламу на полив;
- 12 - розділювач фаз відпрацьованого субстрату;
- 13 - тепловий насос для рекуперації тепла відпрацьованого шламу;
- 14 - фекальний насос для подачі і видалення субстрату;
- 15 - резервуар-збірник органічних відходів;
- 16 - циркуляційний насос системи тепlopостачання БГУ;
- 17 - поле висушування сухої частини шламу;
- 18 - конденсатор теплового насоса;
- 19 - випарник теплового насоса;
- 20 - компресор з терморегуляційним вентилем теплового насоса.

Принцип роботи даної технологічної схеми аналогічний попередній. Але вона є ще енергоощаднішою за рахунок встановлення додаткового фекального насоса для видалення шламу та теплового насоса 13 для більш глибокої рекуперації тепла. На рис. 4.13 зображено схему

парокомпресійного теплового насоса фірми VISSMANN “Vitocal 100”. Первинний контур — вода, вторинний контур — вода. Номінальна теплова потужність 6,3 – 106,8 кВт. Більш детально про використання теплових насосів – в розділі 5.

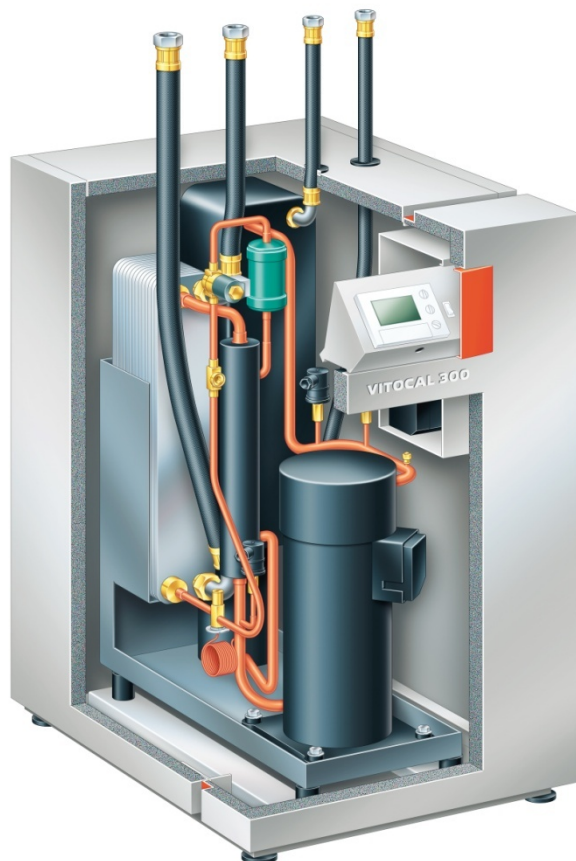


Рисунок 4.13 – Парокомпресійний тепловий насос Vitocal 100

Очищений від шкідливих домішок біогаз можна використовувати як паливо у плитах, двигунах, пальниках тощо. При використанні біогазу як палива доцільно користуватися таблицею 4.2 для перерахунку кількості біогазу при заміні ним традиційних палив.

Таблиця 4.2 – Перевідні коефіцієнти при використанні біогазу замість традиційних палив для опалення:

Енергоносій	Перевідний коефіцієнт
Вугілля, кокс, природний газ	0,73
Електричний струм	1,16
Котельне паливо	0,95

4.4 Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень з управління технологічними механізмами підвищення продуктивності біогазових реакторів

Математичному моделюванню технологічних процесів біогазових реакторів у системах біоконверсії та прогнозуванню продуктивності роботи біореакторів сприяє моделювання багатофакторного процесу на базі даних, що реєструються як вихідні показники. Прогнозування ефекту виходу біогазу залежно від факторів, що впливають на цей процес, доцільно виконувати на основі експертних кількісних і якісних оцінок. Як інтенсифікувальні чинники прийняті: барботування, оребрення та вібрація нагрівального елемента в субстраті [31, 37].

Для створення експертно-моделюючої системи для багатофакторного аналізу процесів управління біореакторами використано математичний апарат, що базується на теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної (ЛЗ) [33, 34, 35]. Цей метод як взаємозв'язана сукупність математичних моделей, алгоритмів й формалізованих методик дозволяє використовувати експертно-лінгвістичну інформацію для прогнозування продуктивності реактора від факторів, що її обумовлюють, а також від факторів, що впливають на процес теплообміну між нагрівником і субстратом [26, 28, 31, 36].

Для встановлення ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на вихід біогазу в біореакторах, виконано їх класифікацію за ознаками: тип і якість сировини, конструкція реактора, стабільність температурного режиму. Розглянувши вихід біогазу на системному рівні, лінгвістичну змінну $L_{вих}$, що характеризує вихід біогазу, можна подати у вигляді співвідношення [36]

$$L_{вих} = f(X, Y, Z), \quad (4.11)$$

де X – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує вплив типу і якості сировини;

Y – ЛЗ, що описує вплив конструкції реактора;

Z – ЛЗ, що описує вплив стабільності температурного режиму.

ЛЗ, що описує вплив типу і якості сировини, може бути подана виразом

$$X = f(x_1, x_2, x_3), \quad (4.12)$$

де x_1 – ЛЗ "тип сировини";

x_2 – ЛЗ "подрібненість сировини";

x_3 – ЛЗ "вологість сировини".

Лінгвістичну змінну, що описує вплив конструкції реактора, можна розгорнути в співвідношення

$$Y=f(y_1, y_2, y_3), \quad (4.13)$$

де y_1 – ЛЗ "звичайний";

y_2 – ЛЗ "утеплений";

y_3 – ЛЗ "з інтенсифікацією теплообміну та контролем параметрів".

Лінгвістичну змінну, що описує вплив стабільності температурного режиму, можна розгорнути в співвідношення

$$Z=f(z_1, z_2, z_3), \quad (4.14)$$

де z_1 – ЛЗ "градієнт температур між нагрівником та середовищем";

z_2 – ЛЗ "інтенсифікація теплообміну";

z_3 – ЛЗ "тип теплообмінника".

В рівняння (2.4) входять змінні, які, в свою чергу, залежать від інших факторів:

$$z_2=f(q_1, q_2, q_3), \quad (4.15)$$

де q_1 – перемішування в горизонтальній площині;

q_2 – барботування;

q_3 – коливальна активація.

$$q_3=f(u_1, u_2), \quad (4.16)$$

де u_1 – частота вібрацій,

u_2 – амплітуда коливань.

За результатами аналізу сукупності співвідношень (4.11) – (4.16) побудовано дерево логічного висновку. Корінь дерева логічного висновку відповідає значенню продуктивності біогазового реактора, а висячі вершини – факторам, що впливають на її величину (рис. 4.14).

Оцінювання значень лінгвістичних змінних, які наведено в співвідношенні (4.11), проводиться за допомогою системи якісних термінів: Н – низька; нС – нижче середнього; С – середня; вС – вище середнього; В – висока. Кожний з цих термінів становить відповідну нечітку множину, тобто деяку властивість, яка розглядається як лінгвістичний терм [40]. Для лінгвістичних змінних, які впливають на продуктивність біореактора, оціночні терми наведено в табл. 4.3.

У табл. 4.3 використано такі позначення: у.о. – умовні одиниці; Δt – різниця температур між температурою стінки і температурою субстрату;

$K = Nu/Nu_0$ – відношення критерію Нуссельта при активації теплообміну і при вільній конвекції; $V_{\text{прив}}$ – приведена швидкість барботування.

Таблиця 4.3 – Фактори як лінгвістичні змінні

Параметр	Позначення й назва змінної	Універсальна множина	Терми для оцінювання
Тип і якість сировини (X)	x_1 – тип сировини	(1...3), у.о.	низька(н), середня(ср), висока(в)
	x_2 – подрібненість	(0,01-1), мм	здрібнено(зд), нездрібнено(нз)
	x_3 – вологість сировини	(80...98), %	низька(н), нормальна(нр), висока(в)
Конструкція біореактора (Y)	y_1 – конструктивне виконання	(1...3), у.о.	циліндричний (ц) траншейного типу (тр) кулеподібний (к)
	y_2 – термічний опір стінки реактора	(1,0–3,0), $\text{м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт}$	низька(н), помірна(п) висока(в)
	y_3 – якість автоматизованого управління	(1...4) у.о.	низька(н), помірна(п) висока(в)
Стабільність режиму (Z)	z_1 – градієнт температур	(0...30) Δt , °C	низький(н), задовільний(з), високий(в)
	z_2 – інтенсифікація теплообміну	$K = Nu/Nu_0 = 1.5...5$	низька(н), середня(ср), висока(в)
	z_3 – тип теплообмінника	(1...2), у.о.	вмонтований(вм) трубчастий(тр)
	q_1 – перемішування в гориз. площині	$K = Nu/Nu_0 = 0...3$	відсутнє(в), середнє(с), високе(вс)
	q_2 – барботування теплообмінника біогазом	$V_{\text{прив}}$ (0...40) 10^{-4} , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	відсутнє(в), середнє(с), високе(вс)
	q_3 – коливальна активація	$K = Nu/Nu_0 = 0...5$	відсутня(в), середня(с), висока(в)
	u_1 – частота коливань	(0...10), Гц	низька(н), середня(с), висока(в)
	u_2 – амплітуда коливань	(0...100), мм	низька(н), середня(с), висока(в)

Для розроблення математичної моделі оцінювання ступеня виходу біогазу в біореакторах та прийняття організаційно-технологічних рішень щодо зменшення капітальних та експлуатаційних затрат в системах біоконверсії як джерело інформації використовуються експертні оцінки, які мають якісний характер і доступні проектувальникам цих систем [3-6, 16, 24, 31, 44, 53, 61, 64, 73, 79]. Метод побудови функцій належності передбачає фазифікацію нечітких оцінок факторів впливу. Етап фазифікації включає вибір нечітких термів для лінгвістичної оцінки факторів впливу, що задані на відповідних універсальних множинах (табл. 4.3).

Нечіткою множиною, за допомогою якої формалізується терм \tilde{S} , є сукупність пар [33, 34]:

$$\tilde{S} = \left\{ \frac{\mu_s(u_1)}{u_1}, \frac{\mu_s(u_2)}{u_2}, \dots, \frac{\mu_s(u_n)}{u_n} \right\}, \quad (4.17)$$

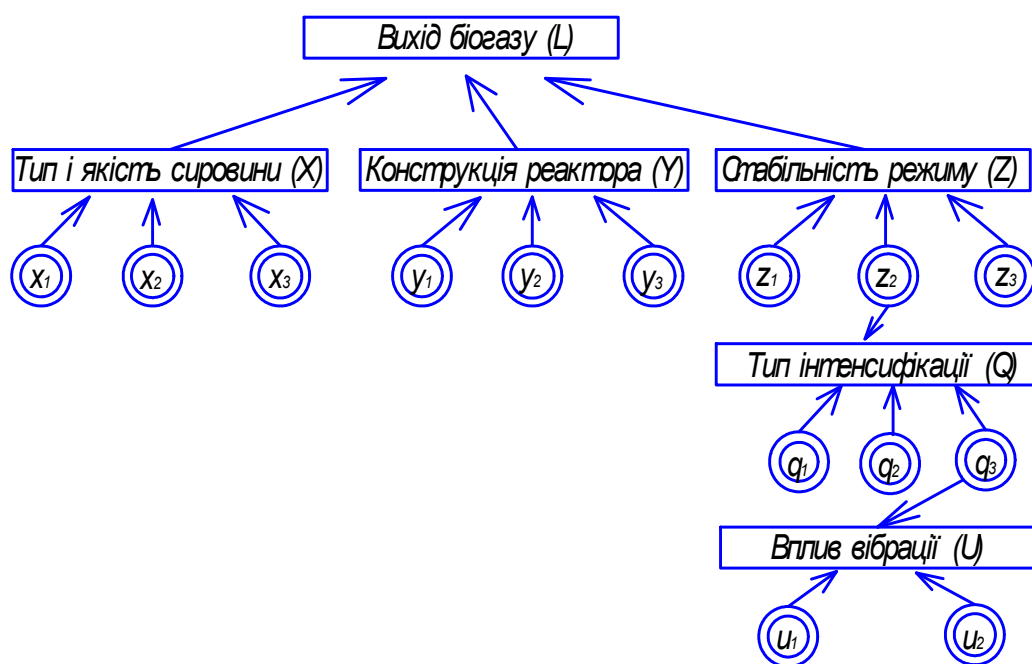


Рисунок 4.14 – Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на прийняття рішень з управління механізмами підвищення продуктивності біореакторів

де $\{u_1, u_2, \dots, u_n\} = U$ – універсальна множина, на якій задається нечітка множина $S \in U$;

$\mu_s(u_i)$ – ступінь належності елемента, $u_i \in U$ нечіткій множині \tilde{S} .

Розв'язання задачі фазифікації ґрунтується на ідеї розподілу ступенів належності універсальної множини згідно з їх рангами.

Таблиця 4.4 – База знань про співвідношення (4.11)

ЯКЩО			ТО
Вплив типу і якості сировини (X)	Вплив конструкції реактора (Y)	Вплив стабільності режиму (Z)	Продуктивність біореактора ($L_{вих}$)
Низький (H)	Низький (H)	Низький (H)	Низька (H)
Нижче середнього (hC)	Нижче середнього (hC)	Нижче середнього (hC)	
Низький (H)	Низький (H)	Низький (H)	Нижче середньої (hC)
Нижче середнього (hC)	Нижче середнього (hC)	Нижче середнього (hC)	
Середній (C)	Середній (C)	Середній (C)	Середня (C)
Нижче середнього (hC)	Нижче середнього (hC)	Нижче середнього (hC)	
Середній (C)	Середній (C)	Середній (C)	
Вище середнього (vC)	Вище середнього (vC)	Вище середнього (vC)	Вище середньої (vC)
Середній (C)	Середній (C)	Середній (C)	
Вище середнього (vC)	Вище середнього (vC)	Вище середнього (vC)	Висока (B)
Високі (B)	Високі (B)	Високі (B)	
Вище середнього (vC)	Вище середнього (vC)	Вище середнього (vC)	Висока (B)
Високий (B)	Високий (B)	Високий (B)	

Лінгвістичним висловлюванням, які наведено в табл. 4.4, відповідає система нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом

$$\mu_n(L_{вих}) = \mu_n(X) \wedge \mu_n(Y) \wedge \mu_n(Z) \vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z); \quad (4.18)$$

$$\mu_{nC}(L_{\text{вих}}) = \mu_n(X) \wedge \mu_n(Y) \wedge \mu_n(Z) \vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \mu_c(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_c(Z); \quad (4.19)$$

$$\mu_c(L_{\text{вих}}) = \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \mu_c(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_c(Z) \vee \mu_{vC}(X) \wedge \mu_{vC}(Y) \wedge \mu_{vC}(Z); \quad (4.20)$$

$$\mu_{vC}(L_{\text{вих}}) = \mu_c(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_c(Z) \vee \mu_{vC}(X) \wedge \mu_{vC}(Y) \wedge \mu_{vC}(Z) \vee \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_B(Z); \quad (4.21)$$

$$\mu_B(L_{\text{вих}}) = \mu_{vC}(X) \wedge \mu_{vC}(Y) \wedge \mu_{vC}(Z) \vee \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_B(Z). \quad (4.22)$$

Оцінку рівнів лінгвістичних змінних, які пов'язують вплив типу і якості сировини (X) на продуктивність біореактора з типом сировини (x_1), подрібненістю (x_2), вологістю (x_3), наведено в табл. 4.5

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 4.5, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом

$$\mu_n(X) = \mu_n(x_1) \wedge \mu_{nz}(x_2) \wedge \mu_v(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \mu_{nz}(x_2) \wedge \mu_n(x_3); \quad (4.23)$$

$$\mu_{nC}(X) = \mu_n(x_1) \wedge \mu_{zd}(x_2) \wedge \mu_v(x_3) \vee \mu_{cp}(x_1) \wedge \mu_{nz}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \mu_{nz}(x_2) \wedge \mu_n(x_3); \quad (4.24)$$

Таблиця 4.5 – База знань про співвідношення (4.12)

ЯКЩО			ТО
Тип сировини (x_1)	Подрібненість (x_2)	Вологість (x_3)	Якість сировини (X)
Низький (н)	Нездрібнено (нз)	Висока (в)	Низький (Н)
Низький (н)	Нездрібнено (нз)	Нормальна (н)	
Низький (н)	Здрібнено (зд)	Висока (в)	Нижче середньої (нС)
Середній (ср)	Нездрібнено (нз)	Нормальна (н)	
Низький (н)	Нездрібнено (нз)	Низький (н)	
Низький (н)	Здрібнено (зд)	Нормальна (н)	Середня (С)
Середній (ср)	Здрібнено (зд)	Висока (в)	
Високий (в)	Нездрібнено (нз)	Нормальна (н)	
Низький (н)	Здрібнено (зд)	Низький (н)	Вище середньої (вС)
Середній (ср)	Здрібнено (зд)	Нормальна (н)	
Високий (в)	Здрібнено (зд)	Нормальна (н)	
Середній (ср)	Здрібнено (зд)	Низький (н)	Висока (В)
Високий (в)	Здрібнено (зд)	Низька (н)	

$$\mu_C(X) = \mu_n(x_1) \wedge \mu_{з\partial}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_{cp}(x_1) \wedge \mu_{з\partial}(x_2) \wedge \mu_в(x_3) \vee \mu_{cp}(x_1) \wedge \mu_{нз}(x_2) \wedge \mu_n(x_3); \quad (4.25)$$

$$\mu_{вC}(X) = \mu_n(x_1) \wedge \mu_{з\partial}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_{cp}(x_1) \wedge \mu_{з\partial}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_в(x_1) \wedge \mu_{з\partial}(x_2) \wedge \mu_n(x_3); \quad (4.26)$$

$$\mu_B(X) = \mu_{cp}(x_1) \wedge \mu_{з\partial}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_в(x_1) \wedge \mu_{з\partial}(x_2) \wedge \mu_n(x_3). \quad (4.27)$$

Таким чином, розробляються лінгвістичні висловлювання і відповідні системи нечітких логічних рівнянь для кожної змінної на всіх рівнях, які впливають на продуктивність біореактора при утилізації органічних відходів.

Таблиця 4.6 – База знань про співвідношення (4.13)

ЯКЩО			ТО
Гradient температур (z ₁)	Інтенсифікація теплообміну(z ₂)	Тип теплообмінника (z ₃)	Стабільність режиму (Z)
Високий (в)	Низька (н)	Трубчастий (тр)	Низька (Н)
Високий (в)	Низька (н)	Вмонтований (вм)	
Високий (в)	Середня (ср)	Трубчастий (тр)	Нижча середньої (нС)
Задовільний (з)	Низька (н)	Трубчастий (тр)	
Задовільний (з)	Середня (ср)	Трубчастий (тр)	
Задовільний (з)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	Середня (С)
Низький (н)	Середня (ср)	Трубчастий (тр)	
Задовільний (з)	Висока(в)	Трубчастий (тр)	
Задовільний (з)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	Вища середньої (вС)
Задовільний (з)	Висока(в)	Вмонтований (вм)	
Низький (н)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	
Низький (н)	Висока(в)	Трубчастий (тр)	Висока (В)
Низький (н)	Висока(в)	Вмонтований (вм)	

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 4.6, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом

$$\mu_n(Z) = \mu_\theta(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_{mp}(z_3) \vee \mu_\theta(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_{\theta m}(z_3); \quad (4.28)$$

$$\mu_{nC}(Z) = \mu_\theta(z_1) \wedge \mu_{cp}(z_2) \wedge \mu_{mp}(z_3) \vee \mu_\theta(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_{mp}(z_3) \vee \mu_\theta(z_1) \wedge \mu_{cp}(z_2) \wedge \mu_{\theta p}(z_3); \quad (4.29)$$

$$\mu_C(Z) = \mu_\theta(z_1) \wedge \mu_{cp}(z_2) \wedge \mu_{\theta m}(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_{cp}(z_2) \wedge \mu_{mp}(z_3) \vee \mu_\theta(z_1) \wedge \mu_\theta(z_2) \wedge \mu_{mp}(z_3); \quad (4.30)$$

$$\mu_{\theta C}(Z) = \mu_\theta(z_1) \wedge \mu_{cp}(z_2) \wedge \mu_{\theta m}(z_3) \vee \mu_{\theta d}(z_1) \wedge \mu_\theta(z_2) \wedge \mu_{\theta m}(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_{cp}(z_2) \wedge \mu_{\theta m}(z_3); \quad (4.31)$$

$$\mu_B(Z) = \mu_n(z_1) \wedge \mu_B(z_2) \wedge \mu_{mp}(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_\theta(z_2) \wedge \mu_{\theta m}(z_3). \quad (4.32)$$

Таблиця 4.7 – База знань про співвідношення (4.14)

ЯКЩО			ТО
Конструктивне виконання (y ₁)	Термічний опір стінки реактора (y ₂)	Якість автоматизованого управління (y ₃)	Вплив конструкції біореактора (Y)
траншейне (mp)	низький (n)	низька (n)	Низький (H)
траншейне (mp)	середній (c)	низька (n)	
траншейне (mp)	середній (c)	середня (c)	Нижче середнього (nC)
циліндричне (ц)	низький (n)	середня (c)	
траншейне (mp)	середній (c)	середня (c)	
циліндричне (ц)	середній (c)	середня (c)	Середній (C)
кулеподібне (к)	середній (c)	середня (c)	
траншейне (mp)	середній (c)	висока (в)	
циліндричне (ц)	високий (в)	середня (c)	Вище середнього (вC)
кулеподібне (к)	високий (в)	середня (c)	
траншейне (mp)	високий (в)	висока (в)	
циліндричне (ц)	високий (в)	висока (в)	Високий (B)
кулеподібне (к)	високий (в)	висока (в)	

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 4.7, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом

$$\mu_n(Y) = \mu_{mp}(y_1) \wedge \mu_n(y_2) \wedge \mu_n(y_3) \vee \mu_{mp}(y_1) \wedge \mu_c(y_2) \wedge \mu_n(y_3); \quad (4.33)$$

$$\mu_{nC}(Y) = \mu_{mp}(y_1) \wedge \mu_c(y_2) \wedge \mu_c(y_3) \vee \mu_c(y_1) \wedge \mu_n(y_2) \wedge \mu_c(y_3) \vee \mu_{mp}(y_1) \wedge$$

$$\wedge \mu_c(y_2) \wedge \mu_c(y_3); \quad (4.34)$$

$$\mu_c(Y) = \mu_{\mu}(y_1) \wedge \mu_c(y_2) \wedge \mu_c(y_3) \vee \mu_k(y_1) \wedge \mu_c(y_2) \wedge \mu_c(y_3) \vee \mu_{mp}(y_1) \wedge \mu_c(y_2) \wedge \mu_c(y_3); \quad (4.35)$$

$$\mu_{bc}(Y) = \mu_{\mu}(y_1) \wedge \mu_b(y_2) \wedge \mu_c(y_3) \vee \mu_k(y_1) \wedge \mu_b(y_2) \wedge \mu_c(y_3) \vee \mu_{mp}(y_1) \wedge \mu_b(y_2) \wedge \mu_c(y_3); \quad (4.36)$$

$$\mu_b(Y) = \mu_{\mu}(y_1) \wedge \mu_b(y_2) \wedge \mu_b(y_3) \vee \mu_k(y_1) \wedge \mu_b(y_2) \wedge \mu_b(y_3). \quad (4.37)$$

В таблицю 4.8 зведено логічні висловлювання, що стосуються факторів впливу на теплообмін: оребрення, барботування, коливальна активація.

Таблиця 4.8 – База знань про співвідношення (4.15)

ЯКЩО			ТО
Перемішування (q ₁)	Барботування (q ₂)	Колив. активація (q ₃)	Інтенсифікація(Q)
Відсутнє (в)	Низьке(н)	Низька(н)	Низька (Н)
Низьке(н)	Відсутнє (в)	Низька(н)	
Низьке(н)	Низьке(н)	Відсутня (в)	
Відсутнє (в)	Відсутнє (в)	Низька(н)	Нижча середньої (нС)
Середнє (с)	Низьке(н)	Відсутня (в)	
Низьке(н)	Середнє (с)	Відсутня (в)	
Середнє (с)	Середнє (с)	Відсутня (в)	Середня (С)
Високе (вс)	Відсутнє (в)	Відсутня (в)	
Відсутнє (в)	Високе (вс)	Відсутня (в)	
Середнє (с)	Високе (вс)	Відсутнє (в)	Вища середньої (вС)
Середнє (с)	Відсутнє (в)	Середня (с)	
Високе (вс)	Відсутнє (в)	Середня (с)	
Високе (вс)	Високе (вс)	Відсутня (в)	Висока (В)
Середнє (с)	Середнє (с)	Висока (вс)	
Високе (вс)	Середнє (с)	Висока (вс)	

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 4.8, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом

$$\mu_n(Q) = \mu_v(q_1) \wedge \mu_n(q_2) \wedge \mu_n(q_3) \vee \mu_n(q_1) \wedge \mu_v(q_2) \wedge \mu_n(q_3) \vee \mu_n(q_1) \wedge \mu_n(q_2) \wedge \mu_v(q_3); \quad (4.38)$$

$$\mu_{nc}(Q) = \mu_v(q_1) \wedge \mu_v(q_2) \wedge \mu_n(q_3) \vee \mu_c(q_1) \wedge \mu_n(q_2) \wedge \mu_v(q_3) \vee \mu_n(q_1) \wedge$$

$$\wedge \mu_c(q_2) \wedge \mu_B(q_3); \quad (4.39)$$

$$\mu_C(Q) = \mu_c(q_1) \wedge \mu_c(q_2) \wedge \mu_B(q_3) \vee \mu_{bc}(q_1) \wedge \mu_B(q_2) \wedge \mu_B(q_3) \vee \mu_B(q_1) \wedge \mu_{bc}(q_2) \wedge \mu_B(q_3); \quad (4.40)$$

$$\mu_{BC}(Q) = \mu_c(q_1) \wedge \mu_{bc}(q_2) \wedge \mu_B(q_3) \vee \mu_c(q_1) \wedge \mu_B(q_2) \wedge \mu_c(q_3) \vee \mu_{bc}(q_1) \wedge \mu_B(q_2) \wedge \mu_c(q_3); \quad (4.41)$$

$$\mu_B(Q) = \mu_{bc}(q_1) \wedge \mu_{bc}(q_2) \wedge \mu_B(q_3) \vee \mu_B(q_1) \wedge \mu_B(q_2) \wedge \mu_{bc}(q_3) \vee \mu_{bc}(q_1) \wedge \mu_B(q_2) \wedge \mu_{bc}(q_3). \quad (4.42)$$

Таблиця 4.9 – База знань про співвідношення (4.16)

ЯКЩО		ТО
Частота (u ₁)	Амплітуда (u ₂)	Коливальна активація (q ₃)
Низька(н)	Низька(н)	Низька (Н)
Низька(н)	Середня (с)	
Середня (с)	Низька(н)	Нижча середньої (нС)
Низька(н)	Висока (вс)	
Середня (с)	Середня (с)	Середня (С)
Висока (вс)	Низька(н)	
Середня (с)	Висока (вс)	Вища середньої (вС)
Висока (вс)	Середня (с)	
Висока (вс)	Висока (вс)	Висока (В)

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 4.9, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом

$$\mu_H(q_3) = \mu_H(u_1) \wedge \mu_H(u_2) \vee \mu_H(u_1) \wedge \mu_C(u_2); \quad (4.43)$$

$$\mu_{HC}(q_3) = \mu_C(u_1) \wedge \mu_H(u_2) \vee \mu_H(u_1) \wedge \mu_{bc}(u_2); \quad (4.44)$$

$$\mu_C(q_3) = \mu_C(u_1) \wedge \mu_C(u_2) \vee \mu_{bc}(u_1) \wedge \mu_H(u_2); \quad (4.45)$$

$$\mu_{BC}(q_3) = \mu_C(u_1) \wedge \mu_{bc}(u_2) \vee \mu_{bc}(u_1) \wedge \mu_C(u_2); \quad (4.46)$$

$$\mu_B(q_3) = \mu_{bc}(u_1) \wedge \mu_{bc}(u_2). \quad (4.47)$$

Техніка нечіткого логічного висновку, що застосовувалася до інформації, яка зібрана на попередніх етапах, дозволяє обчислити показники, котрі прогнозуються як нечіткі множини. Нечіткі множини визначають

ступінь інтенсифікації теплообміну між нагрівником і середовищем для фіксованого вектора факторів впливу. Щоб перейти від отриманих нечітких множин до кількісної оцінки, необхідно виконати процедуру дефазифікації, тобто перетворення нечіткої інформації в чітку форму. Серед різних методів дефазифікації найбільш поширеним є метод «Centroid» – центр тяжіння плоскої фігури, яка обмежена функцією належності нечіткої множини та горизонтальною координатою. Дефазифікацією нечіткої множини

$L = \sum_{i=1}^n \mu_A(u_i) / u_i$ за методом «Centroid» називається обчислення величини $L = \text{centroid}(\tilde{L})$ за формулою

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_A(u_i) \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_A(u_i)} \quad (4.48)$$

Для прикладу проведено дефазифікацію на рівні типу і якості сировини, для чого обчислено значення функцій належності методом парних порівнянь. Фактор x_1 – тип сировини [1...3] умовні одиниці. Матриця, що відображає парні порівняння різних величин сировини з точки зору їх близькості до терму «низька», має вигляд (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 – Парні порівняння величин з точки зору їх близькості до терму «низька»

	u_1	u_2	u_3
u_1	1	7/9	3/9
u_2	9/7	1	5/7
u_3	9/3	7/5	1

Відповідно до даних таблиці 4.10 отримано ступені належності елементів $u_1 \dots u_3$ до терму «низька»

$$u_{\text{низька}}(u_1) = \frac{1}{1 + \frac{7}{9} + \frac{3}{9}} = 0,47 ; \quad (4.49)$$

$$u_{\text{низька}}(u_2) = \frac{1}{1 + \frac{9}{7} + \frac{5}{7}} = 0,33 ; \quad (4.50)$$

$$u_{\text{низька}}(u_3) = \frac{1}{1 + \frac{9}{3} + \frac{7}{5}} = 0,19 \quad (4.51)$$

Аналогічно визначено матриці парних порівнянь для термів «середня» та «висока» та відповідні ступені належності. Результати наведено в табл. 4.11. Отримані результати функцій належності пронормовано на одиницю шляхом ділення на найбільший ступінь належності.

Таблиця 4.11 – Матриці парних порівнянь та ступені належності

Терми для оцінки	Матриця парних порівнянь	Ступені належності																
низький	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>u₁</th> <th>u₂</th> <th>u₃</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>u₁</th> <td>1</td> <td>7/9</td> <td>3/9</td> </tr> <tr> <th>u₂</th> <td>9/7</td> <td>1</td> <td>5/7</td> </tr> <tr> <th>u₃</th> <td>9/3</td> <td>7/5</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		u ₁	u ₂	u ₃	u ₁	1	7/9	3/9	u ₂	9/7	1	5/7	u ₃	9/3	7/5	1	u(u ₁)=0,47 u(u ₂)=0,33 u(u ₃)=0,19
	u ₁	u ₂	u ₃															
u ₁	1	7/9	3/9															
u ₂	9/7	1	5/7															
u ₃	9/3	7/5	1															
середній	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>u₁</th> <th>u₂</th> <th>u₃</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>u₁</th> <td>1</td> <td>9/5</td> <td>7/5</td> </tr> <tr> <th>u₂</th> <td>5/9</td> <td>1</td> <td>3/5</td> </tr> <tr> <th>u₃</th> <td>5/7</td> <td>5/3</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		u ₁	u ₂	u ₃	u ₁	1	9/5	7/5	u ₂	5/9	1	3/5	u ₃	5/7	5/3	1	u(u ₁)=0,23 u(u ₂)=0,46 u(u ₃)=0,29
	u ₁	u ₂	u ₃															
u ₁	1	9/5	7/5															
u ₂	5/9	1	3/5															
u ₃	5/7	5/3	1															
високий	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>u₁</th> <th>u₂</th> <th>u₃</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>u₁</th> <td>1</td> <td>9/7</td> <td>9/3</td> </tr> <tr> <th>u₂</th> <td>7/9</td> <td>1</td> <td>7/5</td> </tr> <tr> <th>u₃</th> <td>3/9</td> <td>5/7</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		u ₁	u ₂	u ₃	u ₁	1	9/7	9/3	u ₂	7/9	1	7/5	u ₃	3/9	5/7	1	u(u ₁)=0,19 u(u ₂)=0,33 u(u ₃)=0,47
	u ₁	u ₂	u ₃															
u ₁	1	9/7	9/3															
u ₂	7/9	1	7/5															
u ₃	3/9	5/7	1															

В результаті чого тип сировини представлений у вигляді таких нечітких множин:

- тип сировини «низький»

$$= \left\{ \frac{1}{1}, \frac{0,7}{2}, \frac{0,4}{3} \right\};$$

- тип сировини «середній»

$$= \left\{ \frac{0.5}{1}, \frac{1}{2}, \frac{0.63}{3} \right\};$$

- тип сировини «високий»

$$= \left\{ \frac{0.4}{1}, \frac{0.7}{2}, \frac{1}{3} \right\}.$$

Нечіткі множини $\mu(x_1)$ описано за допомогою графіків, які наведено на рис. 4.15.

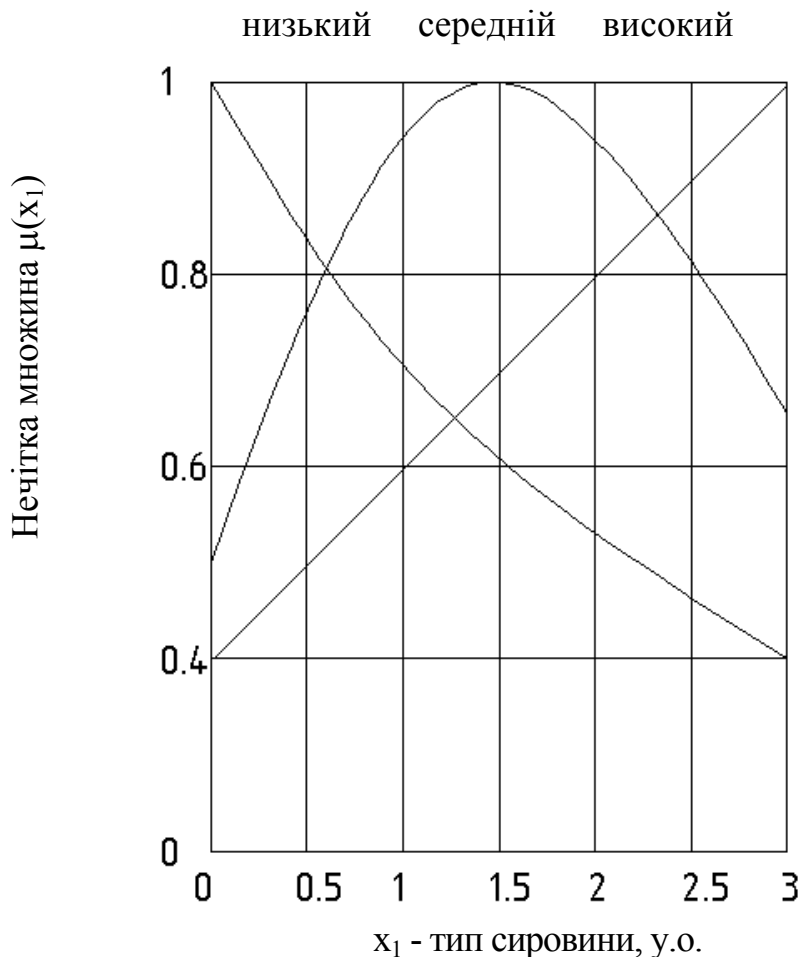


Рисунок 4.15 – **Функції належності для лінгвістичної змінної «тип сировини»**

Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень з управління технологічними механізмами підвищення продуктивності біогазових реакторів на базі теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної виконуються за допомогою розробленої структурної моделі прийняття рішень. Визначено кількість біогазу, що може бути вироблений біореактором за добу, при таких вихідних умовах:

- тип сировини відповідає рівню 3 у.о.;
- подрібненість складає в середньому 0,3 мм;

- вологість 96 %;
- конструктивне виконання 2 у.о., що відповідає типу циліндричного реактора;
- термічний опір стінки реактора $2.8 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;
- якість автоматизованого управління 2,8 у.о.;
- градієнт температур між нагрівальним елементом і субстратом $17 \text{ }^\circ\text{C}$;
- інтенсифікація теплообміну $K=2,5$;
- теплообмінник відповідає оцінці 1,4 у.о.;
- перемішування $K=0$ – відсутнє;
- барботування $20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ с}$;
- віброактивація $K=0$ – відсутня;
- частота коливань 0 Гц;
- амплітуда коливань 0 мм.

Для визначення продуктивності біореактора необхідно обчислити значення і функції належності факторів, що впливають на величину X – «тип і якість сировини», Y – «конструкція біореактора», Z – «стабільність режиму». Потім необхідно провести дефазифікацію вихідного показника, тобто перетворити нечітку інформацію в чітку форму.

Значення і функції належності факторів, що впливають на величину X – «тип і якість сировини», зведено в таблицю 4.12

Використовуючи аналітичні формули (4.23 – 4.27) та значення функції належності та змінних x_1, x_2, x_3 (табл. 4.12), отримаємо значення функції належності терм-оцінок змінної X .

$$\mu_H(X) = 0,4 \wedge 0,48 \wedge 1 \vee 0,4 \wedge 0,48 \wedge 0,63 = 0,4; \quad (4.52)$$

$$\mu_{HC}(X) = 0,4 \wedge 0,76 \wedge 1 \vee 0,63 \wedge 0,48 \wedge 0,63 \vee 0,4 \wedge 0,48 \wedge 0,4 = 0,48; \quad (4.53)$$

$$\mu_C(X) = 0,4 \wedge 0,76 \wedge 0,63 \vee 0,63 \wedge 0,76 \wedge 1 \vee 0,63 \wedge 0,48 \wedge 0,4 = 0,63; \quad (4.54)$$

$$\mu_{BC}(X) = 0,4 \wedge 0,76 \wedge 0,4 \vee 0,63 \wedge 0,76 \wedge 0,4 \vee 1 \wedge 0,76 \wedge 0,4 = 0,4; \quad (4.55)$$

$$\mu_B(X) = 0,63 \wedge 0,76 \wedge 0,4 \vee 1 \wedge 0,76 \wedge 0,4 = 0,4. \quad (4.56)$$

Таблиця 4.12 – Значення і функції належності факторів, що впливають на величину X – «тип і якість сировини»

Фактор (U*)	Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U*	Значення функції належності змінної (X)
x ₁	3 у.о.	$\mu_H(x_1) = 0,4$ $\mu_C(x_1) = 0,63$ $\mu_B(x_1) = 1$	$\mu_H(X) = 0,4$ $\mu_{HC}(X) = 0,48$ $\mu_C(X) = 0,63$ $\mu_{BC}(X) = 0,4$ $\mu_B(X) = 0,4$
x ₂	0,3 мм	$\mu_{зд}(x_2) = 0,76$ $\mu_{нз}(x_2) = 0,48$	
x ₃	96 %	$\mu_H(x_3) = 0,4$ $\mu_C(x_3) = 0,63$ $\mu_B(x_3) = 1$	

Використавши рівняння (4.33 – 4.37) та значення функції належності та змінних y_1, y_2, y_3 (табл. 4.13), отримаємо значення функції належності терм-оцінок змінної Y.

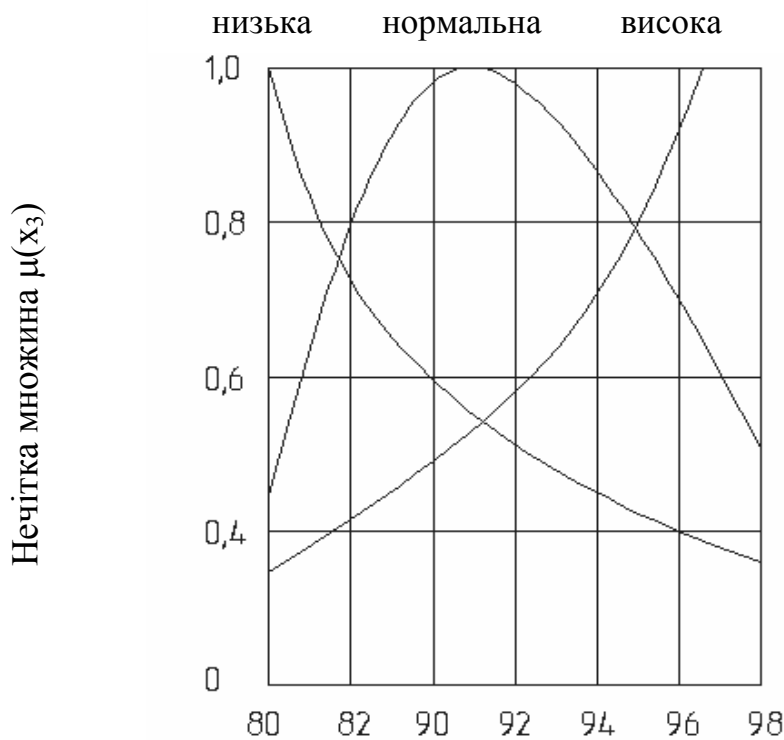
$$\mu_H(Y) = 0,38 \wedge 0,26 \wedge 0,84 \vee 0,38 \wedge 0,63 \wedge 0,84 = 0,84; \quad (4.57)$$

$$\mu_{HC}(Y) = 0,38 \wedge 0,63 \wedge 0,58 \vee 0,72 \wedge 0,26 \wedge 0,58 \vee 0,38 \wedge 0,63 \wedge 0,58 = 0,63; \quad (4.58)$$

$$\mu_C(Y) = 0,72 \wedge 0,63 \wedge 0,58 \vee 0,45 \wedge 0,63 \wedge 0,58 \vee 0,38 \wedge 0,63 \wedge 0,28 = 0,63; \quad (4.59)$$

$$\mu_{BC}(Y) = 0,72 \wedge 0,84 \wedge 0,58 \vee 0,45 \wedge 0,84 \wedge 0,58 \vee 0,38 \wedge 0,84 \wedge 0,28 = 0,84; \quad (4.60)$$

$$\mu_B(Y) = 0,72 \wedge 0,84 \wedge 0,28 \vee 0,45 \wedge 0,84 \wedge 0,28 = 0,84. \quad (4.61)$$



x_3 – вологість сировини, %.

Рисунок 4.16 – **Функції належності для лінгвістичної змінної «вологість сировини»**

Таблиця 4.13 – **Значення і функції належності факторів, що впливають на величину Y – «конструкція біореактора»**

Фактор (U^*)	Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U^*	Значення функції належності змінної (Y)
u_1	2 у.о.	$\mu_{mp}(y_1) = 0,38$ $\mu_n(y_1) = 0,72$ $\mu_k(y_1) = 0,45$	$\mu_H(Y) = 0,84$ $\mu_{nC}(Y) = 0,63$ $\mu_C(Y) = 0,63$ $\mu_{BC}(Y) = 0,84$ $\mu_B(Y) = 0,84$
u_2	2,8 $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$	$\mu_n(y_2) = 0,26$ $\mu_n(y_2) = 0,63$ $\mu_6(y_2) = 0,84$	
u_3	1,5 у.о.	$\mu_n(y_3) = 0,84$ $\mu_n(y_3) = 0,58$ $\mu_6(y_3) = 0,28$	

Використовуючи аналітичні формули (4.28 – 4.32) та значення функції належності та змінних z_1, z_2, z_3 (табл. 4.14), отримаємо значення функції належності терм-оцінок змінної Z .

$$\mu_H(Z) = 0,56 \wedge 0,70 \wedge 0,76 \vee 0,56 \wedge 0,70 \wedge 0,4 = 0,70; \quad (4.62)$$

$$\begin{aligned} \mu_{HC}(Z) &= 0,56 \wedge 0,63 \wedge 0,76 \vee 0,82 \wedge 0,70 \wedge 0,76 \vee 0,82 \wedge 0,63 \wedge \\ &\wedge 0,76 = 0,76; \end{aligned} \quad (4.63)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(Z) &= 0,82 \wedge 0,63 \wedge 0,4 \vee 0,38 \wedge 0,63 \wedge 0,76 \vee 0,82 \wedge 0,34 \\ &\wedge 0,76 = 0,76; \end{aligned} \quad (4.64)$$

$$\begin{aligned} \mu_{6C}(Z) &= 0,82 \wedge 0,63 \wedge 0,4 \vee 0,82 \wedge 0,34 \wedge 0,4 \vee 0,38 \wedge 0,63 \wedge \\ &\wedge 0,4 = 0,63; \end{aligned} \quad (4.65)$$

$$\mu_B(Z) = 0,38 \wedge 0,56 \wedge 0,76 \vee 0,38 \wedge 0,34 \wedge 0,4 = 0,38. \quad (4.66)$$

Таблиця 4.14 – Значення і функції належності факторів, що впливають на величину Z – «стабільність режиму»

Фактор (U^*)	Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U^*	Значення функції належності змінної (X)
z_1	17 °C	$\mu_H(z_1) = 0,38$ $\mu_3(z_1) = 0,82$ $\mu_6(z_1) = 0,56$	$\mu_H(Z) = 0,70$ $\mu_{HC}(Z) = 0,76$ $\mu_C(Z) = 0,76$ $\mu_{6C}(Z) = 0,63$ $\mu_B(Z) = 0,38$
z_2	K= 2,5	$\mu_H(z_2) = 0,70$ $\mu_C(z_2) = 0,63$ $\mu_6(z_2) = 0,34$	
z_3	1,4 у.о.	$\mu_{mp}(z_3) = 0,76$ $\mu_{6m}(z_3) = 0,4$	

Визначимо значення функції належності терм-оцінок функції $L_{вих}$, використовуючи рівняння (4.18–4.22)

$$\mu_H(L_{вих}) = 0,4 \wedge 0,84 \wedge 0,70 \vee 0,48 \wedge 0,63 \wedge 0,76 = 0,70; \quad (4.67)$$

$$\begin{aligned} \mu_{HC}(L_{вих}) &= 0,4 \wedge 0,84 \wedge 0,70 \vee 0,48 \wedge 0,63 \wedge 0,76 \vee 0,63 \wedge 0,63 \wedge \\ &\wedge 0,76 = 0,76; \end{aligned} \quad (4.68)$$

$$\mu_C(L_{\text{вих}}) = 0,48 \wedge 0,63 \wedge 0,76 \vee 0,63 \wedge 0,63 \wedge 0,76 \vee 0,4 \wedge 0,84 \wedge 0,63 = 0,76; \quad (4.69)$$

$$\mu_{6C}(L_{\text{вих}}) = 0,63 \wedge 0,63 \wedge 0,76 \vee 0,4 \wedge 0,84 \wedge 0,63 \vee 0,4 \wedge 0,84 \wedge 0,38 = 0,76; \quad (4.70)$$

$$\mu_B(L_{\text{вих}}) = 0,4 \wedge 0,84 \wedge 0,63 \vee 0,4 \wedge 0,84 \wedge 0,38 = 0,84. \quad (4.71)$$

Для цього прикладу за умови, що нижня і верхня межа вихідної величини продуктивності біогазового реактора складають $\underline{Q} = 1,6 \text{ м}^3/\text{доб.}$, $\overline{Q} = 8 \text{ м}^3/\text{доб.}$, проведено дефазифікацію за формулою (2.38)

$$Q = \frac{1,6 \cdot 0,7 + 3,2 \cdot 0,76 + 4,8 \cdot 0,76 + 6,4 \cdot 0,76 + 8 \cdot 0,84}{0,7 + 0,76 + 0,76 + 0,76 + 0,84} = 4,92 \text{ м}^3/\text{доб.}$$

Модель нечіткого логічного висновку разом з процедурою дефазифікації забезпечує можливість спостереження за змінами вихідного показника – ступеня підвищення продуктивності біореактора залежно від кількісних і якісних факторів, що наведені вище. Використавши математичну модель в комплексі для всіх підрівнів та рівнів, можна отримати прогнозовану оцінку активуючого впливу наведенних факторів на продуктивність біореактора при утилізації органічних відходів сільськогосподарських підприємств.

Контрольні питання

1. Як можна здійснювати контроль за протіканням процесу бродіння?
2. Які параметри бродіння підлягають обов'язковому контролюванню?
3. Які основні способи очищення біогазу Ви знаєте?
4. Від чого очищають біогаз?
5. Як можна використовувати основні компоненти біогазу?
6. Наведіть принципову технологічну схему роботи БГУ.
7. Поясніть основні принципи моделювання роботи БГУ на базі теорії нечітких множин.
8. Що таке матриця знань і дерево логічного висновку?
9. Що таке процес дефазифікації?
10. Від чого залежить точність та адекватність математичної моделі біогазового реактора?
11. Для чого виконується моделювання роботи БГУ?

5 КОМПЛЕКСНЕ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧЕ ТЕПЛОХОЛОДОПОСТАЧАННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ

5.1 Сонячні установки для отримання гарячої води

Використання енергії сонця для отримання тепла дозволить економити енергетичні ресурси та зменшувати теплове навантаження на будинок завдяки зменшенню інсоляції на покрівлю будинку та відбору тепла на потреби господарства.

При передачі тепла від сонця до споживача енергія зазнає значних трансформацій. Випромінення електромагнітних хвиль сонцем здійснюється в діапазонах ультрафіолетових хвиль – довжина хвилі $\lambda = 0,02 \dots 0,4$ мкм, світлових хвиль – $\lambda = 0,4 \dots 0,8$ мкм, інфрачервоних хвиль $\lambda = 0,8 \dots 800$ мкм. Випромінення саме інфрачервоних хвиль має найбільший ефект трансформації енергії хвиль в тепло. Тверді тіла можуть мати спектр випромінення по всьому діапазону довжин хвиль, а гази випромінюють тільки в певних спектрах. На випромінення тіл суттєвий вплив має температура, і при зростанні нагріву тіла вище 650 °С переважним шляхом теплообміну є теплове випромінення. Найбільш інтенсивно даний вид теплопередачі проявляється у вакуумі чи в розріджених середовищах. Середовища, через які проходить променева енергія, по-різному поглинають і випромінюють енергію. Вуглекислий газ, пари води та інші триатомні гази пропускають випромінення тільки в вузькому діапазоні довжин хвиль, сухе повітря добре пропускає промені, але при збільшенні вологості повітря зростає його здатність до поглинання. Вибіркову проникність мають різні матеріали: віконне скло проникне для світлових променів, але майже непроникне для теплових і ультрафіолетових променів, кам'яна сіль непроникна для ультрафіолету, але проникна для інфрачервоного випромінення тощо. Німецький фізик Г. Кірхгоф встановив закономірність: в умовах термодинамічної рівноваги відношення здатності випромінення до здатності поглинання для всіх тіл однакове і дорівнює здатності випромінення абсолютно чорного тіла при тій же температурі. Абсолютно чорне тіло – це уявне тіло, що має здатність поглинати всі промені, що на нього потрапляють і випромінювати енергію в усьому діапазоні довжин хвиль з максимальною можливістю при даній температурі [13, 26, 28, 79, 87].

Сумарна енергія випромінення, що потрапляє на тіло, може повністю поглинатися даним тілом, повністю віддзеркалюватися або проходити крізь тіло без трансформації. В природі абсолютно білих або чорних тіл не

існує, тому реально відбуваються всі три процеси – поглинання, віддзеркалення і пропускання потоку. Відношення віддзеркаленої енергії до сумарного потоку називається віддзеркалюючою здатністю тіла R ; відношення поглинутої енергії до сумарного потоку називають поглинальною здатністю тіла A ; відношення пропущеної крізь тіло енергії до сумарного потоку називають пропускнуою здатністю тіла D . Під ступенем чорноти реального тіла ϵ мають на увазі відношення випромінюючої здатності тіла E до випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла E_0

$$\epsilon = E/E_0 \quad (5.1)$$

Тобто, ступінь чорноти тіла – це те ж саме, що і поглинальна здатність тіла A . На дану характеристику тіл суттєве значення має шорсткість поверхні і стан покриття поверхні тіла. Так, окислена мідь має $\epsilon = 0,7$, а ретельно відполірована поверхня мідної пластинки має $\epsilon = 0,02$. Необхідно розуміти, що видимий колір поверхні не дає уявлення про ступінь чорноти тіла, так, наприклад, папір білий і лак білий ($\epsilon = 0,8 \dots 0,9$) мають таку ж ступінь чорноти, як і чорний лак або сажа $\epsilon = 0,95$, хоча оком вони сприймаються як білі тіла. Це обумовлено тим, що біла за кольором поверхня добре віддзеркалює світлові промені, які є лише складовою всього діапазону випромінення, а інфрачервоні хвилі сприймаються поверхнею залежно від її шорсткості.

Сонце є невичерпним джерелом енергії, але використання його енергії безпосередньо в кліматичних умовах України потребує розробки необхідних режимів експлуатації та комплексного поєднання різних енергетичних джерел. Сучасні спостереження свідчать, що починаючи з листопада місяця і по квітень в Україні наявні пахмурні дні, кількість сонячних днів в останні роки скоротилося, і це пов'язано з глобальними змінами клімату. Літом, навпаки, зростає середня температура і кількість ясних днів достатня для виробництва енергії з випромінення сонця. Питоме інсоляційне навантаження залежить від широти місцевості, і в середньому складає: в субтропіках $210 \dots 250 \text{ Вт/м}^2$, в центрі Європи $130 \dots 210 \text{ Вт/м}^2$, на півночі Європи $80 \dots 130 \text{ Вт/м}^2$. Використання сонячної енергії в теплий період року доцільно виконувати за допомогою сонячних колекторів з подальшим транспортуванням теплоносія на потреби господарства (рис. 5.1 – 5.4).

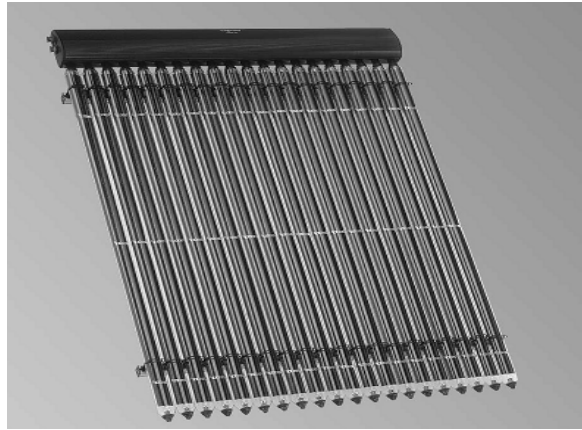
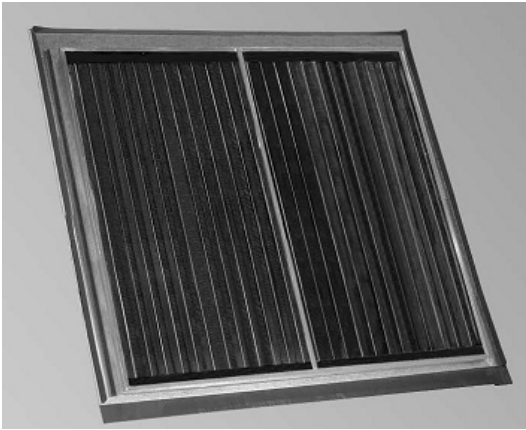


Рисунок 5.1 – Сонячні колектори Vitosol

Колектор сонячної енергії призначений для уловлювання променевої енергії, перетворення її в теплову і передачу проміжному теплоносію.

Робота колектора ґрунтується на законах оптики. На рис. 5.2 показано типову конструкцію колектора

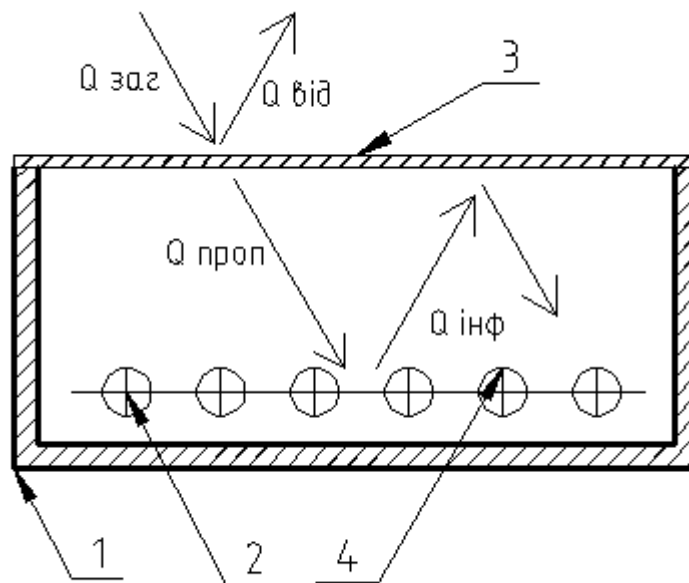


Рисунок 5.2 – Схема сонячного колектора: 1 – теплоізолюваний корпус колектора; 2 – трубки з нанесеним абсорбуючим покриттям, по яких циркулює теплоносій; 3 – панель, що пропускає сонячне випромінювання світлового діапазону (скляна або пластикова); 4 – світлопоглинальна поверхня (абсорбер).

Даний колектор працює таким чином. Сумарний світловий потік $Q_{заг}$ (прямий і розсіяний) потрапляє на поверхню панелі 3 і частка сонячної енергії світлового діапазону $Q_{проп}$ проникає у колектор, а промені інфрачервоного випромінення віддзеркалюються разом з іншою часткою світлових променів. Загальний віддзеркалений потік складає $Q_{від}$. Світлові промені потрапляють на поверхню абсорбера 5. Необхідно враховувати, що основна частина енергії сонця переноситься саме світловими променями, тому кількість тепла, що проходить у колектор $Q_{проп}$ буде визначатися як

$$Q_{проп} = D \cdot Q_{заг} , \quad (5.2)$$

де $Q_{заг}$ – сумарний тепловий потік, що переноситься випроміненням від сонця; D – пропускна здатність панелі. У випадку, коли пропускна здатність панелі невідома, можна скористатися аналогічною характеристикою – оптичним ККД панелі $\eta_{опт}$, значення яких наведено у табл. 5.1.

Сумарний тепловий потік $Q_{заг}$ визначається за рівнянням

$$Q_{заг} = q_{ins} \cdot F , \quad (5.3)$$

де q_{ins} – сумарний тепловий потік від сонячного випромінення (прямий і розсіяний) на поверхню колектора, кВт×год/м²;

F – площа теплосприймаючої поверхні колектора, м².

Значення q_{ins} для областей України можна взяти з додатка А.

Абсорбером називають сукупність пристроїв – променепоглинальних поверхонь і трубок, по яких протікає рідкий теплоносій. На абсорбері відбувається трансформація світлової енергії в теплову. За рахунок особливих властивостей абсорбера, що наноситься у вигляді надтонких плівок на поверхню трубок, світлові промені змінюють свою довжину перетворюючись на інфрачервоні. Певна частина енергії віддзеркалюється всередину колектора. Але віддзеркалення відбувається вже в інфрачервоному діапазоні, тому панель 1 для нього непроникна і колектор працює як сонячний «капкан» – запускає всередину енергію світлового діапазону і не випускає інфрачервоні промені. Поверхня абсорбера повинна мати високу поглинальну здатність відносно світлової енергії і низьку ступінь чорноти для інфрачервоного випромінення.

В практичних розрахунках питома теплотасвоєння сонячного колектора визначається за формулою

$$q = C_{кол} \cdot \Delta t, \quad (5.4)$$

де $C_{кол}$ – питома теплоємність колектора,

Δt – розрахунковий температурний градієнт (різниця між температурами вхідного і вихідного теплоносія).

В таблиці 5.1 наведено технічні характеристики сонячних колекторів Viessmann [87].

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики сонячних колекторів Vitosol 100

Технічні характеристики	Одиниця вимірювання	Тип	
		SV1	SH1
Площа брутто	м ²	2,51	2,51
Площа поглинача	м ²	2,30	2,30
Площа колектора	м ²	2,32	2,32
Розміри			
Ширина	мм	1056	2380
Висота	мм	2380	1056
Глибина	мм	90	90
Оптичний к.к.д, $\eta_{опт}$	%	81	81
Коефіцієнт теплових втрат k^1	Вт/(м ² · К)	3,48	3,48
Коефіцієнт теплових втрат k^2	Вт/(м ² · К)	0,0164	0,0164
Питома теплоємність колектора	кДж/(м ² · К)	6,4	6,4
Маса	кг	52	52
Обсяг рідини (теплоносія)	л	1,83	2,48
Припустимий робочий тиск	бар	6	
Максимальна температура в стані простою	°С	221	221
Підключення: діаметр трубопроводу	мм	22	22

Розрахунковий градієнт необхідно приймати відповідно до рекомендацій виготовлювача колекторів. Для колекторів Vitosol залежність між ККД колектора і температурним градієнтом наведено на рис. 5.3. Колектори втрачають тепло за рахунок конвекції, теплопровідності і випромінювання, що, відповідно, враховується коефіцієнтами теплових втрат k^1 і k^2 .

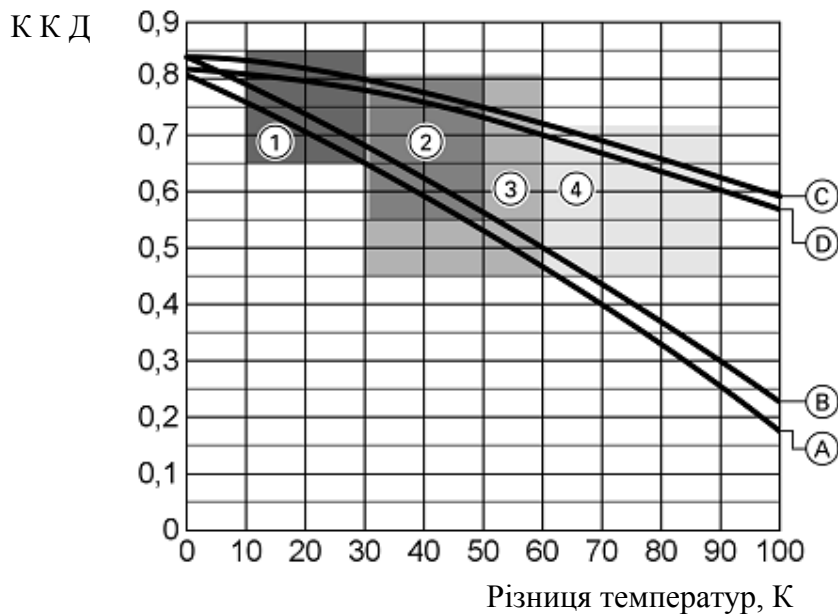


Рисунок 5.3 – Залежність ККД колектора від різниці температур
 А – Vitosol 100, тип SV1/SH1; В – Vitosol 100, тип 5DI; С – Vitosol 200;
 D – Vitosol 300

Характерні робочі діапазони:

1 – Геліоустановка для готування гарячої води при малій частці сонячної енергії; 2 – Геліоустановка для готування гарячої води при підвищеній частці сонячної енергії; 3 – Геліоустановка для готування гарячої води й підтримки опалення; 4 – Геліоустановка для технологічного тепла .

При монтажі колектора необхідно дотримуватися певних вимог: кут розташування колектора до горизонту повинен знаходитися в межах $25^{\circ} \dots 55^{\circ}$, відхилення орієнтації колектора від півдня допускається на захід або схід на кут не більше 45° .

Колектор повинен працювати з акумулятором тепла. Найчастіше таким акумулятором виступає ємнісний водонагрівник, де відбувається згладжування нерівномірності споживання тепла та його акумуляція. Схему обв'язки геліоколектора і акумулятора наведено на рис 5.3.

По абсорберу протікає теплоносій, який в процесі проходження крізь колектор нагрівається і переносить тепло до споживача. Кількість тепла, що переноситься, визначається за формулою

$$Q = G_t \cdot c \cdot (T_2 - T_1), \quad (5.5)$$

де G_t – масова витрата теплоносія, кг/с;

c – теплоємність теплоносія;

$(T_2 - T_1)$ – різниця між кінцевою і початковою температурою теплоносія, °С.

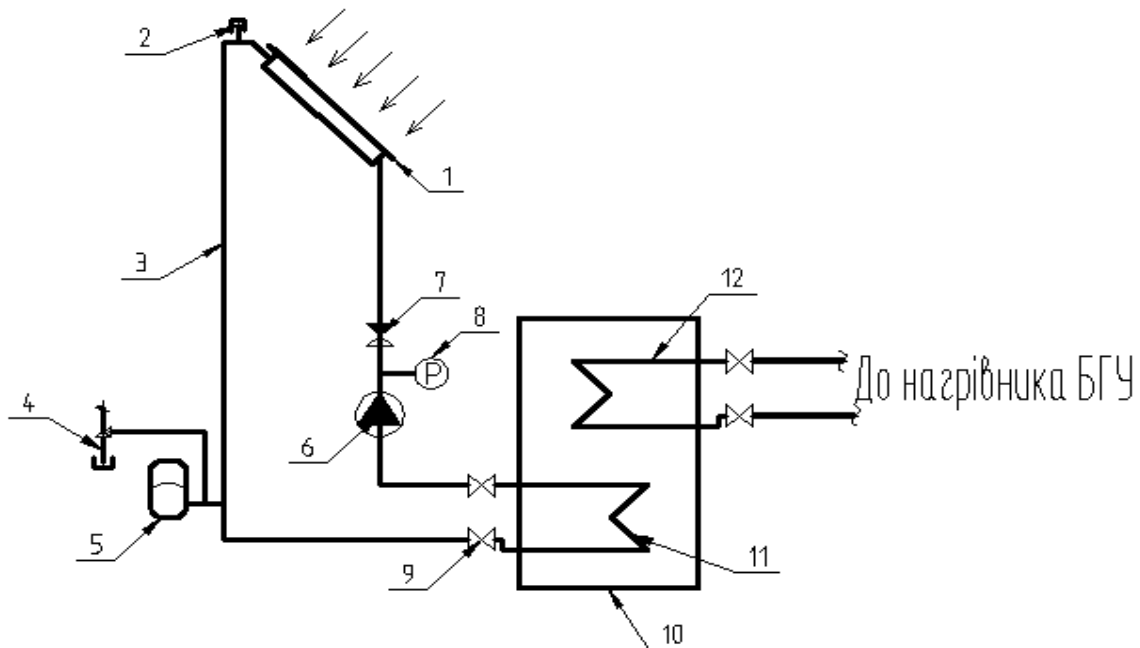


Рисунок 5.4 – **Обв’язка геліоколектора з акумулятором тепла:** 1 – сонячний колектор; 2 – автоматичний повітроспускник; 3 – ізольовані трубопроводи циркуляції теплоносія; 4 – запобіжний клапан; 5 – розширювальний бак; 6 – циркуляційний насос; 7 – зворотний клапан; 8 – термометр – манометр; 9 – запірно-регулювальна арматура; 10 – бойлер непрямого нагріву (акумулятор тепла); 11 – теплообмінник акумулятора тепла; 12 – теплообмінник, який відбирає тепло

Рекомендовано приймати мінімальну витрату в колекторі $25 \text{ л/г} \cdot \text{м}^2$, швидкості руху теплоносія в межах $0,4 \dots 0,7 \text{ м/с}$. При дотриманні даних вимог питомі втрати напору в системі циркуляції будуть знаходитися в межах $80 \dots 250 \text{ Па/м}$. Детальні значення необхідно брати з каталожних значень.

Акумулятори теплової енергії. Акумулювання викликане нерівномірністю надходження теплової енергії протягом доби. Максимальна сонячна активність припадає на обід, тоді як максимальний водорозбір відбувається вранці і ввечері. Акумулятори працюють за принципом циклічної роботи: зарядження акумулятора і його розрядка. Температура робочого середовища може набувати різних значень залежно від кінцевого споживача енергії: при повітряному опаленні $t_a \approx 30 \text{ }^\circ\text{C}$, при

гарячому водоспоживанні $t_a \approx 60$ °С, при опаленні $t_a \approx 80$ °С. Акумулятор – це ємність, середина якої заповнена теплоакумулюючими матеріалами: вода, камінь, повітря та інші. Енергоємність акумулятора – це кількість тепла, Дж, що поглинається акумулятором при його нагріві від температури t_1 до t_2 , °С

$$Q_{ак} = M_{ак} \cdot C_{ак} \cdot (t_2 - t_1), \quad (5.6)$$

де $M_{ак}$ – маса матеріалу акумулятора, кг;

$C_{ак}$ – теплоємність матеріалу акумулятора, Дж/(кг · К).

Таблиця 5.2 – Значення теплоємності матеріалів, що можуть використовуватися в теплоаккумуляторах

Матеріал	Теплоємність кДж/(кг× К).	Матеріал	Теплоємність кДж/(кг× К).
Базальт	0,84	Вода чиста (20°С)	4,182
Граніт	0,84..1,26	Вода чиста (80°С)	4,196
Цегла	0,84	Парафін рідкий	2,13
Мармур	0,80	Морська вода (18°С, 3% солі)	3,93
Щебінь	0,75...1,0	Парафін твердий	2,19

Відношення енергоємності акумулятора до його об'єму називається питомою енергоємністю, Дж/м³

$$q_v = \frac{Q_{ак}}{V}. \quad (5.7)$$

За конструкцією теплоаккумулятори поділяються на рідинні з твердою насадкою і з легкоплавким матеріалом-заповнювачем. Акумуляування відбувається рекуперативним шляхом – коли тепло передається через теплопровідну стінку без змішування заповнювача акумулятора і теплоносія, регенеративним шляхом – шляхом поступового нагріву і охолодження твердого теплоакумулюючого матеріалу, шляхом зміни фазового стану акумуляуючого матеріалу.

В акумуляторах, які заповнені твердими теплоакумулюючими матеріалами, зарядка відбувається шляхом проходження розпеченого повітря чи гарячої води наскрізь шари матеріалу. В процесі обміну теплом теплоносії охолоджується, а акумулятор заряджається. Розрядження акумулятора здійснюють зворотним шляхом – пропусканням холодного

повітря чи води через шар твердої насадки. В акумуляторах з легкоплавних матеріалів передача тепла здійснюється при нагріванні речовини і її плавленні. Енергоємність такого акумулятора визначається згідно з формулою

$$Q_{ак} = M_{ак} \cdot [C_{тв} \cdot (t_{пл} - t_1) + r + C_{рід} \cdot (t_2 - t_{пл})], \quad (5.8)$$

де $C_{тв}$ – теплоємність твердої речовини,

$C_{рід}$ – теплоємність рідкої речовини, Дж/ (кг · К);

r – теплота фазового переходу, Дж/кг.

Для парафіну $t_{іє} = 47^\circ\text{C}$, $r = 209$ кДж/кг. Акумулятори з легкоплавним матеріалом поглинають в 5...12 разів більше тепла, ніж акумулятор з речовиною, що не плавиться.

Акумулявання тепла дозволить використовувати цілодобову гарячу воду на потреби біогазового реактора: в літній час на підігрів субстрату калорифером, а в зимовий на розбавлення гарячою водою органічних відходів до досягнення необхідної вологості.

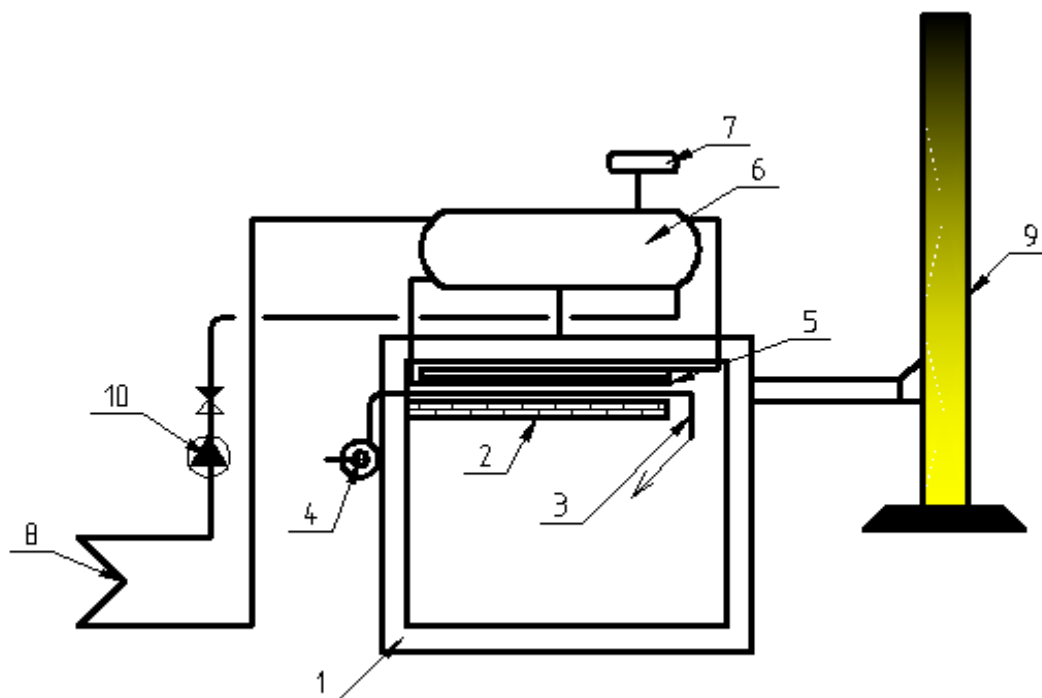
5.2 Комбіноване тепlopостачання з використанням біогазових установок і котлів, що працюють на соломі

В Україні кожен рік виробляється більше 25 млн. тонн соломи, четверта частина якої не використовується ні як корм, ні на інші потреби – тобто просто згниває на полях. Використання біогазових установок для переробки органічних відходів ферм і підгнившої соломи і котлів на соломі дозволить комплексно підійти до проблеми енергозбереження [68].

Використання котлів на соломі потребує необхідного запасу палива та догляду за процесом горіння. Солома має нижчі енергетичні показники порівняно з газом – теплоту згорання 16 МДж/т, але і набагато нижчу ціну. Так, станом на 2009 рік, середня ціна 1000 м³ газу складає 300 доларів, а ціна соломи 150 грн./тонна.

Розглянемо принципову схему котла, що працює на соломі (рис. 5.5). Котел працює таким чином: тюк соломи завантажується у топку котла і підпалюється. Кількість повітря на горіння соломи регулюється дуттьовим вентилятором 4, що має частотне регулювання і керується системою автоматики. Шляхом рівномірної подачі повітря через повітропровід 3 відбувається рівномірне горіння. Вода в баку-акумуляторі 6 нагрівається за

рахунок нагріву в теплообміннику 5, який захищений від відкритого полум'я шаром вогнетривкої цегли 2. Вода циркулює природним шляхом



або примусово.

Рисунок 5.5 – **Котел, що працює на соломі:** 1 – корпус котла; 2 – шар вогнетривкої цегли; 3 – повітропровід; 4 – дуттьовий вентилятор; 5 – циркуляційні трубопроводи малого контуру циркуляції; 6 – бак-акумулятор, 7 – розширювальний бак, 8 – теплообмінник споживачів теплової енергії; 9 – димова труба, 10 – циркуляційний насос контуру тепlopостачання.

Об'єм бака попередньо приймають з розрахунку 70 літрів на 1 кг соломи, що вноситься в котел. Циркуляційний насос відкачує гарячу воду з бака і подає її на розподільний колектор теплового пункту, де відбувається відбір теплової енергії на потреби господарства. Горіння тюків відбувається протягом 4...5 годин. Підключення котла без бака-акумулятора не рекомендується, оскільки при цьому важко регулювати потужність котла. При відсутності в системі бака-акумулятора об'єм води в системі тепlopостачання (л) повинен складати не менше 4-кратної потужності котла в кВт.

Підключення котла може здійснюватися чотирма основними шляхами:

- безпосереднє підключення котла в систему з баком-акумулятором (рис 5.6);
- без бака-акумулятора з безпосереднім приєднанням котла до системи тепlopостачання;
- з незалежним підключенням через теплообмінник (рис. 5.7);
- з каскадним підключенням котла на соломі і (біо)газового котла.

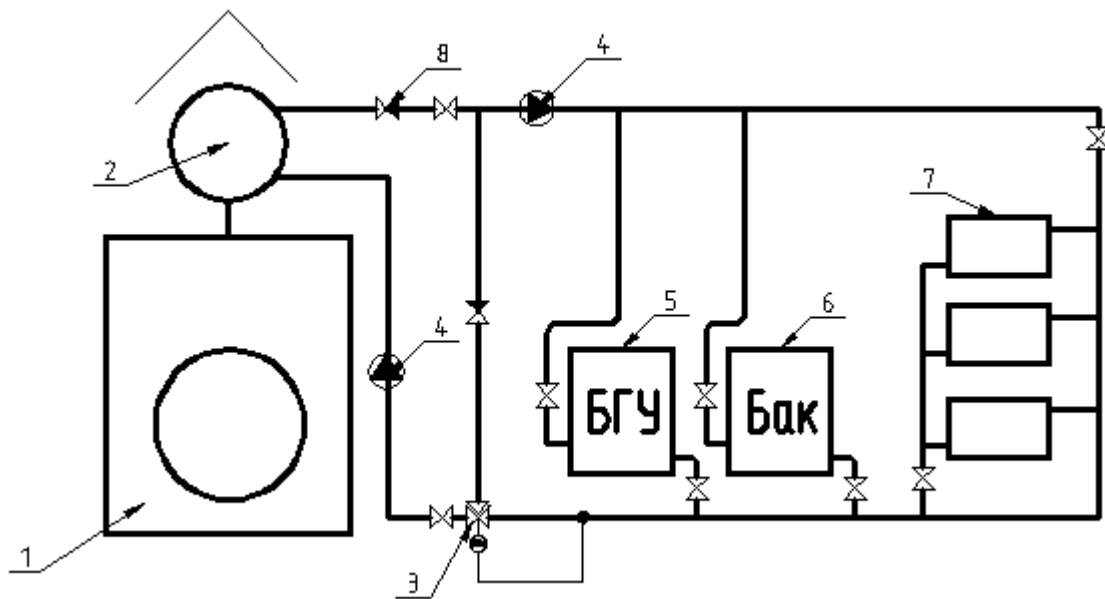


Рисунок 5.6 – Комплексна робота котла на соломі і БГУ

Комплексна робота котла на соломі і БГУ (рис. 5.6) відбувається таким чином: котел 1, що працює на соломі, виробляє теплову енергію, що акумулюється в баці 2 і відбирається звідти циркуляційним насосом 4 малого контуру через систему трубопроводів. У зв'язку з безпосереднім підключенням котла в систему тепlopостачання виникає необхідність регуляції температури теплоносія для задоволення потреб всіх споживачів. Біогазовий реактор 5 споживає теплоносій з температурою не вище 60 °С, тому регулювання температури відбувається шляхом відкриття триходового клапана на роботу по байпасній лінії і підмішування зворотного теплоносія у подавальну магістраль. Триходовий клапан регулюється залежно від температури зворотного теплоносія, яка відслідковується сенсором клапана. Сенсор поєднаний з клапаном гідроімпульсною лінією. Акумуляція теплової енергії здійснюється баком-

аккумулятором 6. Також тепло використовується на систему калориферів вентиляції або підлогового опалення 7. Дана система проста в виконанні і недорога, але має недолік – всі споживачі отримують теплоносій однієї температури. Дану проблему дозволяє вирішити схема підключення з незалежною циркуляцією теплоносіїв (рис. 5.7).

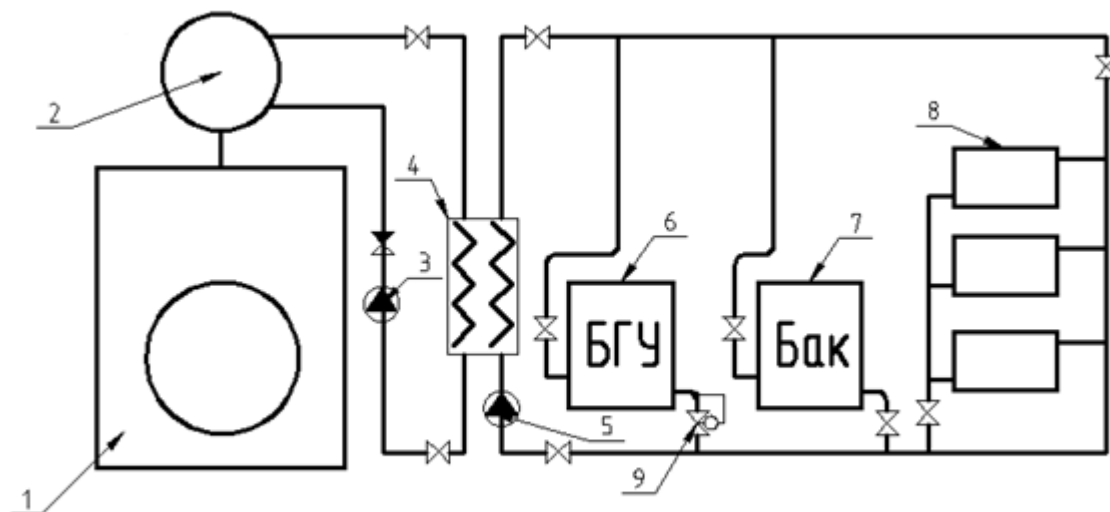


Рисунок 5.7 – **Незалежне під'єднання котла, що працює на соломі, до споживачів:** 1 – котел, що працює на соломі; 2 – бак-аккумулятор; 3 – циркуляційний насос котлового контуру; 4 – теплообмінник; 5 – циркуляційний насос системи тепlopостачання; 6 – біогазовий реактор; 7 – бак-аккумулятор; 8 – споживачі теплової енергії

Робота системи тепlopостачання відбувається таким чином. Котел 1 генерує високотемпературний теплоносій, який транспортується по системах трубопроводів насосом 3. Насос передає тепло вторинному теплоносію в теплообміннику 4. Схема течії теплоносіїв – протитокова. Залежно від підбору теплообмінника визначається і температура у вторинному кільці циркуляції. Циркуляційний насос 5 підбирається за умов забезпечення необхідної витрати і компенсації втрат тиску в системі. Розділення гідравлічних контурів дозволяє використовувати різні за якістю теплоносії, зменшувати кількість незамерзаючої рідини, запобігти витіканню всього теплоносія. Роботу біогазового реактора можна організувати шляхом встановлення на зворотному трубопроводі температурного обмежувача потоку. Даний пристрій дозволяє підтримувати зворотну температуру теплоносія на рівні 40 °С, таким чином не перевищуючи верхньої межі подачі в 60 °С. Всі інші споживачі

працюють в режимі підвищених температур теплоносія, наприклад, 80°C подачі і 60°C зворотного теплоносія.

В схемах на рис 5.6 і рис 5.7 регулювання гідравлічних режимів відбувається клапанами з імпульсними лініями, для яких не потрібно електричної енергії і контролерів, що робить дані схеми відносно недорогими. Обмеження на використання клапанів з імпульсними лініями накладається лише максимальним типорозміром виробника.

5.3 Теплонасосні установки для комбінованого виробництва тепла і холоду в приватному господарстві

Теплонасосні установки використовують низькопотенційну енергію навколишнього середовища за рахунок термодинамічних перетворень за циклом Карно підвищують енергетичний потенціал основного теплоносія до більш високого рівня, витрачаючи при цьому в 2...4,8 раза менше енергії. Теплонасосні установки (ТНУ) використовують енергію повітря, води чи ґрунту і передають її з більшим потенціалом за допомогою низькотемпературних рідин – фреонів, аміаку, азоту тощо. Використання ТНУ в системах тепlopостачання – важлива складова енергозбереження. При цьому зменшуються викиди шкідливих газів у атмосферу, зменшується витрата палива на отримання 1 кВт теплової енергії. Теплонасосні установки доцільно використовувати разом з іншими джерелами тепла.

Теплові насоси працюють в широкому діапазоні температур. Особливо вигідним є використання у сільському господарстві теплових насосів при одночасному виробництві тепла і холоду – скидне тепло використовується на нагрів біомаси в реакторі, а холод – на функціонування холодильних камер для збереження продукції господарства.

Розглянемо роботу теплового насосу (рис 5.8), що працює на фреоні R22 і має такі характеристики: витрата холодоагента $G=0,06$ кг/с, температура кипіння фреону у випарнику $T_0 = 3^\circ\text{C}$, температура конденсації парів фреону у конденсаторі $T_k = 55^\circ\text{C}$. В якості джерела тепла приймемо ґрунтовий колектор, що відбирає тепло із землі і постачає теплоносій (воду) з температурою $t'_h = 8^\circ\text{C}$, температура високопотенційного теплоносія $t''_b = 50^\circ\text{C}$. Температурний перепад в конденсаторі $\Delta t = 15^\circ\text{C}$, потужність, що споживається компресором

$N_e = 3,5$ кВт, тепловидатність теплового насоса $Q_{th} = 15,7$ кВт, коефіцієнт перетворення $\mu = 4,5$.

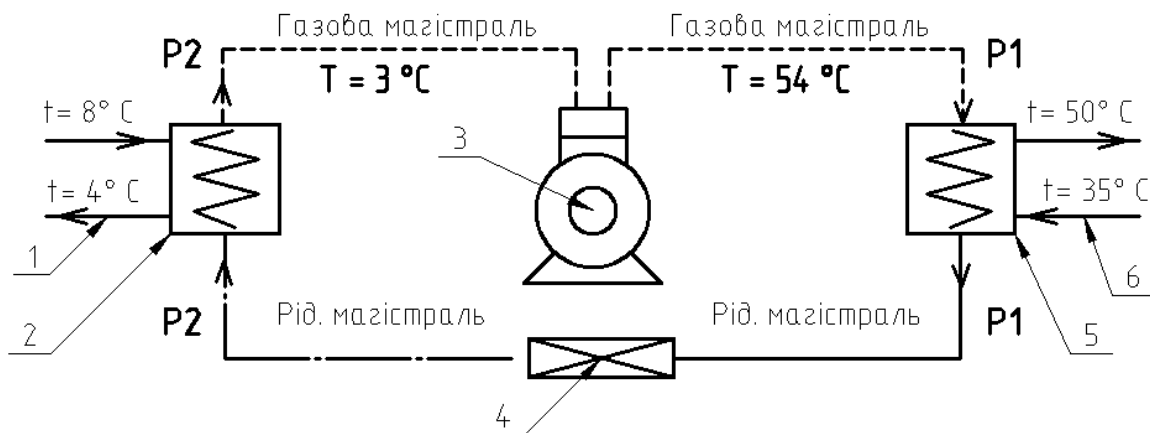


Рисунок 5.8 – Принципова схема роботи теплових насосів для виробництва гарячої води і опалення: 1 – зворотний трубопровід ґрунтового колектора; 2 – випарник; 3 – компресор; 4 – терморегулювальний вентиль, 5 – конденсатор, 6 – зворотний трубопровід системи теплопостачання

В корпус випарника 2 надходить тепла енергія низького потенціалу з середньою температурою $t_n' = 8^\circ\text{C}$ від ґрунтового колектора. Відбір теплової енергії залежить від виду ґрунту і в середньому складає:

- для сухого піщаного $q_e = 10 \dots 15$ Вт/м²;
- для вологого піщаного $q_e = 15 \dots 20$ Вт/м²;
- для сухого глинистого $q_e = 20 \dots 25$ Вт/м²;
- для вологого глинистого $q_e = 25 \dots 30$ Вт/м²;
- з ґрунтовими водами $q_e = 30 \dots 35$ Вт/м².

Колектори виготовляються з поліетиленових труб діаметрами 20...40 мм максимальною довжиною 100 м.

По випарнику 5 протікає зріджений холодоагент R22, який має знижений тиск P_2 і температуру $T_0 = 3^\circ\text{C}$.

Холодоагент, підігріваючись теплом води низького потенціалу, починає випаровуватися, охолоджуючи при цьому воду до температури $t = 4^\circ\text{C}$. Компресор 1 всмоктує з випарника насичені пари і стискає їх до тиску P_1 . При цьому зростає ентальпія і температура пари до $t = 54^\circ\text{C}$. Робота, що витрачається, дорівнює зміні ентальпії $A = \Delta i$, кДж/кг. Пара при температурі конденсації надходить в теплообмінник, де передає своє тепло іншому теплоносію, після чого пара конденсується при незмінному

тиску P1. В дросельному терморегулювальному клапані 4 відбувається зниження тиску рідини від P1 до P2. Рідкий холодильний агент частково випаровується і утворюється парорідинна суміш. При дроселюванні ентальпія пари залишається незмінною, а температура знижується до $T_0 = 3^\circ\text{C}$. Парорідинна суміш надходить на випарник, де процес повторюється. Для запобігання попадання рідини у компресор і його пошкодження у випарнику роблять додаткову ділянку перегріву для того, щоб вся рідина випарувалася.

Основні характеристики теплових насосів **Vitocal** наведено в табл. 5.3.



Рисунок 5.9 – Водо-водні теплові насоси Viessmann

Кількість тепла, що було відібрано від низькопотенційного джерела, визначається як

$$q_{\text{вин}} = r \cdot (x_1 - x_0), \quad (5.10)$$

де x_1 – ступінь сухості парів холодоагента після випарника ($x_1 \approx 1$);

x_0 – ступінь сухості парів після дроселювання ($x_0 \approx 0,05$);

r – теплота пароутворення, кДж/кг.

Холодильний коефіцієнт даного циклу

$$\varepsilon = \frac{q_{\text{вин}}}{A} = \frac{T_0}{T_k - T_0} = \frac{276}{(327 - 276)} = 5,4, \quad (5.11)$$

де A – робота стиснення, кДж/кг;

T_0 – температура випаровування, К;

T_k – температура конденсації, К.

Мірою енергетичної ефективності теплового насосу слугує коефіцієнт перетворення енергії $\mu_{тн}$, що характеризує відношення відданої споживачу енергії до витраченої потужності. Для ідеального циклу коефіцієнт трансформації визначається згідно з рівнянням

$$\mu_{тн} = q_{конд} / A = T_k / (T_k - T_0) = 327 / (327 - 276) = 6,4, \quad (5.12)$$

де $q_{конд}$ – теплота конденсації парів, кДж/кг;

A – робота стиснення, кДж/кг;

T_0 – температура випаровування, К;

T_k – температура конденсації, К.

В реальних умовах необхідно враховувати різноманітні втрати, тому коефіцієнти трансформації будуть становити 2,5...8. При таких значеннях використання теплових насосів вигідніше, ніж безпосереднє отримання енергії шляхом спалювання палива. Роботу теплового насоса на споживачів показано на рис. 5.10.

Кількість переданої споживачам корисної теплоти залежить від витрати теплоносія G_k , кг/с, ізобарної теплоємності теплоносія c_k , кДж/(кг · К) і температурного градієнта Δt , °С. Таким чином, при нагріванні води

$$Q_k = G_k \cdot c_k \cdot \Delta t, \text{ кВт} . \quad (5.13)$$

При використанні як джерела механічного руху газового двигуна, що працює на очищеному біогазі, загальний коефіцієнт перетворення енергії зростає ще приблизно у 1,5 раза за рахунок утилізації теплоти викидних газів газового двигуна.

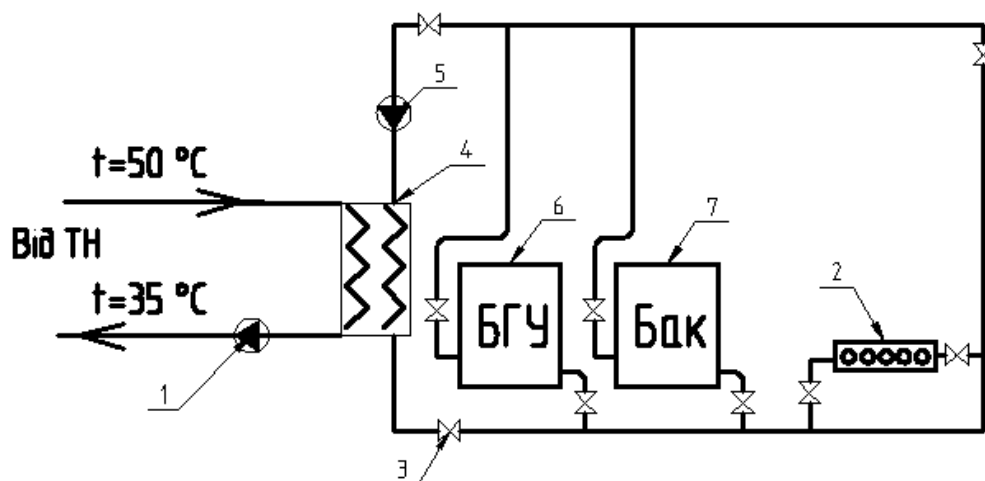


Рисунок 5.10 – **Робота теплового насоса для тепlopостачання БГУ:**
1 – циркуляційний насос контуру теплового насоса; 2 – споживач низькотемпературного теплоносія (тепла підлога); 3 – запірна арматура; 4 – пластинчастий теплообмінник; 5 – циркуляційний насос контуру тепlopостачання; 6 – біогазовий реактор; 7 – бак-акумулятор

При одночасному отриманні холоду і тепла рекомендовано використовувати чіллери з гарячим водопостачанням (рис. 5.11). Даний пристрій дозволяє виробляти і транспортувати холодну воду на потреби холодильних камер для зберігання сільськогосподарської продукції, а скидне тепло направляти на підігрів субстрату у біореакторі. Температура гарячої води, що виходить з чіллера, не перевищує 50 °С, що задовольняє вимоги до теплоносіїв БГУ.



Рисунок

5.11 –

Чіллер RUUD з тепловим насосом та виробництвом гарячої води

Чіллери – це холодильні машини, які дозволяють отримувати холодну воду (зазвичай 12/7 °С) і використовувати її як носій холоду на потреби господарства: для охолодження холодильних камер, для кондиціонування, на технологічні потреби охолодження молока тощо. Скидне тепло передається повітрю, який омиває конденсатор чіллера. Окрім повітряного охолодження, існують водяні конденсатори або комбіновані – скидне тепло підігріває воду і повітря.

Таблиця 5.3 – Основні технічні характеристики теплових насосів типу вода-вода Vitocal 300 [87]

Vitocal 300 (одноступінчастий)	тип	BW 104	BW 106	BW 108	BW 110
Номінальна теплова	кВт	4,8	6,4	8,3	10,8
Холодопродуктивність	кВт	3,7	5,0	6,5	8,4
Споживана електрична потужність	кВт	1,1	1,4	1,8	2,4
Коефіцієнт потужності		4,36	4,57	4,61	4,50
Ропний контур					
Об'єм	л	1,7	2,3	2,8	3,7
Мінімальна витрата	л/год	1150	1600	2100	2700
Гідродинамічний опір	мбар	90	90	90	90
Макс. температура на вході	°С	25	25	25	25
Мін. температура на вході	°С	-5	-5	-5	-5
Контур вторинний					
Об'єм	л	1,6	1,6	2,2	2,7
Мінімальна витрата	л/год	420	530	700	950
Гідродинамічний опір	мбар	40	40	40	40
Макс. температура подаючої магістралі	°С	55	55	55	55
Загальна довжина	мм	650	650	650	650
Загальна ширина	мм	600	600	600	600
Загальна висота	мм	945	945	945	945
Допустимий робочий тиск					
Ропний контур	бар	4	4	4	4
Вторинний контур	бар	4	4	4	4
Підключення					
вхід і вихід первинного	R	1	1	1	1¼
Патрубки магістралей опалювального	R	1	1	1	1
Маса	кг	105	110	120	140

На рис. 5.12 показано принципову схему обв'язки чіллера для роботи на біогазову установку: 1 – чіллер, 2 – гнучка вставка, 3 – трубопроводи циркуляції теплої води, 4 – група безпеки, 5 – розширювальний бак, 6 – циркуляційний насос, 7 – зворотний клапан, 8 – термометр-манометр, 9 – запірна арматура, 10 – бак-акумулятор, 11 – теплообмінник первинний, 12 – теплообмінник вторинний, 13 – автоматичний повітряник. Акумулятор тепла призначений для нівелювання піків споживання і виробництва тепла.

Таблиця 5.4 – Технічні характеристики чіллерів RUUD

МОДЕЛЬ		SSQ50R4RNAZ	SSQ66R4RNAZ	SSQ50R2RNA
Потужність охолодження, кВт		50,0	66,0	66,0
Потужність нагрівання, кВт		54,0	70,0	70,0
Електроживлення		380/3/50		
Споживана потужність, кВт		18,6	21,9	21,9
Холодоагент		R122або407C		
Компресор	Тип	скрол		
	Кількість	4	4	2
Двигун	Тип	Осьовий		
	Кількість	4	2	2
	Номінальна потужність, кВт	0,25x4	0,75x2	0,75x2
	Розташування	Верхнє		
Конденсатор	Тип	Алюмінієве оребрення + теплообмінник із червоної міді		
	Потік води	2.52	3.15	
	Трубопровід	4"		
Пристрій для конденсації		Капілярні трубки		Дросель (ТРВ)
Розміри	Ширина, мм	1380	2010	2010
	Довжина, мм	1380	1100	980
	Висота, мм	1660	1850	1850
Вага, нетто, кг		530	660	680

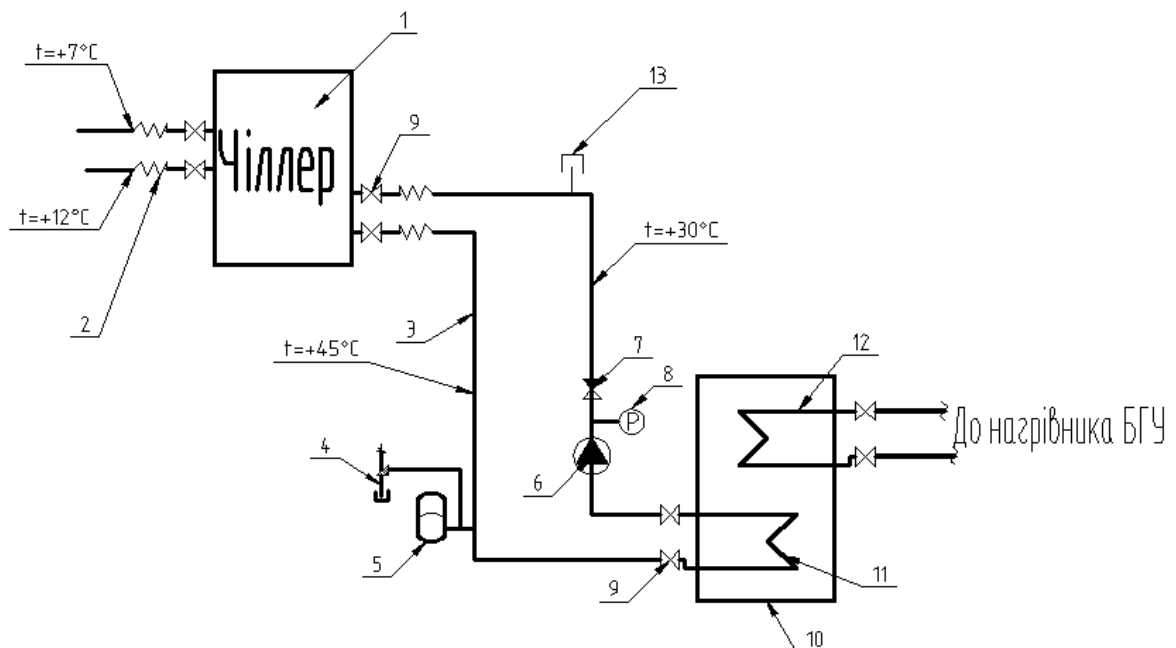


Рисунок 5.12 – Обв'язка чіллера з транспортуванням скидного тепла на потреби БГУ

При використанні чіллерів і теплових насосів виникає необхідність у спеціальних домішках до теплоносія з метою запобігання його замерзання. Як домішки зараз використовують розчини етиленгліколя і пропіленгліколя. Необхідно пам'ятати, що введення незамерзаючих рідин змінює в'язкість теплоносія і зростають гідравлічні втрати при його циркуляції. В таблиці 5.5 наведено основні характеристики етиленгліколевої суміші з водою.

Таблиця 5.5 – Основні характеристики етиленгліколевої суміші з водою

Параметр	Масова частка етиленгліколя, %			
	10	20	30	40
Нижня границя робочої температури, °С	1	-4	-10	-19
Температура кристалізації, °С	-4,4	-9,4	-15,6	-24,4
Відносні втрати тиску в системі опалення	1,050	1,120	1,180	1,240
Відносні втрати тиску в системі охолодження	1,029	1,152	1,130	1,481

5.4 Приклад розрахунку теплового насоса

Вихідні дані: двоповерховий утеплений житловий будинок загальною площею 100 м², в якому проживає сім'я з 4-х чоловік. Розрахункові тепловтрати будинку складають 6 кВт. Будинок обладнано припливно-витяжною вентиляцією продуктивністю $L = 200 \text{ м}^3/\text{год}$. Біля будинку ґрунт глинистий. Для розрахунку теплового насоса скористаємося методикою, наведеною у [86].

5.4.1 Розрахунок теплового навантаження

Окрім витрати тепла на опалення будинку, тепловий насос повинен генерувати тепло на гаряче водопостачання (ГВП). В житловому будівництві орієнтуються на максимальну витрату гарячої води в кількості близько 50 л/добу на людину при температурі 45°С. Це відповідає додатковому теплоспоживанню приблизно 0,25 кВт на людину при періоді нагріву 8 години.

Таблиця 5.6 – Додаткове теплове навантаження на виробництво гарячої води

Споживання	Витрата гарячої води при температурі води 45°C л/добу на людину	Надбавка, що рекомендується, до теплоспоживання на приготування гарячої води кВт·год/люд
Низьке споживання	15-30	0,08-0,15
Нормальне споживання	30-60	0,15-0,30

Тобто додаткове навантаження на ГВП $Q_{звн}$ складе, кВт

$$Q_{звн} = N \cdot q = 4 \cdot 0,25 = 2, \quad (5.14)$$

де N – кількість жителів у будинку, люд;

q – питоме додаткове теплове навантаження, кВт/люд.

Витрата тепла на вентиляцію Q_{vent} , Вт визначиться за формулою

$$Q_{vent} = \frac{L}{3600} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_p - t_z), \quad (5.15)$$

де L – об'ємна продуктивність системи вентиляції, м³/год;

ρ – густина повітря, кг/м³;

c – ізобарна теплоємність повітря, Дж/кг °С

$$Q_{vent} = \frac{200}{3600} \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot (20 + 21) = 2730 \text{ Вт.}$$

Загальна споживана потужність будинком складе: 6+2+2,7 = 10,7 кВт.

5.4.2. Розрахунок джерела тепла

Варіант А – площадковий колектор

Теплофізичні характеристики верхнього шару ґрунту сильно залежать від складу і стану ґрунту. Теплоакумулювальні властивості ґрунту тим кращі, чим більше він містить у своєму складі води і мінеральних елементів. Загальний питомий відбір потужності від ґрунту складає від 10 до 35 Вт/м².

Таблиця 5.7 – Питомий відбір потужності від ґрунту

Сухий піщаний ґрунт	$q = 10-15 \text{ Вт/м}^2$
Вологий піщаний ґрунт	$q = 15-20 \text{ Вт/м}^2$
Сухий глинистий ґрунт	$q = 20-25 \text{ Вт/м}^2$
Вологий глинистий ґрунт	$q = 25-30 \text{ Вт/м}^2$
ґрунт з ґрунтовими водами	$q = 30-35 \text{ Вт/м}^2$

Необхідна площа ділянки ґрунту визначається залежно від холодопродуктивності Q_x теплового насоса, яка визначається з паспортних даних теплового насоса, або як різниця теплопродуктивності Q_t насоса і його споживаної потужності N

$$Q_x = Q_t - N. \quad (5.16)$$

Тоді необхідна площа ґрунту

$$F = Q_x / q. \quad (5.17)$$

Для обчисленого теплового навантаження обираємо тепловий насос Viessmann Vitocal 200 BWP 110 теплопродуктивністю $Q_t = 9,7$ кВт, холодопродуктивністю $Q_x = 7,5$ кВт. Встановлення теплового насоса більшої продуктивності не доцільне, тому що при виборі теплового насоса необхідно враховувати і нерівномірність споживання тепла. Обраний тепловий насос споживає 2,2 кВт електричної енергії. Необхідна площа ділянки ґрунту складе, м²

$$F = 7500 / 25 = 300.$$

Варіант Б – Буріння шурфів і влаштування зондів

Для невеликих земельних ділянок земляні зондовий комплекс є альтернативою земляному колектору (рис. 5.13) Нижче розглядається подвійний U – подібний трубчастий зонд. Іншим варіантом є дві подвійних U – подібних петлі полімерного трубопроводу в одній свердловині. Всі проміжки між трубами і ґрунтом заповнюються матеріалом з хорошою теплопровідністю.

Рекомендована мінімальна відстань між двома ґрунтовими зондами:

- 5 м до 50 м глибини свердловини;
- 6 м до 100 м глибини свердловини.

В табл. 5.8 наведено значення питомого відбору потужності подвійним U-подібним ґрунтовим зондом.

Таблиця 5.8 – Питомий відбір теплової потужності подвійним зондом з поліетиленової труби Ø 32 мм.

Грунт	Питомий відбір потужності q_z
Загальні нормативні показники	
Поганий ґрунт (суха осадова порода) ($\lambda < 1,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$)	20 Вт/м
Нормальна тверда кам'яна порода і насичена водою осадова порода ($\lambda < 1,5-3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$)	50 Вт/м
Тверда кам'яна порода з високою теплопровідністю ($\lambda < 3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$)	70 Вт/м
Окремі породи	
Галька, пісок (сухий)	<20 Вт/м
Галька, пісок (вологий)	55-65 Вт/м
Суглинок, глина (волога)	30-40 Вт/м
Вапняк (масивний)	45-60 Вт/м
Піщаник	55-65 Вт/м
Кислі магматичні породи (граніт)	55-70 Вт/м
Основні магматичні породи (базальт)	35-55 Вт/м
Гнейс	60-70 Вт/м

Визначимо загальну довжину подвійних зондів, що потрібні для відбору тепла, м

$$L = \frac{Q_x}{q_z} = 7500 / 50 = 150, \quad (5.18)$$

де q_z – питомий відбір потужності зондом.

Згідно з рекомендаціями [86] довжина зондів і колекторів не повинна перевищувати 100 м. Тому остаточно приймаємо два подвійних ґрунтових зонди по 75 м.

На рис. 5.13 зображено принципову схему подвійного ґрунтового зонда.

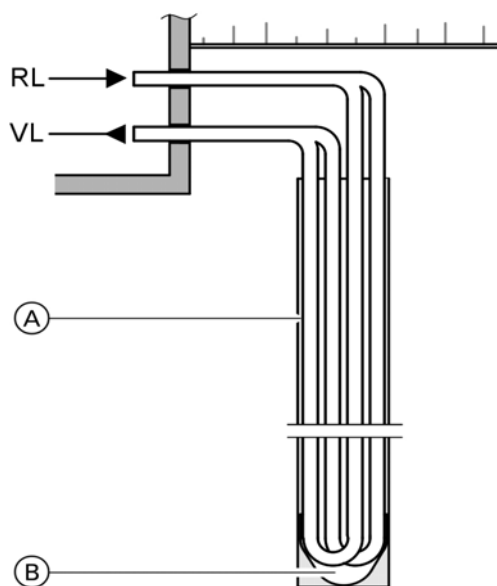


Рисунок 5.13 – Принципова схема подвійного ґрунтового зонда

RL – зворотна магістраль контуру розсолу;

VL – подаюча магістраль контуру розсолу;

A – заповнювач шурфа;

B – захисний ковпачок.

Остаточно, для влаштування ґрунтового зонду знадобиться $75 \times 2 \times 2 = 300$ м поліетиленової труби.

Характеристики поліетиленової труби наведено в таблиці 2.

Таблиця 5.9 – Характеристики поліетиленової труби, PN10

Зовнішній діаметр × товщина стінки, мм	Номінальний діаметр	Об'єм погонного метра труби, л	Площа зовнішньої бічної поверхні труби, м ²
20×2,0	15	0,201	0,0628
25×2,3	20	0,327	0,0785
32×3,0	25	0,531	0,100
40×2,3	32	0,984	0,126
40×3,7	32	0,835	0,126
50×2,9	40	1,595	0,157
50×4,6	40	1,308	0,157
63×5,8	50	2,070	0,197
63×3,6	50	2,445	0,197

Визначимо, скільки поліетиленової труби $\varnothing 32$ знадобиться для влаштування ґрунтового колектора. Глибина закладання колектора повинна становити 1,3...1,7 м. Відстань між траншеями не менше 0,5...1 м. Згідно з [86] питоме співвідношення f для труб складе:

- 1,5 м. п. на 1 м² ґрунту для діаметра 32 мм;
- 2 м. п. на 1 м² ґрунту для діаметра 25 мм;
- 3 м. п. на 1 м² ґрунту для діаметра 20 мм.

Тоді загальна кількість труби для колектора складе, м:

$$L = F \cdot f = 300 \cdot 1,5 = 450 .$$

Приймаємо до встановлення п'ять трубних колекторів довжиною по 100 м. Об'єм системи при цьому складе $0,531 \times 500 = 266$ л. Додамо 10% на об'єм розподільника і системи обв'язки, остаточно отримуємо об'єм системи 300 л. В ґрунтовий колектор обов'язково необхідно заливати незамерзаючі розчини на основі пропіленгліколю, тоді як більш дешевші розчини на основі етиленгліколю (тосол та інші) є ядовитими. Властивості водневого розчину пропіленгліколю наведено в табл. 5.9.

При виборі концентрації розчину необхідно ґрунтуватися на температурі кипіння фреону у випарнику. Зазвичай температура кипіння складає мінус 5 °С. Температура замерзання розчину залежить від вмісту гліколю і складає, при вмісті пропіленгліколю:

- 10% – мінус 3,5 °С;
- 20% – мінус 7,4 °С;
- 30% – мінус 13,1 °С;
- 40% – мінус 21,5 °С;
- 50% – мінус 33,6 °С.

Прийнявши 30% концентрацію розчину, отримуємо, що для приготування розчину для заповнення системи необхідно залити 210 л води і 90 л чистого пропіленгліколю.

Колектор складається з п'яти трубних контурів по 100 м і об'єднуючого трубопроводу, якій підводе теплоносій до теплового насосу. Обов'язковим є встановлення запірної-регулювальної арматури, манометра для контролю цілісності колектора, розширювального баку, спускних пристроїв повітря. Біля будинку необхідно влаштувати приямок для заповнення системи розчином і огляду колектора. Труби, що проходять від колектора до будинку, необхідно обов'язково утеплити. З приямку влаштувати дренаж дощових вод. Заповнювати колектор необхідно вже готовим розчином пропіленгліколю.

5.4.3 Гідравлічний розрахунок ґрунтового колектора

В напірних мережах втрати напору визначаються за формулами Дарсі і Вейсбаха. Сумарне значення втрат можна визначити за рівнянням, м

$$H_{gid} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot l + \sum \xi \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (5.19)$$

де λ – гідравлічний коефіцієнт тертя;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

ξ – значення коефіцієнта місцевих опорів.

Значення гідравлічного коефіцієнта тертя для всіх областей опору можна визначити з рівняння Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}. \quad (5.20)$$

Таблиця 5.9 – Властивості водневого розчину пропіленгліколю

Об'ємна частка в суміші, %	Температура розчину, t, °С	Густина, кг/м ³	Теплоємність, С _p , кДж/ кг К	Тепло-провідність λ, Вт/м К	Кінематична в'язкість, ×10 ⁻⁶ м ² /с
25	-10	1032	3,93	0,466	9,9
	0	1030	3,95	0,470	6,0
	20	1024	3,98	0,478	2,8
	40	1016	4,00	0,491	1,4
	60	1003	4,03	0,505	0,9
	80	986	4,05	0,519	0,68
	100	979	4,08	0,533	0,52
38	-20	1050	3,68	0,420	45
	0	1045	3,72	0,425	12
	20	1036	3,77	0,429	4,4
	40	1025	3,82	0,433	2,2
	60	1012	3,88	0,437	1,3
	80	997	3,94	0,441	0,9
	100	982	4,00	0,445	0,7
47	-30	1066	3,45	0,397	150
	-20	1062	3,49	0,396	70
	-10	1058	3,52	0,395	30
	0	1054	3,56	0,395	18
	20	1044	3,62	0,394	6
	40	1030	3,69	0,393	2,9
	60	1015	3,76	0,392	1,6
	80	999	3,82	0,391	1,1
	100	984	3,89	0,390	0,82

Еквівалентна шорсткість Δ, мм для деяких видів труб наведена нижче

- сталеві суцільнотягнуті нові – 0,02...0,05;
- сталеві суцільнотягнуті ненові – 0,15...0,3;

- чавунні нові – 0,25...1,0;
- бетонні та залізобетонні – 0,3...0,8;
- сталеві зварні нові – 0,04...0,1;
- сталеві зварні і чавунні ненові – 0,8...1,5;
- для поліетиленових труб значення Δ береться з технічних характеристик виробника.

Критерій Рейнольдса визначається за формулою:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (5.21)$$

де v – швидкість руху розчину, м/с;

d – діаметр трубопроводу, м;

ν – кінематична в'язкість розчину при даній температурі, м²/с.

Необхідну витрату теплоносія через випарник визначимо з паспортних даних теплового насоса: $G = 1800$ л/год. При цьому, максимальний опір ґрунтового колектору не повинен перевищувати, згідно з характеристиками циркуляційного насоса 38 кПа.

Пропускна здатність кожного контуру складає $1800/5 = 360$ л/год. Приймаючи довжину труби підведення 10 м діаметром 32 мм, визначимо, що втрати напору складуть приблизно 7200 Па. Це не перевищує допустимих значень.

Контур опалення розраховується за відомими методиками з врахуванням низької температури теплоносія і нестандартного температурного напору в 5 °С.

5.4.4 Розрахунок економічної ефективності парокомпресійного теплового насоса

Як основний показник ефективності теплового насоса застосовується коефіцієнт перетворення або опалювальний коефіцієнт COP (coefficient of performance), що дорівнює відношенню теплопродуктивності теплового насоса до потужності, споживаної компресором. Обчислення COP за значеннями температур кипіння T_0 і конденсації T_k є допустимим лише для ідеального холодильного циклу, тому в рівнянні (5.22) стоїть знак наближено дорівнює.

$$COP = \frac{Q_x + N}{N} \approx \frac{T_0}{T_k - T_0} + 1 \quad (5.22)$$

де Q_x – холодовидатність (потужність випарника), кВт;

N – електрична споживана потужність компресором, кВт;

T_0 – температура кипіння, К;

T_k – температура конденсації, К.

Наприклад, при температурі кипіння $t_0 = -5^\circ\text{C}$, температурі конденсації $t_k = +50^\circ\text{C}$ теоретично досягне значення COP знайдемо:

$$COP \approx \frac{268}{323 - 268} + 1 = 5,87 \quad (5.23)$$

У реальних теплових насосах значення COP знаходиться в межах 3...5.

У режимі охолодження для оцінки ефективності застосовується холодильний коефіцієнт EER (energy efficiency ratio), що дорівнює відношенню холодовидатності теплового насоса до потужності, споживаної компресором.

$$EER = \frac{Q_x}{N} \quad (5.24)$$

Максимальний ККД досягається тепловим насосом при одночасному використанні тепла і холоду: наприклад, при охолодженні продукції і опалюванні промислових цехів чи адмінбудівель. Тоді загальна ефективність насоса визначається як сума COP і EER.

$$EER + COP = \frac{2 \cdot Q_x + N}{N} \quad (5.25)$$

Викликає зацікавленість порівняльна характеристика капітальних та експлуатаційних затрат на влаштування опалення з різними джерелами тепла. Для порівняння оберемо житловий будинок загальною площею 200 м^2 з питомими тепловтратами 70 Вт/м^2 (табл. 5.11). Як джерело тепла оберемо: газове опалення з водогрійним котлом, електричне опалення з електрокотлом і теплонасосне опалення. Вартість 1 м^3 природного газу приймемо 1,5 грн, вартість електричної енергії 0,25 грн/кВт-год. Для більш ефективного використання нічного тарифу при тритарифному обліку електричної енергії пропонується встановити тепловий акумулятор, що дозволить отримати вартість однієї кВт-год теплової енергії на рівні 0,07 грн.

Таблиця 5.10 – Порівняльна таблиця приблизної вартості влаштування газового, електричного і теплонасосного опалення в будинку

Вид робіт або матеріалів	Вартість при газовому опаленні, грн	Вартість при електричному опаленні, грн	Вартість при теплонасосному опаленні, грн
Генератор тепла (котел або ТН)+ регулювання і налаштування	12000	9000	85000
Система опалення (+охладження в системі з ТН)	35000	35000	35000
Підведення газу	20000	0	0
Підведення та облік тарифного електричного живлення	0	12000	8000
Система спліт-кондиціонування	22000	22000	0
Влаштування земляного контуру	0	0	12000
Загальна вартість капітальних вкладень	89000	78000	140000
Експлуатаційні затрати на виробництво одного кВт×год теплової енергії, грн	$0,1 \text{ м}^3/\text{год} \times 1,5 \text{ грн}/\text{м}^3 = 0,15 \text{ грн}$	$1 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 0,25 \text{ грн}/\text{кВт}\cdot\text{год} = 0,25 \text{ грн}$	$0,25 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 0,25 \text{ грн}/\text{кВт} \times \text{год} = 0,07^* \text{ грн}$
Затрати на опалювальний період, без врахування виробництва гарячої води	$14 \text{ кВт} \times 4500 \text{ годин} \times 0,15 = 9450 \text{ грн}$	$14 \text{ кВт} \times 4500 \text{ годин} \times 0,25 = 15750 \text{ грн}$	$14 \text{ кВт} \times 4500 \text{ годин} \times 0,07 = 4410 \text{ грн}$
Переплата за 5 років експлуатації при незмінних тарифах	25200	56700	0
Термін окупності теплового насоса без теплового акумулятора	10 років	5,5 років	-
Термін окупності теплового насоса з тепловим акумулятором	8 років	4,9 років	-

Примітка * – при використанні нічного тарифу з акумуляцією тепла середня вартість виробництва 1 кВт·год тепла в середньому за добу становить 0,05 грн.

Практичний досвід іноземних країн показує, що реальний термін окупності теплових насосів складає 6...8 років.

5.5 Вітрова енергетика в приватних господарствах України

Джерелом відновлювальної енергії в господарствах України може слугувати вітер. Вітром називається течія атмосферного повітря, що виникає від нерівномірності нагріву землі. В країнах Європи виробництво вітрової енергії займає провідне місце. У Данії виробництво електричної енергії з вітру складає 12% від загального обсягу, у Німеччині до 10%. За останні 15 років в світі було споруджено більше 100 тисяч вітрових установок (рис. 5.14) сумарною потужністю більше 25 ГВт. Сімдесят відсотків припадає на країни Європи [16, 79].

Ефективна робота вітрогенерувального пристрою (ВГП) можлива при швидкості вітру від 5 до 25 м/с. В штиль та при незначних швидкостях компенсація електричної потужності повинна здійснюватися традиційними джерелами енергопостачання. Розрахунок роботи ВГП здійснюється таким чином. Енергія вітрового потоку, що проходить через площу F , яку омивають лопаті:

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (5.26)$$

де v – швидкість потоку, м/с;

m – маса повітря, кг.

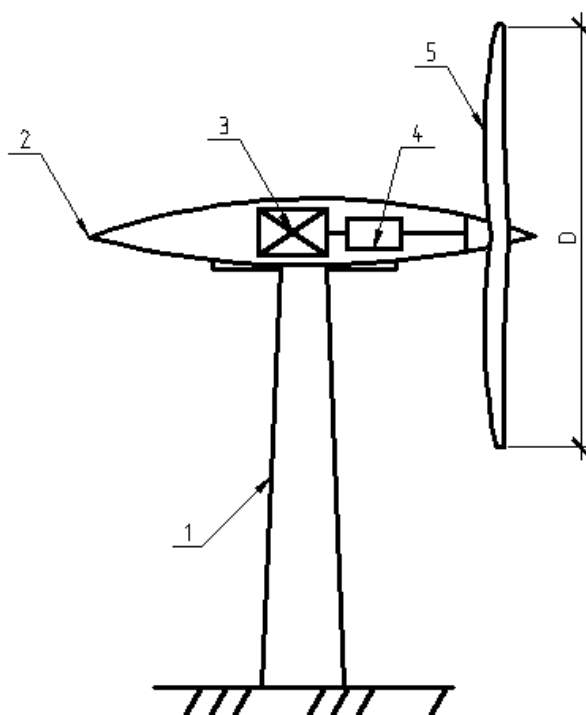


Рисунок 5.14 – Схема вітрогенераторного пристрою

де: 1 – башта; 2 – корпус вітрогенератора; 3 – електрогенератор; 4 – редуктор; 5 – крильчатка з ротором

За секунду протікає маса повітря, яка визначається з рівняння :

$$m = \rho \cdot v \cdot F \quad (5.27)$$

Густина повітря ρ , кг/м³ визначається з наступного співвідношення

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (5.28)$$

де p – атмосферний тиск, Па;

$R = 287$ Дж/(кг·К) – постійна газова стала;

T – абсолютна температура, К

Площа F , м², яку омивають лопаті, визначається з довжини лопаті L :

$$F = \pi \cdot L^2 \quad (5.29)$$

Тоді електрична потужність N , що виробляється вітрогенератором, визначиться згідно рівняння

$$N = \frac{1}{2} \mu \cdot \rho \cdot \pi \cdot L^2 \cdot v^2, \quad (\text{Вт}) \quad (5.30)$$

де μ – загальний ККД вітрогенератора, він складається з добутку ККД вітряка $\mu_{\text{в}}$ і ККД електрогенератора і перетворювача $\mu_{\text{а}}$

$$\mu = \mu_{\text{в}} \cdot \mu_{\text{а}} \quad (5.31)$$

Значення даних ККД знаходиться на рівні $\mu_{\text{в}} = 25\text{...}35\%$;
 $\mu_{\text{а}} = 70\text{...}88\%$

Максимальна швидкість вітру до руйнування вітрогенератора – 60 м/с.

В таблиці 5.11 наведено технічні характеристики вітрогенератора SW2/5, що може використовуватися для приватних господарств на селі.

Таблиця 5.11 – Технічні характеристики вітрогенератора SW2/5

Максимальна вихідна потужність, кВт	5
Потужність генератора, кВт	2
Напруга, В	220 або 120
Частота струму, Гц	50 або 60
Розрахункова швидкість вітру, м/с	9,1
Мінімальна робоча швидкість вітру, м/с	3
Максимальна робоча швидкість вітру, м/с	25
Діаметр вітрового колеса, м	4,5
Частота обертів, об/хв	100...160

Продовження таблиці 5.11

Висота башти, м		12
Кількість лопатей, шт		3
Діапазон температури експлуатації, °С		-40...+50
Рівень шуму, що створюється установкою, дБ		45
Строк служби, років		15
Середньорічне виробництво електроенергії при середній швидкості вітру, кВт·год	4м/с	2581
	5м/с	4664
	6м/с	6747
	7м/с	8554
	8м/с	9990
Маса установки, кг	з баштою	270
	без башти	95

Контрольні питання

1. Поясніть принцип роботи геліоколектора.
2. Що таке абсорбер геліоколектора?
3. Чому використання теплового насоса вигідніше безпосереднього електричного нагріву.
4. Поясніть принцип роботи теплового насоса.
5. Що таке конденсатор та випарник?
6. Для чого потрібен терморегулювальний вентиль?
7. Які ґрунти дозволяють отримати найбільшу теплову потужність з 1 м²?
8. Що таке чіллер і як його можна використовувати при виробництві холоду і тепла?
9. Чим чіллер відрізняється від теплового насосу?
10. Поясніть конструкцію і принцип роботи котла, що працює на соломі.
11. Яким чином ефективно сполучити котел, що працює на соломі, з існуючою системою тепlopостачання населеного пункту чи підприємства?
12. Від чого залежить потужність, що виробляється вітрогенератором?
13. Поясніть принцип роботи акумулятора тепла.
14. За рахунок чого акумулятори тепла з твердим плавким акумулювальним матеріалом ефективніші за інші?

Додаток А

Інтенсивність сонячної радіації на території України

Область	Інтенсивність інсоляції, кВт·год/м ²
Закарпатська	1150
Львівська	1150
Чернівецька	1150
Івано-Франківська	1150
Луцька	1000
Рівненська	1000
Хмельницька	1000
Вінницька	1000
Житомирська	1000
Київська	1000
Черкаська	1000
Полтавська	1000
Чернігівська	1000
Сумська	1000
Харківська	1000
Луганська	1250
Дніпропетровська	1250
Донецька	1250
Запорізька	1250
Херсонська	1250
Кіровоградська	1250
Миколаївська	1250
Одеська	1250
Луганська	1250
Автономна республіка Крим	1350

Додаток Б

Технологічні процеси виробництва біогазу

Вихідні дані:

Тваринницький комплекс на 500 голів ВРХ.

Процес виробництва біогазу здійснюємо згідно з технологічною схемою, запропонованою на рисунку 4.12.

Розраховуємо вихід відходів від худоби відповідно до таблиці 1.

Таблиця 1 – Середній вихід відходів від сільськогосподарських тварин

Вид тварин	Середній вихід відходів, кг на добу на голову	Вміст сухої речовини у відходах, %	Вміст органічних речовини у відходах, %
ВРХ	15...50	11	9
Свині	7	8,5	6,5
Кури	0,15	22	17

Отримуємо: вихід відходів складає 25 тонн на добу в зимовий період і 8 тонн на добу в літній період.

Для зберігання тридобової кількості відходів використовуємо збірник 15 об'ємом 100 м³. В збірнику відбувається підготовка субстрату до бродіння і початкові стадії бродіння в аеробних умовах. У збірник 15 подаємо гарячу воду для розбавлення відходів до концентрації сухих речовин у 8%. Необхідна кількість води для розбавлення відходів в холодний період складе 15 м³. Подаємо воду теплою, рівномірно розмішуючи субстрат для отримання однорідної маси. Температура води не повинна перевищувати 50 °С.

Теплову потужність системи нагріву визначимо згідно рекомендацій підрозділу 3.2. Для компенсації теплових втрат і підігріву субстрату необхідна потужність складе 40...50 кВт в холодний період і 20...25 кВт в теплий період.

Рекомендована добова порція субстрату, що підводиться в кожний реактор, складає 10 % від об'єму такого реактора. Загальний об'єм реакторів виберемо згідно рекомендованого заповнення у 60...70 %. При заповненні початковою масою в об'ємі 100 м³ об'єм реактора приймемо 200 м³. Верхній конус 2 реактора 1 буде використовуватися як проміжний газгольдер.

Процес анаеробної ферментації є складним багатостадійним процесом біологічної конверсії органічних речовин, який здійснюється за участю декількох груп мікроорганізмів, що тісно взаємодіють, і перебігає в певній послідовності.

Жорсткість середовища повинна бути для нормального процесу бродіння в межах 1500...5000 мг CaCO₃ на 1 літр субстрату, а значення рН в межах 6,5...7,5. До речовин, що сповільнюють процес бродіння, належать солі важких металів, антибіотики, аміак, розчинники, лужні метали, поверхнево-активні речовини, що містяться у пральних засобах. Субстрат для анаеробного бродіння є суспензією з концентрацією сухої речовини 2...12%. Довжина стебел соломи, що може знаходитися в ньому, не повинна перевищувати 3 см. Більш великі значення наведених речовин призведуть до збільшеної в'язкості середовища, а відповідно до ускладнень при перемішуванні і утворенні бульбашок газу.

Процес утворення метану відбувається у три основні стадії (див. рис. 1.1): на першій стадії ферментативні бактерії гідролізують органічну речовину субстрату з утворенням кінцевих продуктів у вигляді оцтової кислоти і інших ненасичених жирних кислот, CO₂ і водню.

На другій стадії ацетогенні бактерії виробляють водень і оцтову кислоту з кінцевих продуктів першої стадії. Третя стадія – розклад метаногенними бактеріями оцтової кислоти, CO₂ і водню в метан. У процесі розкладу важливе значення має наявність водню в системі.

Перемішування в реакторах виконується для рівномірного розподілу твердих частинок і рідкої фази. Існують різні види перемішування: механічне, гідравлічне, за допомогою отриманого біогазу. Для реакторів даного комплексу доцільно використовувати локальний барботаж теплообмінної поверхні або лопатеву мішалку з електроприводом.

В результаті анаеробного зброджування в реакторі виділяється горюча суміш газів – біогаз є багатокомпонентним газом, склад якого варіюється залежно від вихідної сировини, умов та часу бродіння. Основними компонентами біогазу є метан (50...70%), вуглекислий газ (25...45%). Також до складу входять сірководень та водень, загальна частка яких не перевищує 3%. Рівень баластових домішок в біогазі досягає рівня 50%, які не тільки перешкоджають використанню газу, але і шкодять обладнанню, трубопроводам та газгольдерам. Теплота згорання 20...25 МДж/м³.

Доцільно використовувати для двигунів суміш 15 – 20 % рідкого палива і 80 – 85 % очищеного біогазу.

З реакторів через збірний колектор біогаз підводиться до блоку очищення біогазу від сірководню 5 і вуглекислого газу 6. Найпростіше очищення проводити в скруберах, заповнених металевою стружкою під шаром води. Стружка піддається іржі, а холодна вода додатково абсорбує діоксид вуглецю. Фільтри розраховані на тижневу роботу. Після чого слід проводити регенерацію стружки в умовах навколишнього середовища із відділенням твердих частинок відновленої сірки.

Після пристроїв очищення біогаз надходить на газгольдер 7, де зберігається і відкачується на потреби господарства по трубопроводу 8 і на потреби БГУ – по трубопроводу 9.

Блок автоматичного керування, що працює відповідно до програми, складеній на базі теорії нечіткої логіки, здійснює моніторинг і управління системою. Блок регулює тиск газу в реакторах та газгольдері, температуру шарів субстрату в реакторі, рівень субстрату в реакторах, подачу теплоносія та захист калорифера від замерзання, температуру у збірнику сировини.

Заброджену органічну масу використовують як високоякісне органічне добриво, що поновлює живильний шар ґрунту і збільшує врожайність культур на 40...60 %.

СЛОВНИК

Енергозбереження (energy saving) – діяльність (організаційна, наукова, практична, інформаційна), яка спрямована на раціональне використання та економне витрачання первинної та перетвореної енергії і природних енергетичних ресурсів в національному господарстві і яка реалізується з використанням технічних, економічних та правових методів.

Енергоносії (energy bearer) – це матеріальний об'єкт, що має нагромаджену енергію і який використовують для транспортування енергії від джерела енергії до кінцевого споживача чи до наступного ступеня перетворювання.

Коефіцієнт теплопередачі (transmission coefficient) – величина, яка чисельно дорівнює густині теплового потоку, що проходить через захисну конструкцію при різниці температур в один кельвін.

Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії (unconventional and renewal power sources) – джерела, що постійно існують, або періодично з'являються в навколишньому природному середовищі у вигляді потоків енергії Сонця, вітру, тепла Землі, енергії морів, океанів, річок, біомаси.

Опір теплопередачі (heat transfer resistance) – величина обернена до коефіцієнта теплопередачі захисних конструкцій.

Теплоізоляція (heat insulation) – покриття або опорядження елементів будівельних конструкцій матеріалами малої теплопровідності з метою зменшення теплових втрат.

Мінеральна вата (mineral wedding) – волоконний теплоізоляційний матеріал, який отримують із силікатних сплавів гірських порід, металургійних шлаків і їх суміші.

Теплоізоляційні матеріали (heat insulation materials) – клас будівельних матеріалів, призначених для теплової ізоляції конструкцій будинків і споруд, промислових установ, технологічної апаратури тощо.

Теплопостачання (heat delivery) – забезпечення теплом за допомогою теплоносія системи опалення, вентиляції, гарячого водопостачання у житлових, громадських і промислових будинках та використання тепла для технологічних потреб.

Вітрогенератор (wind generator of energy) – пристрій, що перетворює кінетичну енергію вітру в інші види енергії – механічну або електричну.

Біогаз (biogas) – газ, що отримують метановим бродінням біомаси. Склад біогазу: до 60% метану, 40% діоксиду вуглецю, 2% сірководню.

Біогазовий реактор (biogas reactor) – конструктивний елемент біогазової установки. Резервуар з залізобетону чи металу, в якому відбувається процес анаеробного бродіння органічних відходів. Має у своєму складі нагрівник субстрату, перемішувальний пристрій, трубопроводи подачі і видалення субстрату, газопровід.

Термостабілізація (thermo stabilization) – процес вирівнювання температурних полів в об'ємі реактора та підтримання необхідної температури для оптимального протікання анаеробного бродіння.

Інтенсифікація теплообміну (intensification of heat exchange) – процес підвищення кількості тепла, що віддається теплообмінником з одиниці його площі до середовища. Здійснюється шляхом штучної турбулізації пристінних потоків середовища біля теплообмінника.

Органічні відходи (organic waste) – органічні речовини або суміші органічних і неорганічних речовин, що непридатні для подальшого використання в рамках наявних технологій, після побутового використання продукції, продукти життєдіяльності тварин.

Газгольдер (gas-holder) — великий резервуар для зберігання природного, біогазу або зрідженого газу. Розрізняють газгольдери постійного і змінного об'ємів.

Тепловий насос (thermal pump) – пристрій, що призначено для переносу теплової енергії від теплового джерела з низькою температурою (найчастіше навколишнього середовища) до теплового споживача з високою температурою.

Анаеробне бродіння (anaerobic fermentation) – процес конверсії складних органічних сполук (полісахаридів, білків, жирів) в метан та діоксид вуглецю. Анаеробне бродіння активно протікає у субстратах при дотриманні ряду вимог до температурного режиму, перемішування та кислотності середовища.

Субстрат (substratum) – вихідний продукт суміші органічних відходів і води в оптимальній пропорції, що перетворюється анаеробними бактеріями у кінцеві продукти – метан і діоксид вуглецю. Оптимальна концентрація твердих речовин, при яких ще відбувається вільне перемішування субстрату, складає 10...12%.

Моделювання (modeling) – це практичне або теоретичне вивчення об'єкта, при якому безпосередньо вивчається не сам об'єкт, а деяка допоміжна штучна або природна система (модель).

ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України « Про енергозбереження»: Офіц. текст зі змінами станом на 09.02.2006. [Електроний ресурс] – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=74%2F94-%E2%F0> – Назва з екрану.
2. Закон України « Про альтернативні джерела енергії» Офіц. текст станом на 20.02.2003 [Електроний ресурс] – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=555-15> – Назва з екрану.
3. Баадер Б. Биогаз: Теория и практика. / Баадер Б., Доне Е., Брендерфер М.; Пер. с нем. М. И. Серебрянного – М. : Колос, 1982. – 148 с.
4. Гелетуха Г. Г. Биогаз зі звалищ. Перспективи використання в Україні/ Гелетуха Г. Г., Копейкін К. О. // Зелена енергетика. – 2002. – №1. – С. 13–16. – ISSN 1684-2294.
5. Бойлс Д. Биоэнергия: технология, термодинамика, издержки. / Бойлс Д.; Пер. з англ. – М. : Агропромиздат, 1987. – 152 с.
6. Соуфер С. Биомасса как источник энергии. / Соуфер С., Заборски О.; Пер. з англ. – М. : Мир, 1985. – 368 с.
7. Джеджула В. В., Альтернативні джерела енергозабезпечення фермерських господарств / Джеджула В. В., Демченко Л. Л. // Індивідуальний житловий будинок. Книга за матеріалами третьої республіканської науково-технічної конференції. – Вінниця. – 2001. – С. 137–141.
8. Ткаченко С. Й. Методичні основи моделювання системи термостабілізації реактора біогазової установки / Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Резидент Н. В. // Праці за матер. IV всеукр. наук–техн. конф. «Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві». – Вінниця. – 2004. – С. 70–79.
9. Ратушняк Г. С. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. // Вісник ВПІ. – 2006. – № 2. – С. 26–31. – ISSN 1997–9266.
10. Ткаченко С. Й. Закономірності розподілу температурних напорів за умов локального газорідного омивання поверхні / Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Джеджула В. В. // Вісник ВПІ. – 2003. – № 4. – С. 42–45. – ISSN 1997–9266.
11. Деклараційний пат. № 7184 Україна. Біогазовий реактор / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Державний департамент інтелектуальної власності. – № 20041008416; Заяв. від 18.10.2004; Опубл. 15.06.2005; Бюл № 6.

12. Матвеев Ю. Биогазовые установки Дании / Матвеев Ю. // Зелена енергетика – 2004.– № 2. – С. 11–13. – ISSN 1684-2294.
13. Сербін В. А. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії в системах ТГВ: навч. посібник / Сербін В. А. – Макіївка : ДонДАБА, 2003. – 153 с.
14. Панцхава Е. С. Биоэнергетические установки по конверсии органических отходов в топливо и органические удобрения / Панцхава Е. С., Кошкин Н. Л. // Теплоэнергетика. – 1993. – № 4. – С. 20–23.
15. Давиденко Е. В. Метангенерация твердых органических отходов городов / Давиденко Е. В., Панцхава Е. С. // Біотехнологія. – 1990. – № 4. – С. 49 – 53.
16. В. Г. Лабейш. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / В. Г. Лабейш – СПб. : СЗТУ, 2003. – 79 с.
17. Гелетуха Г. Г. Энергетический потенциал биомассы в Украине / Г. Г. Гелетуха., З. А. Марценюк // Промышленная теплотехника. – 1998. – № 4. – С. 52–55.
18. Современное состояние и перспективы развития биоэнергетики в Украине / Гелетуха Г. Г., Железна Т. А., Жовмир Н. М., Матвеев Ю. Б. // Промышленная теплотехника. – 2005. – №1. – С. 78–85.
19. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А. Біоенергетика у Фінляндії // Зелена енергетика. – 2002. – №3. – С. 16. – ISSN 1684-2294.
20. Гелетуха Г. Г. Біоенергетика в Австрії / Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. // Зелена енергетика – 2003. – №2. – С. 18–19.– ISSN 1684-2294.
21. Матвеев Ю. Б. Біогаз із Луганського полігона ТПВ / Матвеев Ю. Б. // Зелена енергетика. –2003. – №2. – С. 8–10.
22. Электроэнергетика України повинна "позеленіти" / Вольчин І., Потапов А., Гелетуха Г., Жовмір М. // Зелена енергетика. – №3. – 2003. – С. 16–18.
23. Петрук В. Г. Экономические аспекты использования соломы как альтернативного источника энергии в Винницкой области / Петрук В. Г., Петрук Д. В., Денисюк Н. М. // Праці за матеріалами І всеукраїнської науково–технічної конференції «Енергія з біомаси». – К., 2002.
24. Виробництво біогазу на станціях очистки стічних вод //Ринок інсталяційний. – 2000. – № 11. – С. 34 –35. – ISSN 1684-2251.
25. Семенов И. В. Проектирование биогазовых установок. / Семенов И. В. – К. : Техніка, 1992. – 346 с.

26. Исаченко В. П. Теплопередача : учебник для вузов. / Исаченко В. П. Изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Энергия, – 1975. – 488 с.
27. Галицейский Б. М. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках / Галицейский Б. М., Рыжов Ю. А., Якуш Е. В. – М. : Машиностроение, 1977. – 256 с.
28. Михеев М. А. Основы теплопередачи / Михеев М. А, Михеева И. М. – М. : Энергия. 1977 – 344 с.
29. Біопалива (технології, машини і обладнання) / В. О. Дубровін та інш.– К. : ЦТІ „Енергетика і електрифікація”, 2004. – 137с.
30. Fand R. U. Acoustic streaming near a heated cylinder. / Fand R. U., Kaye J. // The journal of the acoustical society of America – 1966. – Vol. 32, №5. – P. 579– 584.
31. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Підвищення продуктивності біогазового реактора управлінням параметрами вільноконвективних процесів теплообміну // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – №2. – С. 29–32.
32. Деклараційний пат. № 15894 Україна. Біогазовий реактор / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В., Державний департамент інтелектуальної власності. – № u 2006 01110; Заяв. від 06.02.2006; Опубл. 17.07.2006; Бюл № 7.
33. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации. Нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети/ Ротштейн А. П. – Винница : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1999. – 320 с.
34. Митюшкин Ю. И. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний. / Митюшкин Ю. И., Мокин Б. И., Ротштейн А. П. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2002. – 145 с.
35. Пат. 17230 Україна, МПК E 04 B 2/02, E 04 B 2/14. Теплоізоляційна панель / Ратушняк Г. С., Анохіна К. В., Чухряєва О. Г.; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200603243; заявл. 27.03.2006; опубл. 15.09.2006, Бюл. №9.
36. Ратушняк Г. С. Моделювання віброінтенсифікуючих процесів в біореакторах на основі лінгвістичної інформації/ Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – № 3. – С. 74 – 80.
37. Ратушняк Г. С. Автоматичне управління в системах біоконверсії/ Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. // Тези доповідей XIII Міжнародної конференції з автоматичного управління. – 2006. – С. 227.

38. Деклараційний пат. № 13260 Україна. Експериментальна установка для вимірювання середніх температур стінки та температурних напорів / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В., Державний департамент інтелектуальної власності.– № u 2005 09738; Заяв. 17.10.2005; Опубл. 15.03.2006; Бюл № 3.
39. Ратушняк Г. С. Контроль параметрів температурних напорів в одно– та багатофазних середовищах / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. //Вісник ВПІ. – 2005. – № 6. – С. 193–195. – ISSN 1997–9266.
40. Пат. 26811 Україна, МПК Е 04 В 2/02, Е 04 В 2/14. Теплогідроізоляційна покрівля / Ратушняк Г. С., Анохіна К. В., Ратушняк О. Г.; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200704953; Заявл. 03.05.2007; опубл. 10.10.2007.
41. Степанов Д. В. Теплообмінні пристрої в системі біоконверсії / Степанов Д. В., Боднар Л. А. // Вісник ВПІ. – 2005. – № 1. – С. 55–57.
42. Ратушняк Г. С., Енергозбереження в системах виробництва біогазу / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. // Тези доповідей Міжнародної конференції «І всеукраїнський з'їзд екологів», 2006. – С. 229.
43. ТУ "Біогаз метантенків." ТУУ–204. 14069366–13–97.
44. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Інтенсифікація виробництва та підготовка біогазу до використання в теплотехнічному обладнанні / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В.// Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2005 – № 8. – С. 52 – 60.
45. Разработка технологии очистки биогаза от сероводорода с помощью жидкого поглотителя в скрубберной схеме / Боровой И.А., Колобродов В. Г., Кулько В. Б., Винокуров Э. И. // Вибрані праці Першої міжнародної конференції „Енергія з біомаси”. – К.: – 2002.
46. Комплекс по переработке биогаза. / Карнацевич Л. В., Хажмурадов М. А., Колобродов В. Г. та інш. // Вибрані праці Першої міжнародної конференції „Енергія з біомаси”. – К. – 2002.
47. Некрасов В. Г. Перспективы использования биогаза / Некрасов В. Г. // Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – № 4. – С. 25.
48. Авизов А. Х. Экономическая эффективность технологии конверсии биомассы в топливо и удобрения/ Авизов А. Х., Синяк Ю. В. // Биотехнология кормопроизводства и переработки отходов. Рига. – 1987. – С. 197– 202.
49. Медведев И. Л. Экономические аспекты создания безотходных производств в условиях интенсификации с/х / Медведев И. Л. // Биотехнология. –1988. – Т.4, № 5. – С. 640–642.

50. Деклараційний пат. № 70885 А Україна. Біогазовий реактор // Ратушняк Г. С., Джеджула В. В., Державний департамент інтелектуальної власності. – № 20031213279; Заяв. від 31.12.2003; Опубл. 15.10.2004; Бюл № 10.
51. Деклараційний пат. № 7938 Україна. Біогазовий реактор / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Державний департамент інтелектуальної власності. – № 20041210473; Заяв. від 20.12.2004; Опубл. 15.07.2005; Бюл. № 7.
52. Деклараційний пат. № 9697 Україна. Біогазовий реактор / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В.; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u 200502273; Заявл від 14.03.2005; Опубл. 17.10.2005; Бюл. № 10.
53. Никитин Г. А. Метановое брожение в биотехнологии: учебное пособие / Никитин Г. А. – К.: Вища школа. 1990. – 207 с.
54. Перспективи розвитку технічних засобів біоенергоконверсії / Лінник М. К., Голуб Г. А., Дубровін В. О., Мельничук М. Д. // Вісник аграрної науки. – 2006. – №5. – С.46–50.
55. Цветков Б. П. Оборудование для производства биогаза из животноводческих отходов / Цветков Б. П., Ясенецкий В. А. // Промышленная энергетика. – 1988. – № 11. – С. 9–13.
56. Батунер Л. М. Математические методы в химической технике / Батунер Л. М., Позин М. Е. – М.: Стройиздат, 1985. – 310 с.
57. Панцхава Е. С. Техническая биоэнергетика / Панцхава Е. С. – М.: Знание, 1990. – 64 с.
58. Таргоня В. С. Оборудование для получения биогаза из навоза / Таргоня В. С., Ясинецкий В. А. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1990. – № 44. – С. 23–24.
59. Пат. 31173 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазовий реактор / Ратушняк Г. С., Анохіна К. В., Джеджула В. В.; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200714164; Заявл. 17.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. №6.
60. Дурдыбаев С. Д. Утилизация отходов животноводства и птицеводства / Дурдыбаев С. Д., Данилкина В. С., Рязанцев В. П. // ВНИИТЭИ Агропром. Обзорная информация. – М., 1989.
61. Hashimoto A. G. Methane from cattle waste / Hashimoto A. G. // Biotechnologie & Bioengineering. – 1982. – Vol. 24, № 9. – P. 2039–2052.
62. Малогабаритні біогазові установки. // Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії. – 1999. – № 2. – С. 83.

63. Корнеев А. Д. Исследование теплообмена в биореакторах / Корнеев А. Д., Попов В. Д., Матвеев В. Е. // Гидродинамика и процессы переноса в биореакторах : Сб. науч. тр. – Новосибирск: АН СССР СО, Ин-т теплофизики. – 1989. – С. 63–72.
64. Югов С. А. Вопросы теплообмена в суспензиях / Югов С. А. // Исследование тепло- и массообмена в аппаратах с дисперсными системами : Сб. научн. тр. – Минск : ИТМО, 1991. – С. 170–174.
65. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче / Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. – Л. – М. : Государственное энергетическое издательство, 1958. – 418 с.
66. Остапчук Н. В. Основы математического моделирования процессов пищевых производств : учеб. пособие / Остапчук Н. В. – 2-е изд. перераб. и доп. – К. : Вища школа, 1991. – 367 с.
67. Григор'єва В. В. Загальна хімія / Григор'єва В. В. – К. : Вища школа., 1991. – 431 с.
68. Жовмір Н. Альтернативне теплопостачання за рахунок використання соломи / Жовмір Н., Олійник Є., Чаплигін С. // Коммунальное хозяйство – 2007. – № 8. – С. 24-27.
69. Скафтымов Н. А. Основы газоснабжения / Скафтымов Н. А. – Л. : Недра, 1975. – 343 с.
70. Дыбан Е. П. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел / Дыбан Е. П., Мазур А. И. – К. : Наук. думка, 1982. – 303 с.
71. Ратушняк Г. С. Моделювання процесів теплообміну при вібраційному впливі в багатокомпонентних сумішах біореакторів / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. // Наукові праці Вінницького національного університету–2008. – № 1. – Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/20081/uk.files/08rgsmob_uk.pdf
72. Брдлик П. Н., Купцова В. С., Малинин В. Г. Расчет средних коэффициентов теплоотдачи на поверхности горизонтального цилиндра при различных граничных условиях в случае ламинарной свободной конвекции. Вопросы теплообмена : Сб. научн. тр. / Брдлик П. Н., Купцова В. С., Малинин В. Г. – 1977. – № 102. – С. 58 – 63.
73. Гюнтер Л. И. Метантенки / Гюнтер Л. И., Гольдфарб Л. Л. – М. : Стройиздат, 1991. – 128 с.
74. Гелетуха Г. Г. Дополнительные инвестиции в энергосбережение / Гелетуха Г. Г., Матвеев Ю. Б., Филоненко А. В. // Монтаж и технологии. – 2006. – №4. – С. 40–44.

75. Долинский А. А. Возможности замещения природного газа в Украине за счет местных видов топлива / Долинский А. А., Гелетуха Г. Г. // Энергетическая политика Украины. – 2006. – № 3–4. – С.60–65.
76. Гелетуха Г. Г., Железная Т. А. Обзор технологий сжигания соломы с целью выработки тепла и электроэнергии / Гелетуха Г. Г., Железная Т. А. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1998. – № 6. – С. 3–12.
78. Пат. 34016 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазовий реактор / Ратушняк Г. С., Анохіна К. В., Джеджула В. В.; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200801976; Заявл. 18.02.2008; опубл. 25.07.2008, Бюл. №14.
79. Фокін В. М. Теплогенеруючі установки систем тепlopостачання / В. М. Фокін // М. : Машинобудування -1. – 2003. – 240 с.
79. Ткаченко С. Й. Моделювання інтенсивності теплообміну до багатокомпонентних органічних сумішей / Ткаченко С. Й., Резидент Н. В. // Вісник ВПІ. – 2005. – № 6. – С. 187 – 193. – ISSN 1997–9266.
80. Ратушняк Г. С., Енергозбереження в системах виробництва біогазу / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. // Сотрудничество для решения проблем отходов. Материалы IV Международной конференции. – Х. : ЭкоИнформ, 2007. – С. 180 – 182.
81. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» Офіц. текст зі змінами станом на 20.06.2007 – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=1264-12>
82. Закон України «Про державну підтримку сільського господарства України» Офіц. текст зі змінами станом на 16.12.2006 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=1877-15>
83. Ратушняк Г. С. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату. Монографія / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2008. – 117 с. – ISBN 978-966-641-272-3.
84. Ратушняк Г. С. Автоматичне управління в системах біоконверсії / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. // Вісник ВПІ. – 2006. – № 6. – С. 116 –121. – ISSN 1997–9266.
85. Мовсесов Г. Е. Биогазовые установки для переработки органических отходов фермерских хозяйств / Мовсесов Г. Е. // Сотрудничество для решения проблем отходов. – Х.: ЭкоИнформ, 2007. – С. 176 – 179.

86. Ратушняк Г. С. Обладнання із віброактиватором для виробництва біогазу / Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. // Вісник ВПІ. – 2007. – № 4. – С. 71 –75. – ISSN 1997–9266.
87. Офіційний сайт Viessmann [Електронний ресурс]. – режим доступу: <http://www.viessmann.ru>
88. Scienmet [Електронний ресурс]. – режим доступу <http://www.scienmet.com>

Навчальне видання

**Георгій Сергійович Ратушняк
В'ячеслав Васильович Джеджула
Катерина Володимирівна Анохіна**

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено В. Джеджулою

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

Вінницький національний технічний університет,
науково-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №746 від 25.12.2001 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) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №746 від від 25.12.2001 р.