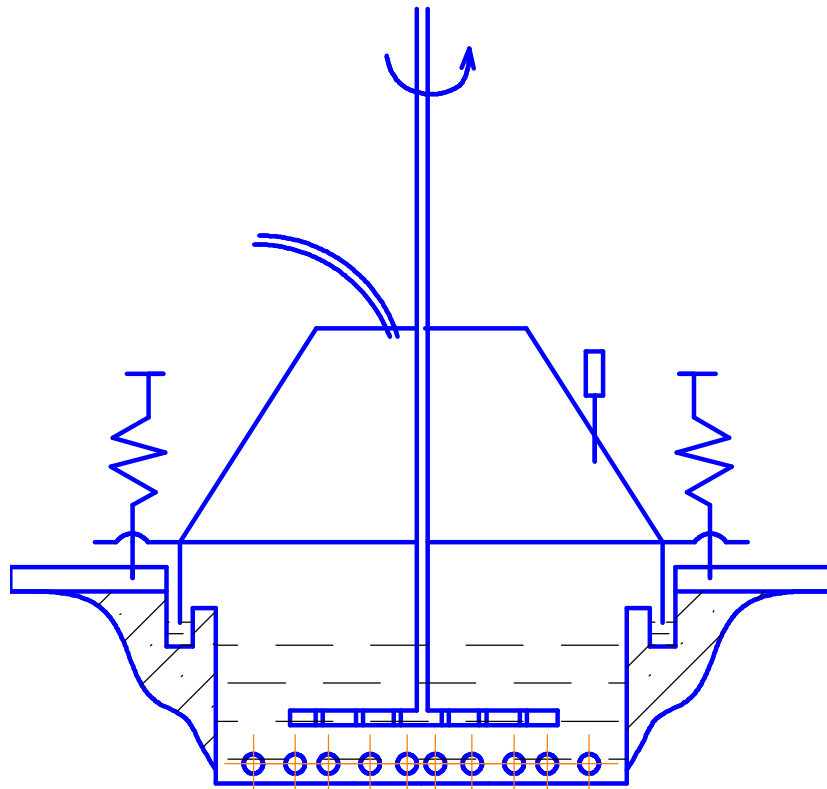


Г.С. Ратушняк

В.В. Джеджула

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ БІОКОНВЕРСІЇ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Г.С. Ратушняк
В.В. Джеджула

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ БІОКОНВЕРСІЇ

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів напряму підготовки 0921-«Будівництво» спеціальності 7.092108 "Теплогазопостачання і вентиляція". Протокол № 4 від 23 листопада 2006 р.

Вінниця ВНТУ 2006

УДК 728.1

Р 25

Р е ц е н з е н т и:

А.Ф. Пономарчук, доктор технічних наук, професор, ВНТУ

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

П.С. Берник, доктор технічних наук, професор, ВДАУ

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Ратушняк Г.С., Джеджула В.В.

Р 25 Енергозбереження в системах біоконверсії. Навчальний посібник. -
Вінниця: ВНТУ, 2006.- 83 с.

В посібнику розглянуті основні джерела альтернативного енергозабезпечення фермерських господарств. Особлива увага надана біогазу як перспективному паливу. Запропоновані оригінальні конструкції реакторів для покращення процесів протікання 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 у відповідності з програмою до дисципліни “Енергозбереження та експлуатація в системах теплогазопостачання і вентиляції”.

УДК 728.1

© Г.С. Ратушняк, В.В. Джеджула, 2006

ЗМІСТ

Передмова.....	4
1 Сучасний стан та перспективи розвитку біогазових технологій на Україні	6
1.1 Альтернативна енергетика сучасності.....	6
1.2 Джерела відходів біомаси.....	7
1.3 Особливості анаеробного процесу бродіння в біогазових установках.....	11
1.4 Фізико-хімічні властивості біогазу та шламу.....	15
2 Конструктивні особливості біогазових установок.....	16
2.1 Будова резервуару біогазових установок.....	16
2.2 Теплова ізоляція стінок реактора.....	20
2.3 Системи теплогазопостачання комплексу біогазової установки.....	21
2.4 Газгольдери систем біоконверсії.....	27
3 Шляхи підвищення ефективності роботи біогазових реакторів.....	30
3.1 Термостабілізація процесу анаеробного бродіння.....	30
3.2 Барботажна інтенсифікація теплообміну між нагрівником і середовищем.....	31
3.3 Вібраційна інтенсифікація процесу анаеробного бродіння.....	35
4 Енергозберігаюче управління процесами біоконверсії.....	40
4.1 Контроль та управління процесами анаеробного бродіння.....	40
4.2 Підготовка біогазу для використання в теплотехнічному обладнанні.....	43
4.2.1 Водневе очищення під тиском від сірководню та діоксиду вуглецю.....	44
4.2.3 Очищення газів від вуглекислого газу та сірководню розчинами етаноламінів.....	46
4.2.3 Очищення біогазів від діоксиду вуглецю гарячим розчином поташу.....	48
4.2.4 Лужне очищення біогазу від вуглекислого газу.....	50
4.2.5 Очищення біогазу від вуглекислого газу методом низькотемпературної абсорбції метанолом.....	51
4.2.6 Біокаталітична безреагентна технологія очищення біогазу від сірководню	51
4.2.7 Окисно-адсорбційний метод очищення біогазу від сірководню.....	52
4.3 Енергозберігаючі технологічні схеми роботи біогазових установок.....	54
4.4 Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень з управління технологічними механізмами підвищення продуктивності біогазових реакторів.....	59
Література.....	76

Передмова

Україна за рахунок своїх національних ресурсів може забезпечити лише на 43% 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 в 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;
- використання відходів сільськогосподарської продукції для отримання біогазу в якості 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, але, 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.

Наявні 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.

Вирішення цих проблем потребує розроблення нових моделей і конструкцій реакторів, які будуть недорогі, енергоефективні, 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.

При викладенні матеріалу навчального посібника використана сучасна нормативна база України, результати наукових досліджень та практичний досвід впровадження біогазових технологій в 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.

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

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ СИСТЕМ БІОКОНВЕРСІЇ

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. В серпні 1994 р. Верховною Радою України було прийнято Закон про енергозбереження [1], яким передбачено комплекс державних програм з енергозбереження та впровадження альтернативних джерел енергії. В червні 1995 р. був підписаний наказ про створення Державного комітету з енергозбереження.

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;

- дотримання 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 в якості 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 в якості 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 пальне необхідно не в останню чергу. Слід враховувати, що в процесі господарської діяльності велика кількість біомаси залишається невикористаною. Так при заготівлі деревини та її переробці з відходами втрачається близько 50% біомаси. До основних джерел біомаси відносяться:

- відходи тваринництва;

- рослинні залишки сільськогосподарських виробництв – 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, не важко їх 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

Джерело відходів	Вихід відходів, 10^6 т/рік	Вихід біогазу, 10^9 м ³ /рік	Q_n^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

В коливанні поголів'я домашньої худоби намітилась тенденція до зменшення кількості тварин в колективних господарствах, але зростання їх 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 сільського 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 2005 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
Фасоля	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 300-400 кг твердих побутових відходів на рік. Склад ТПВ міст наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Склад ТПВ міст

Компоненти		Вміст, мас.%
1	Папір	43,2
2	Метали	8,0
3	Скло, кераміка, ґрунт	10,8
4	Пластмаси, гума, ганчір'я	4,5
5	Харчові й тваринні відходи	23,5
6	Інші відходи	10,0
7	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 харчових виробництв, так як 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	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
Бельгія	1	0,13

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 у 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

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 в значній мірі залежить від температури: чим тепліше, тим більше 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, мила, 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 скуплюється 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:

- 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 з 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.

Лужність 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, відносяться 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 знаходитись 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.

Для теплотехнічних розрахунків біореакторів, оцінювання значення тепловіддачі від нагрівального елемента до середовища, визначення кількості тепла, необхідного для нагрівання сировини, потрібно знати теплофізичні властивості субстрату. Для оцінювання значень теплоємності C , в'язкості μ та густини субстрату ρ доцільно користуватися залежностями:

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

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

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

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 відбуватися 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 розкладання органіки. Оптимальне завантаженням робочого об'єму біореактора для різних видів органічних речовин наведено в таблиці 1.6 [3]:

Таблиця 1.6 - 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
Бики	4,5	10	40
Свині	3,0	10	50
Кури	1,5	50	55

Авторами запропонована оригінальна конструкція біореактора для безперервного циклу бродіння [4]. 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. 1.1 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. Процеси бродіння візуально оцінюють за допомогою оглядових вікон 11. При необхідності відкрити резервуар 1 ковпак 2 рухається по напрямним 10 і знімається.

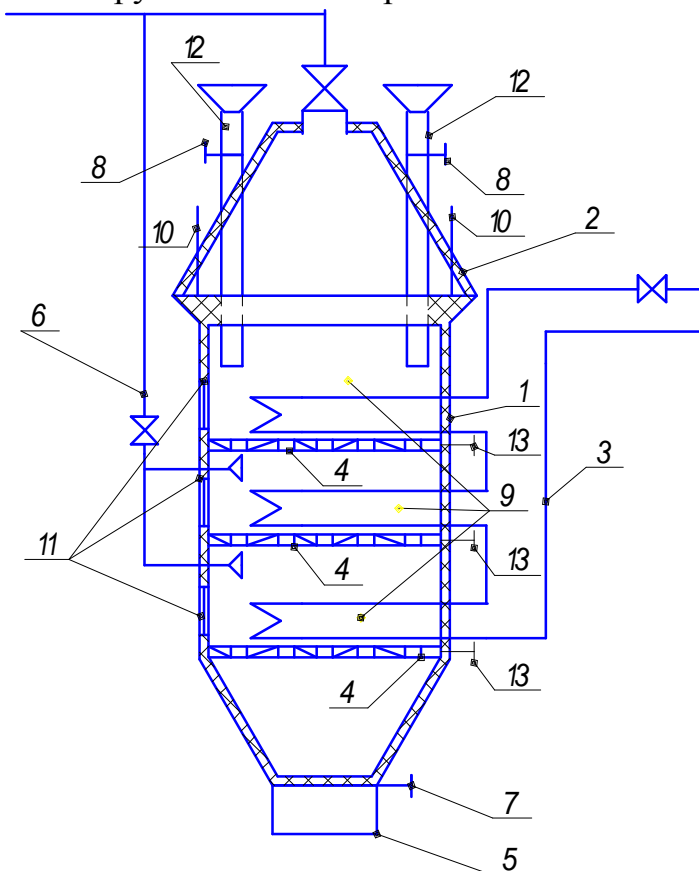


Рисунок 1.1- Біогазовий реактор з безперервним циклом бродіння

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 Фізико-хімічні властивості біогазу та шламу

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 досягає рівня 50%, які не тільки перешкоджають використанню газу, але і шкодять обладнанню, трубопроводам та газгольдерам. Основні фізико-хімічні властивості біогазу наведено в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7- 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
Густина відносно повітря	0,83

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

Контрольні питання

1. Які джерела альтернативної енергетики доцільно використовувати у фермерських господарствах України?
2. Які ви знаєте джерела біомаси?
3. Який енергетичний потенціал відходів в Україні?
4. Які фактори впливають на процес бродіння в біореакторі?
5. Що негативно впливає на бродіння?
6. Як впливає температура і час на вихід газу з кілограму органічної речовини, внесеної в реактор?
7. Наведіть основні фізико-хімічні властивості біогазу.
8. Як можна використовувати біошлам?

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 відносять: 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 характеристикам є яйцеподібні резервуари. За ними по якостях йдуть резервуари з конусами та циліндричні резервуари. Ці форми дозволяють зменшити гідравлічний опір при перемішуванні субстрату, уникнути застійних зон, в зв'язку з відсутністю кутків, локалізувати місця збирання шламу та біогазу. Основним матеріалом для виробництва резервуарів є бетон і полімерні матеріали.

За конструктивними особливостям 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 виконують з старих металевих діжок, цистерн та інших ємностей, що використовуються в промисловості.

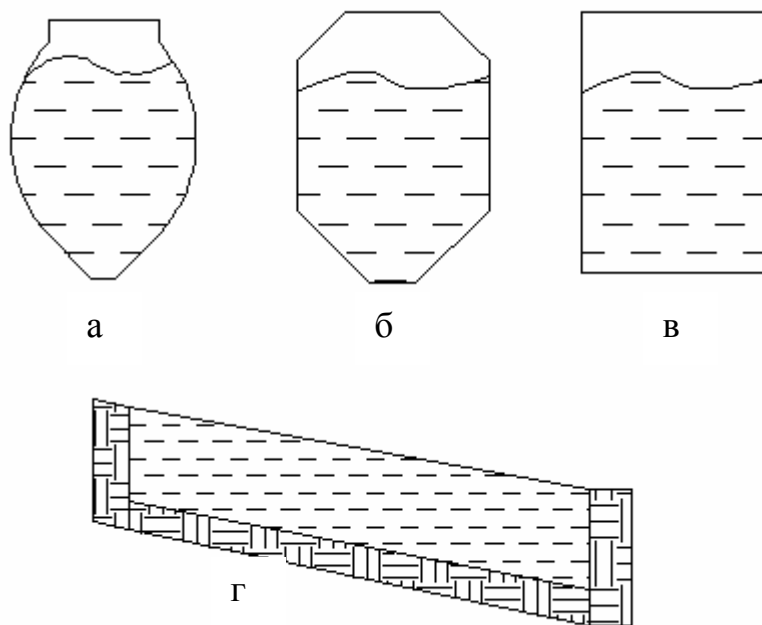


Рисунок 2.1 – Основні форми реакторів біогазових установок

а – яйцеподібний реактор, б - реактор з конусами доверху, донизу, в - циліндричний реактор, г - реактор-траншея

За своїми якостями вони поступаються конусоподібним і яйцеподібним, але досить просто виготовляються і монтуються. Траншейні резервуари з бетону дозволяють переробляти велику кількість субстрату в безперервному режимі, одночасно транспортуючи його під дією гравітаційних сил до місць зберігання шламу. Недоліком траншейних реакторів є велика площа, що потребує теплоізоляції, великі лінійні розміри, ускладненість при перемішуванні та відборі газу. На рисунку 2.2 зображено типовий біореактор, що використовується в Україні та інших країнах [5].

Еластичні біореактори виготовляють з гумоподібних матеріалів, та розташовують в виїмках у землі. Перевагою таких конструкцій є динамічне відслідковування процесу накопичення газу і реагування збільшенням об'єму резервуару. Також за рахунок розтягнення він може вміщувати більше субстрату, ніж бетонний. Недоліком таких реакторів є те, що вони можуть використовуватись тільки у країнах з переважно теплим кліматом та мають великий коефіцієнт тертя, що збільшує енерговитрати на перемішування.

Авторами запропонована конструкція реактора з циліндричним резервуаром і конусами доверху та донизу [6]. Конструкція біореактора з прошарком між утепленим корпусом та робочим резервуаром (рис. 2.4)

дозволяє підвищити термічний опір стінки резервуара без додаткових капіталовкладень на ізоляційний матеріал.

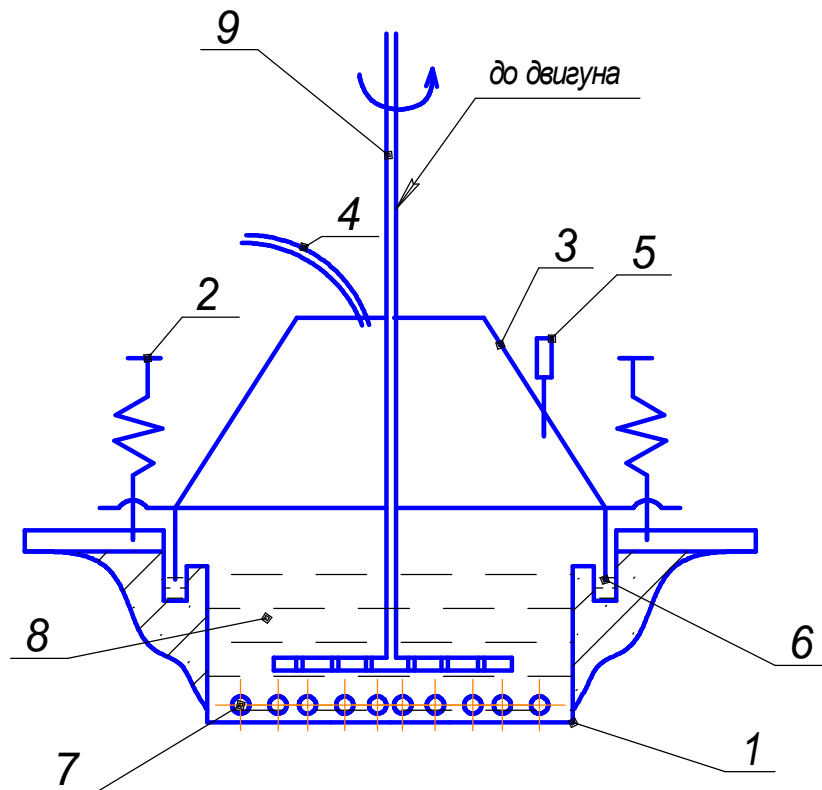


Рисунок 2.2 – Типова конструкція біореактора:

1 – корпус, 2 - напрямні ковпака, 3 – ковпак, 4 – газовідвідна трубка, 5 - манометр, 6 - гідрозатвори, 7 - нагрівальний елемент, 8 – субстрат, 9 - мішалка.

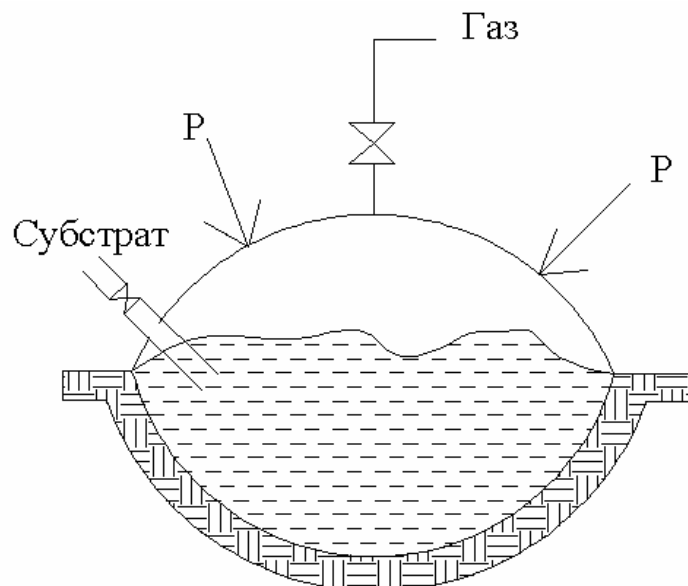


Рисунок 2.3 - Еластичний реактор

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 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. В верхній частині утепленого корпусу розміщено патрубок відведення біогазу 7, який приєднано до резервуара накопичення.

Процес вироблення біогазу протікає таким чином. В 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 суміші $t_{\text{проц}}$, 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, її необхідно підтримувати на заданому 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. В разі необхідності 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 патрубку відведення газу 7. Міжкорпусний простір виступає як газгольдер для тимчасового зберігання газу.

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

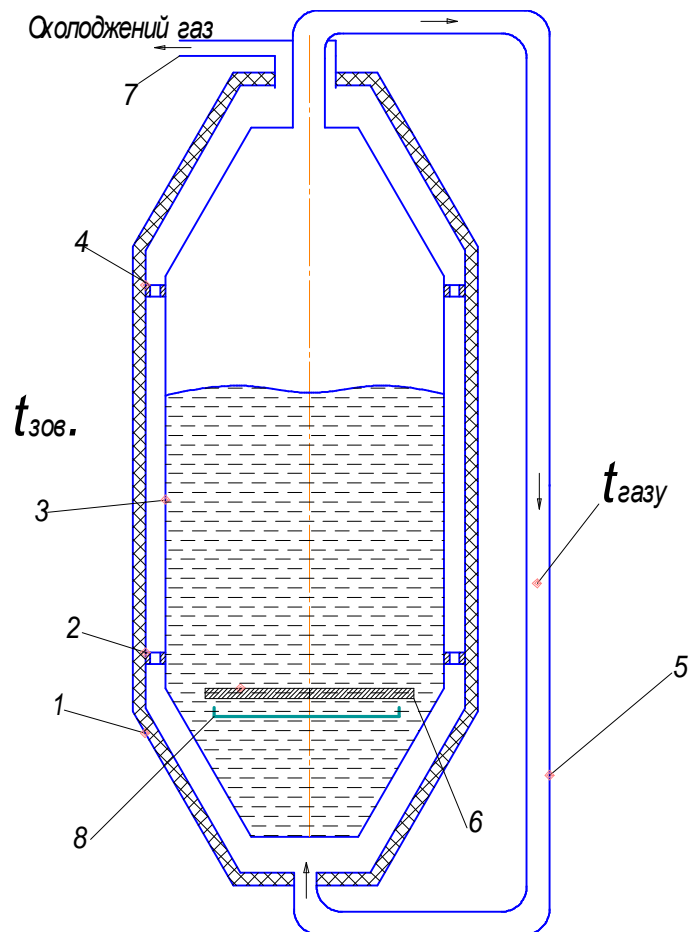


Рисунок 2.4 - Біогазовий реактор з утепленням корпусом

2.2 Теплова ізоляція стінок біореактора

Для підтримання температури всередині установки в межах певного температурного режиму необхідна якісна термоізоляція стінок реактора від навколишнього середовища. Окрім того стінки реактора повинні бути гідро- і газонепроникними, мати велику міцність та бути стійкими до корозій бетону чи металу. Утеплення стінок виконується розміщенням реактора в землі, обгортанням його теплоізоляційними матеріалами типу мінеральної вати (izover), поролону, пінопласту. Пінопласти мають невеликий питомий об'єм – від 20 до 60 кг/м³, низький рівень вологопроникнення – 0,5...3% від маси утеплювача, незначну паропровідність і достатню механічну міцність. Але вони недостатньо гнучкі, що буде негативно виявлятися при ізоляції криволінійних поверхонь. Їх вартість більша ніж теплоізоляційних матеріалів з мінеральної вати і скловолокна.

Плитні утеплювачі з мінеральної вати і скловолокна дешевші та вогнетривкіші. Вони в 2,5...3,5 рази важчі за пінопласти, а головне - їх вологопроникність в 100 разів більша ніж у пінопластів. В умовах експлуатації біореакторів в землі це різко зменшує довговічність

мінераловати і скловолокна. Вибір типу утеплювача визначається техніко-економічними розрахунками.

Одним з перспективних теплоізоляційних матеріалів є пресований поролон з фольговою поверхнею «Пінофол – В», характеристики якого наведено в табл. 1.8. Чотири міліметра цього матеріалу замінюють 2,5 керамічні цеглини, 3,5 цеглини силікатні, 77 мм плит мінераловатних або 46 мм плит пінополістиролу. Таким чином використання сучасних теплоізоляційних матеріалів дозволить зменшити капітальні затрати на будівництво реакторів.

Таблиця 1.8 - **Фізичні властивості «Пінофолу-В»**

Характеристика	Кількісний показник
Температура використання, °С	-60÷+100
Водопоглинання по об'єму, %	0,6-3,5
Питома теплоємність, кДж/кг ·°С	1,95
Звукопоглинання, дБ (А)	32
Питома вага, кг/м ²	44±10
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м ² ·°С	0,037-0,038

Основні рекомендації для зменшення теплових втрат біореакторів:

- необхідно зменшити різницю між температурою навколишнього середовища і температурою субстрату. Температуру субстрату зменшити неможливо за технологічними вимогами, а ось температуру навколишнього середовища підвищити можливо за рахунок, наприклад, вкопування реакторів в землю;
- збільшити термічний опір стінок реактора за рахунок використання теплоізоляції;
- зменшити площу контакту реактора і навколишнього повітря використовуючи особливу форму реактора;

Основні втрати тепла для реакторів циліндричної форми з бетону із утеплювачем складають від 10 до 20 % тепла, що йде на нагрівання суміші.

2.3 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: 1кг 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].

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 2.5) [8,9]. Результати розрахунків для тепловіддачі від горизонтального циліндра до субстрату з $C=8\%$ за температури 35°C і температурного напору 5,3°C подано на рис 2.5. Для визначення інтенсивності тепловіддачі до суспензії використано залежності для чистої рідини з підстановкою теплофізичних властивостей субстрату, що розраховані за формулами (1.1-1.3).



Рисунок 2.5 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від концентрації сухої речовини

В загальному випадку тепловіддачу від нагрівального елемента до середовища розраховують за формулами теплопереносу за умов вільної конвекції від горизонтального циліндра.

Коефіцієнт тепловіддачі a $[Bm/m^2 \cdot ^\circ C]$ розраховується за законом Ньютона-Ріхмана і визначається як:

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

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 Нусельта [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:

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

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_v - 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 Нусельта, легко перейти до коефіцієнта тепловіддачі за формулою:

$$Nu = \frac{a \cdot d}{l}, \quad (2.5)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності рідини (субстрату),

α - коефіцієнт тепловіддачі від грійної стінки до субстрату,

d - характерний розмір нагрівника.

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 теплопостачання;
- зменшення розмірів теплообмінних апаратів;
- оптимізації конструкцій реакторів;
- використання інформаційно-вимірювальних систем для контролю та дотриманні максимальної продуктивності реактора.

Утилізація тепла відробленого шламу для нагрівання свіжої біомаси може виконуватись за схемою, що зображена на рис 2.6. Це теплообмінний апарат типу труба в трубі, по якому у внутрішній трубі тече відпрацьований шлам, а в міжтрубному просторі - свіжий. Обмін теплоти відбувається через металеву стінку. Розрахунок виконується за відомими рівняннями для теплообмінників такого типу. Така конструкція теплообмінного апарата дозволить економити енергоресурси та зменшити потреби тепла на нагрівання холодного субстрату.

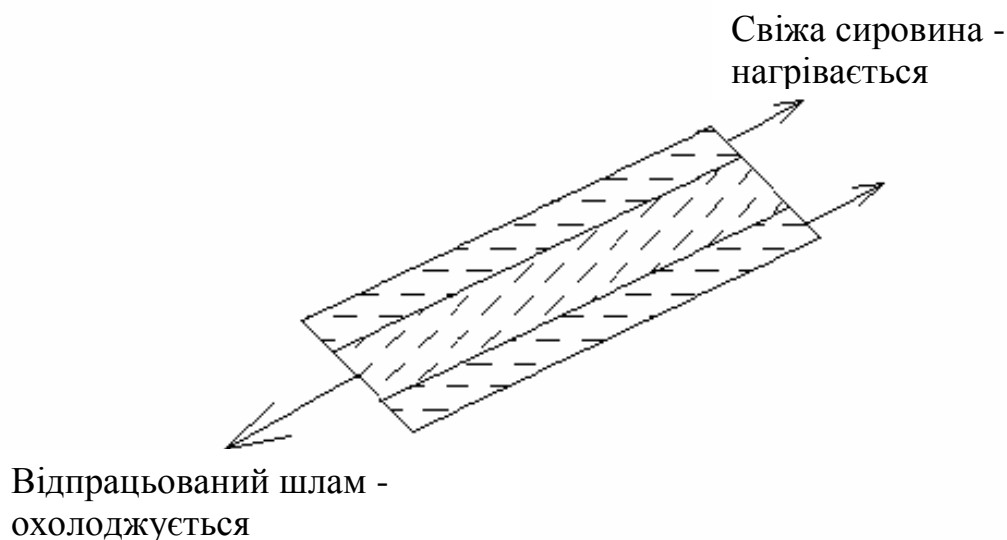


Рисунок 2.6 – Схема рекуперації тепла виробленого шламу

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 2.7). 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 2.7 – 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. 2.8. 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 утворення повітряних пробок встановлено автоматичний повітроспусник. 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°C), подається сигнал на закривання сервоприводом клапана.

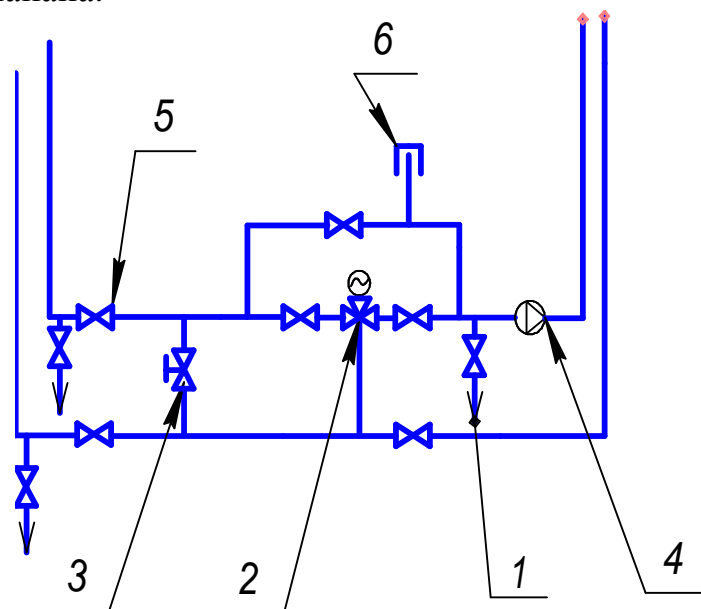


Рисунок 2.8 - Схема обв'язки нагрівального елемента біореактора:

1- спусник води, 2- триходовий клапан з сервоприводом "BELIMO"; 3- перепускний диференційний клапан, 4 - насос циркуляційний "WILO"; 5 – вентиль шаровий, 6 – автоматичний спусник повітря.



Рисунок 2.9 - Загальний вигляд циркуляційного насоса Grundfos UPS 25-40

Для циркуляції теплоносія рекомендуються сучасні насоси фірм WILO та Grundfos з «мокрим» ротором (рис 2.9). За матеріалом

виготовлення насоси найчастіше виготовляють з чавуну, бронзи і 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. 2.10 зображено загальний вигляд сервопривода з триходовим клапаном виробництва швейцарської компанії BELIMO.



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд сервопривода з триходовим клапаном

2.4 Газгольдери систем біоконверсії

Отриманий біогаз в процесі анаеробної ферментації починає скуплюватися 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 природнім 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 раз більше ніж при аналогічному тиску в ємностях;
- криогенний газгольдер. В даному газгольдері за рахунок наднизьких температур (-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. 2.11 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 обмежуватись 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. Тому приміщення, де знаходяться газгольдери повинні відповідати вимогам пожежної безпеки, бути обладнані вентиляцією. Система газопостачання повинна складатися з наступних елементів: пристрій від зворотного полум'я, редуктор, комплекс очищення біогазу від домішок, газоаналізатор, що зв'язаний з відсікаючим клапаном. Неочищений біогаз володіє великою корозійною здатністю, тому металеві газопроводи необхідно періодично перевіряти на герметичність.

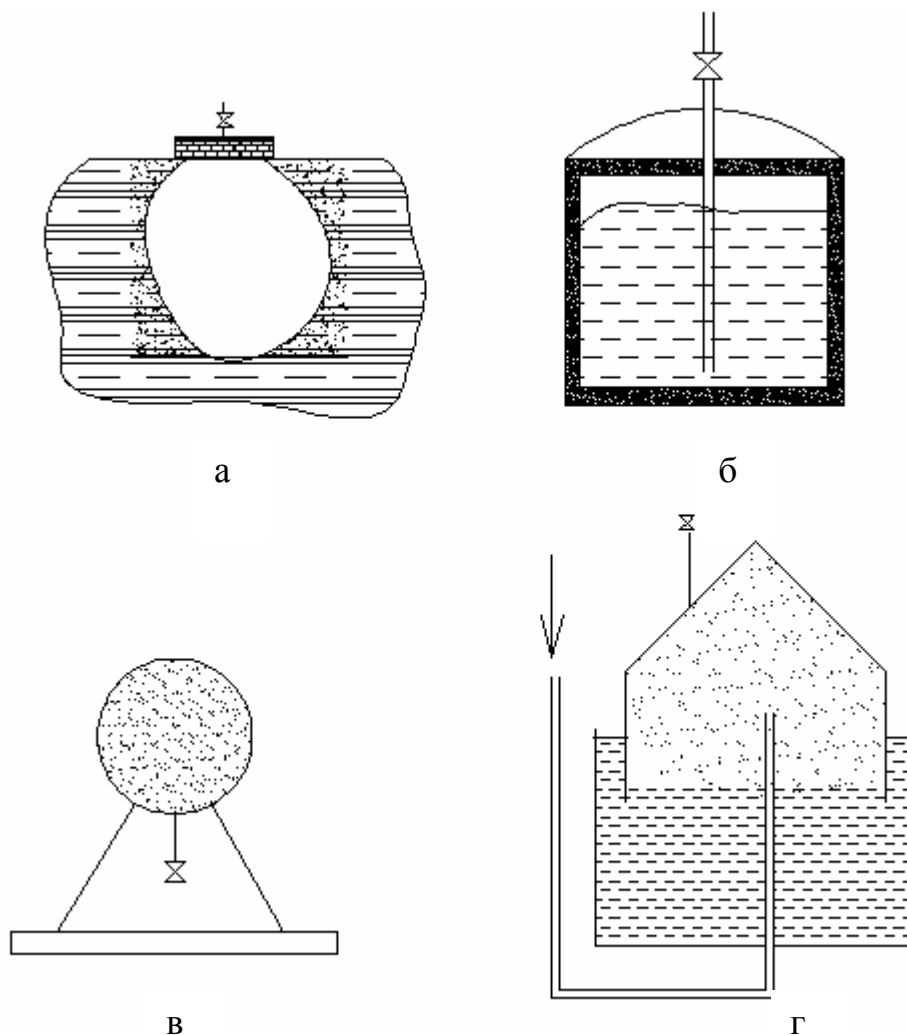


Рисунок 2.11 - Основні типи газгольдерів
 а - газгольдер – порожнина у землі; б – газгольдер для зрідженого газу; в – циліндричний газгольдер високого тиску; г – газгольдер низького тиску.

Контрольні питання

1. Наведіть основні матеріали, з яких будують резервуари біореакторів.
2. Які способи утеплення стінок реактора ви знаєте?
3. Які нагрівальні елементи використовують в системах біоконверсії?
4. Що таке малий і великий контур циркуляції теплоносія?
5. Наведіть схему обв'язки нагрівального елемента біореактора.
6. Що таке сервопривод триходового клапана?
7. Які основні типи газгольдерів використовують на практиці?
8. Як тиск впливає на протікання процесу бродіння?

3 ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРІВ

3.1 Термостабілізація процесу анаеробного бродіння

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:

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

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

Процес термостабілізації в біореакторах – це вирівнювання полів температур та дотримання температурних режимів. Досягнення термостабілізації можливо 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 спаданням 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 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.

Важливим питанням є побудова математичної моделі термостабілізаційних процесів в промислових реакторах з врахуванням впливу основних факторів та отриманих емпіричних залежностей з врахуванням математичного апарата теплообміну. Суттєвою особливістю процесів анаеробної переробки в реакторі БГУ є чутливість до зміни температури в об'ємі субстрату. Тому як підсистеми термостабілізації виберемо підсистему конструктивних особливостей біореактора та підсистему теплогідродинамічних процесів термостабілізації. Також велике значення має процес підготовки біогазу до використання, тому

третьою підсистемою оберемо підсистему підготовки біогазу до використання в теплотехнічному обладнанні.

Кожну з підсистем можна розділити на модулі впливу, так, наприклад, модулі підготовки сировини, розділення, перемішування, відбору кінцевого продукту відносяться до підсистеми конструктивних особливостей біореактора. Процеси інтенсифікації теплообміну, вибору оптимальних швидкостей, площ теплообміну, енергозабезпечення відносяться до підсистеми теплогідродинамічних процесів термостабілізації.

Модулі підготовки біогазу, розділення на складові, акумулювання та транспортування його відносяться до підсистеми підготовки біогазу до використання в теплотехнічному обладнанні. Підсистеми впливу будемо розглядати на прикладах запропонованих конструкцій БГУ, способів очищення біогазу, методик моделювання теплообміну при вимушеній конвекції в якості складових синтезу моделі термостабілізації БГУ.

Термостабілізаційні процеси в біореакторі викликають значну увагу у дослідників, бо дозволяють зменшити енерговитрати та отримати максимальну кількість біогазу з одиниці маси сировини при мінімальних витратах ресурсів. Процесів ресурсощадності можна досягати шляхом конструктивних змін біореактора, поліпшення умов теплообміну, підготовки сировини, зміни температурних режимів тощо.

Використання залежностей з інтенсифікації тепловіддачі до водяного середовища дозволяє досліджувати процеси тепловіддачі лише в першому наближенні в якості оцінних критеріїв. Для побудови замкненої моделі є необхідність у проведенні експериментальних досліджень.

3.2 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 [14]. Рециркуляція виробленого біогазу в зону теплообміну позитивно впливає на процес бродіння. Масове барботування є недоцільним, так як 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. 3.1) 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 корпуса 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.

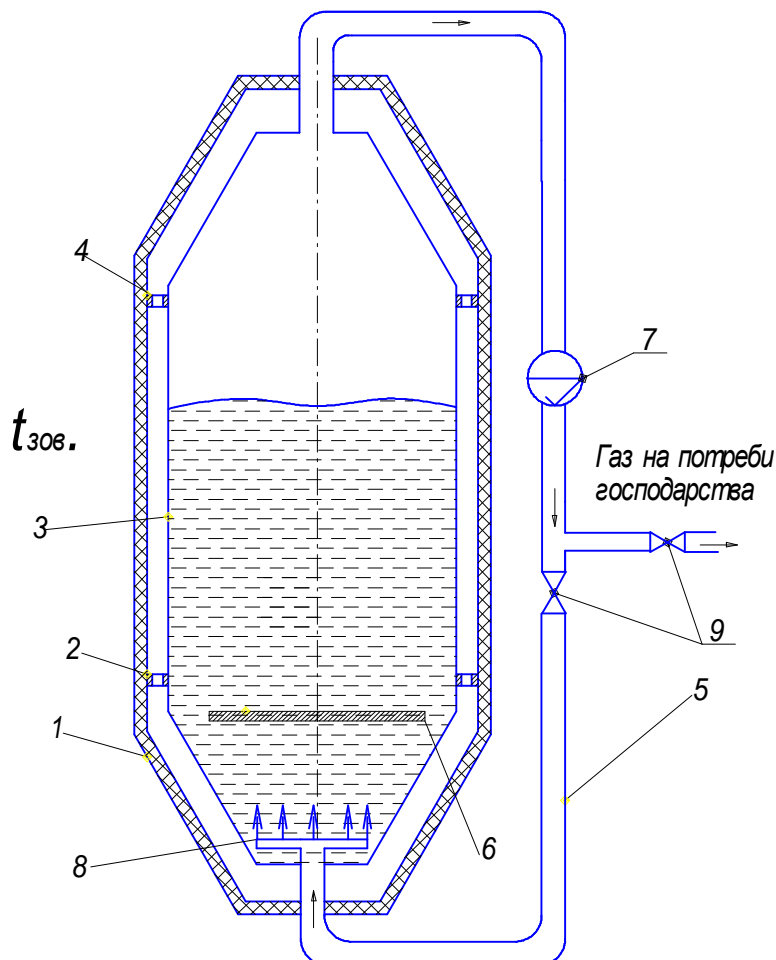


Рисунок 3.1- Біогазовий реактор з барботажною інтенсифікацією теплообміну

Процес вироблення біогазу протікає таким чином. В міру накопичення 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. 3.1) 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 відмітити, що інтенсивність тепловіддачі мало залежить від теплового потоку. Це можна пояснити незначним впливом вільної конвекції. 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 3.2 [8]. Необхідно відмітити, 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.

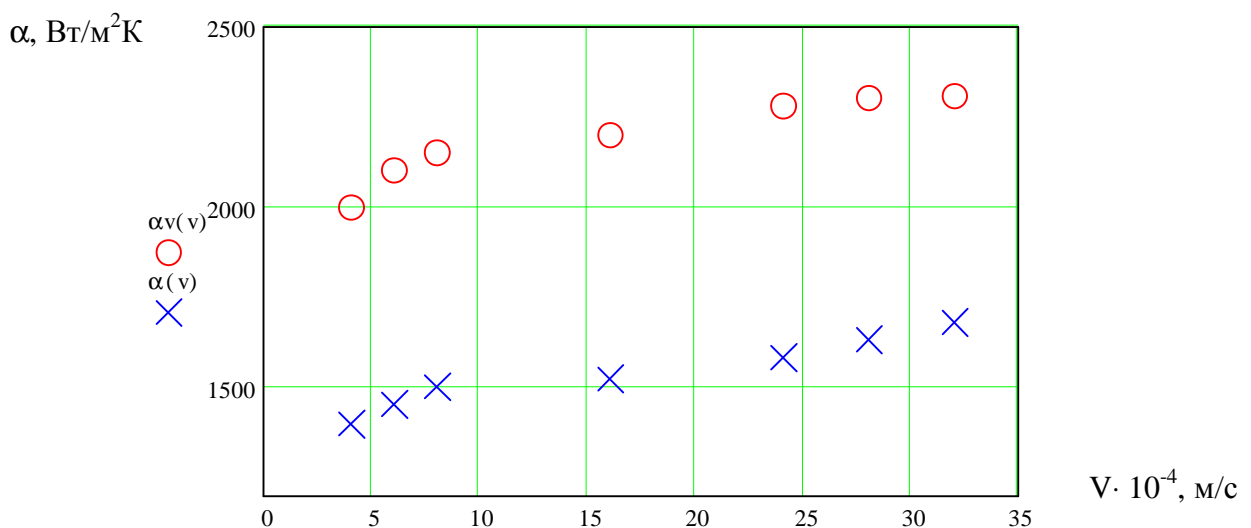


Рисунок 3.2 - **Залежність коефіцієнта тепловіддачі α від приведеної швидкості газорідного потоку в субстраті:**

X – середовище: суспензія $C=8\%$; O – середовище: вода; V- приведена швидкість газового потоку.

Як видно з рис. 3.2, коефіцієнт тепловіддачі для води більший, ніж для суспензії $C=8\%$ в 1,3-1,8 рази. Це обумовлено в'язкістю рідини, яка перешкоджає піднімальному руху бульбашок газу в середовищі [15-17].

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 рази (рис. 3.2). Безпосереднє барботування в каналі має ще більший вплив на

зростання коефіцієнта тепловіддачі, але даний спосіб є недоцільним для реальних умов технологічних реакторів, так як 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 газорідинної фази (w_r), температури рідини (t_p), побудовано залежність впливу відстані від краю ділянки газорідинного омивання на відношення $b = \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\text{вк}}}$ (рис. 3.3), 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.

b

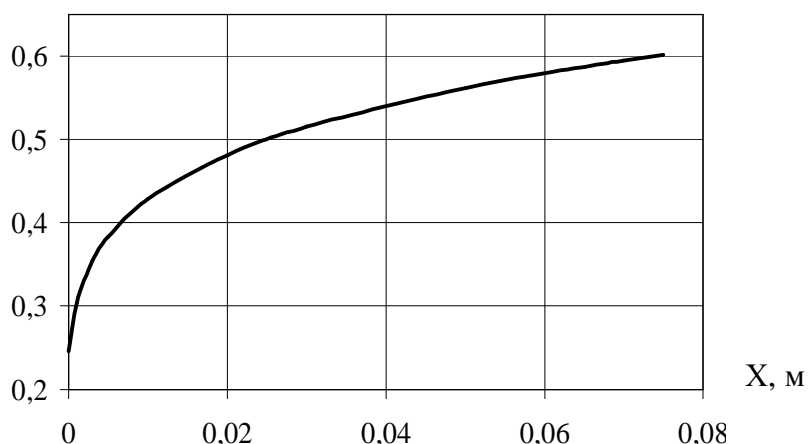


Рисунок 3.3 - Розрахункові значення відношення температурних напорів при значеннях параметрів : $q = 7,6 \text{ кВт/м}^2$; $w_r = 0,052 \text{ м/с}$; $t_p = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Згідно з рис. 3.3 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 газорідинного середовища.

Використання повітряного прошарку між утепленим корпусом та робочим резервуаром дозволить підвищити термічний опір стінки біореактора в середньому в 1,4-1,6 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 3.1), порівняно з звичайною конструкцією реактора.

3.3 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. 3.4) [18]. 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 3.4), 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 відводу 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 [19-20]. Біореактор (рис 3.5) 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 завантажується 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.

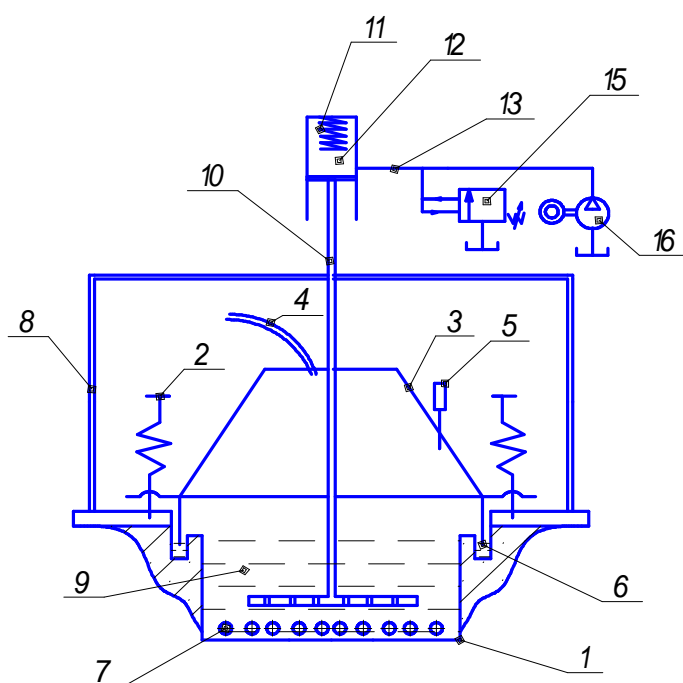


Рисунок 3.4 – Біореактор з віброактивацією анаеробного бродіння

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. Теплообмінні процеси між теплообмінним пристроєм та середовищем описуються рівняннями (3.1-3.3). При вібрації середовища високочастотною малоамплітудною хвилею навколо теплообмінних при-

строїв циліндричної форми розрізняють два випадки організації конвекції [2].

В першому випадку коливання потоку направлені вертикально і збігаються з напрямом природної конвекції. Для малих амплітуд та критеріїв Прандтля $Pr \leq 1$ критеріальні рівняння для середньої тепловіддачі згідно з [21] мають вигляд:

$$Nu^2 = 0.4 \cdot Re_v \cdot Pr + \sqrt{Re_v^2 \cdot Pr^2 + \frac{1}{25} \cdot Pr \cdot Gr}, \quad (3.1)$$

де Re_v – коливальне число Рейнольдса, яке визначається

$$Re_v = \frac{\Delta u^2}{\omega \cdot \nu}, \quad (3.2)$$

де Δu – швидкість коливання;

ω – колова частота;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості субстрату;

Pr – критерій Прандтля;

Gr – критерій Грасгофа.

В другому випадку коливання потоку направлені перпендикулярно площині симетрії спрямування вільної конвекції. Така схема призводить до додаткової турбулізації граничного шару. Для малих амплітуд та критеріїв $Pr \leq 1$ критеріальне рівняння для середньої тепловіддачі має вигляд:

$$Nu = 2.18 \cdot (Re_v \cdot Pr)^{0.25} \cdot Gr^{0.278}. \quad (3.3)$$

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 резервуару визначається таким чином:

$$u = \frac{V_0}{V}, \quad (3.4)$$

де V_0 – вихід біогазу при стандартному циклі бродіння;

V – вихід біогазу в реакторі запропонованої конструкції,

u – 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 $u=1,8-2,2$ рази залежно від виду субстрату.

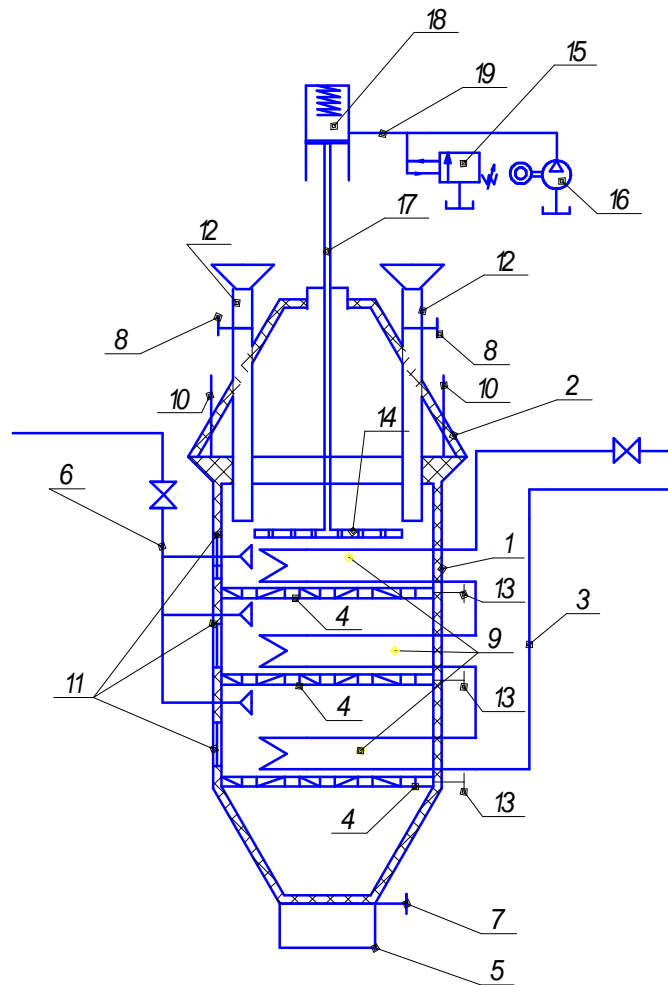


Рисунок 3.5- Секційний біогазовий реактор з віброінтенсифікацією бродіння

Тобто з кожного кілограма органічної речовини за рахунок секційності буде виділятися додатково $0,35-0,4 \text{ м}^3$ 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 $0,4-0,45 \text{ м}^3$ з кожного кілограма органічної речовини нової порції.

Затрати енергії на вібраційне перемішування середовища субстрату для реактора об'ємом до 500 м^3 складають $40-60 \text{ Вт/м}^3$.

Модифікацією секційного біореактора з вібраційною інтенсифікацією бродіння є реактор, який показано на рис 3.6.

Пристрій 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. Після чого 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 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 14.

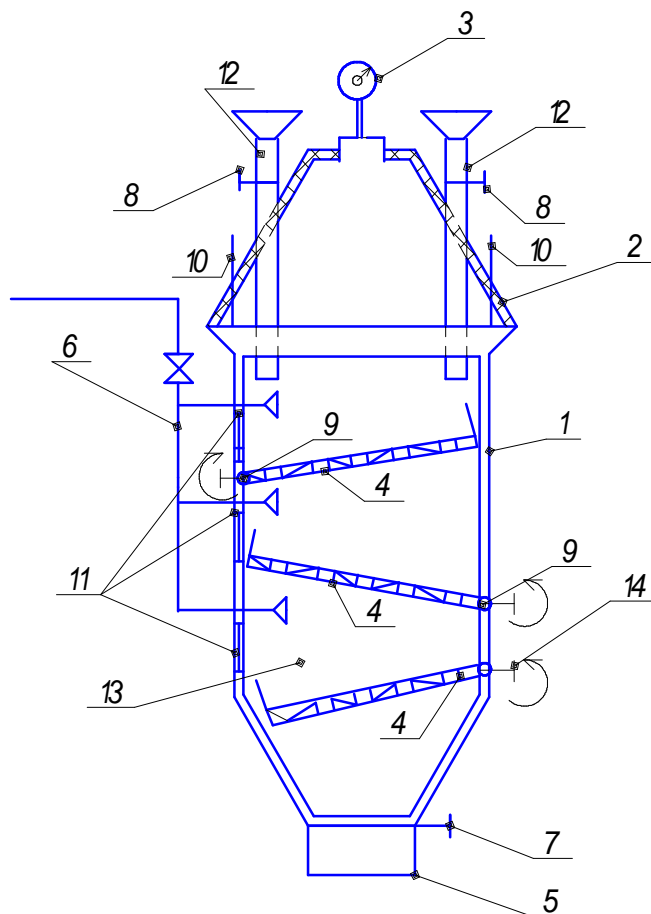


Рисунок 3.6 - Біогазовий реактор з віброінтенсифікацією бродіння, що секційно регулюється

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.

Контрольні питання

1. Що таке термостабілізація роботи БГУ?
2. Для чого потрібна інтенсифікація теплообміну між нагрівником і субстратом?
3. Які способи інтенсифікації теплообміну ви знаєте?
4. Наведіть властивості барботажної інтенсифікації.
5. Наведіть властивості вібраційної інтенсифікації.
6. Виконайте порівняльну характеристику способів інтенсифікації теплообміну
7. Як впливає в'язкість субстрату на теплообмін при вільній конвекції?
8. Як впливає вологість субстрату на теплообмін при вільній конвекції?
9. Яка зона впливу струменів газу при локальному газорідному омиванні теплообмінної поверхні?

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 безперервного 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 обертання пластини активатора. Для контролю і управління параметрами анаеробного бродіння в біореакторі пропонується така схема управління (рис 4.1) [22]. Управління за даною схемою можливе в реакторі з інтенсифікацією теплообміну, запропонованому авторами (рис. 3.4-3.5). Температура субстрату відслідковується датчиками t_2 , t_3 , t_4 , температура поверхні нагрівника - датчиком t_1 . За

даними датчика t_1 сервопривод триходового клапана на подачі теплоносія на нагрівник регулює ступінь підмішування зворотного теплоносія.

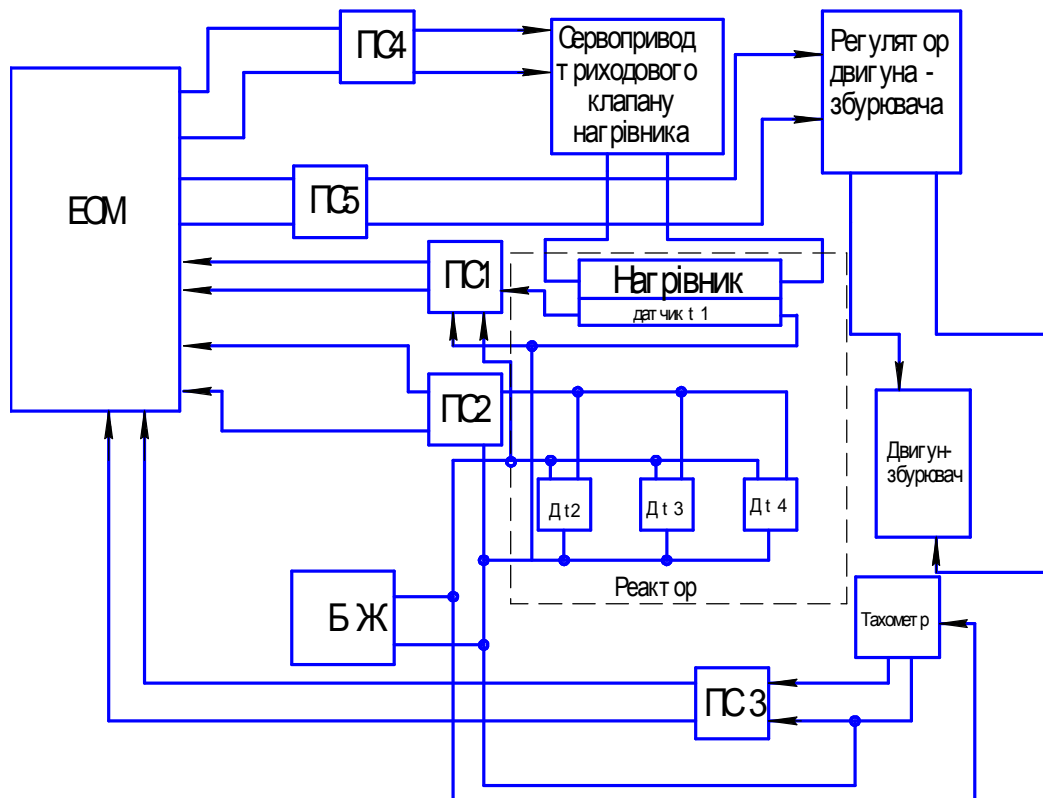


Рисунок 4.1 - Схема автоматичного управління параметрами анаеробного бродіння: Ж – блок живлення, t_1 , t_2 , t_3 , t_4 – датчики температури, ПС1-ПС5 – пристрої спряження.

За показами всіх температурних датчиків згідно з 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.

На рис 4.2 наведено схему об'язки нагрівального елемента біореактора: 1 - спускник води, триходовий клапан з сервоприводом “BELIMO”; 3 - перепускний диференційний клапан, 4 – циркуляційний насос “WILO”; 5 – вентиль шаровий, 6 – автоматичний спускник повітря. Схема об'язки виконана з байпасною лінією і двома контурами циркуляції – малим і великим. У випадку, коли температура нагрівника і середовища стає більшою за необхідну, триходовий клапан підмішує оборотну воду у подачу. Коли температура поверхні нагрівника і субстрату

починає падати - клапан працює на проточію. Для спускання води при необхідності відключення системи слугують спусники 1.

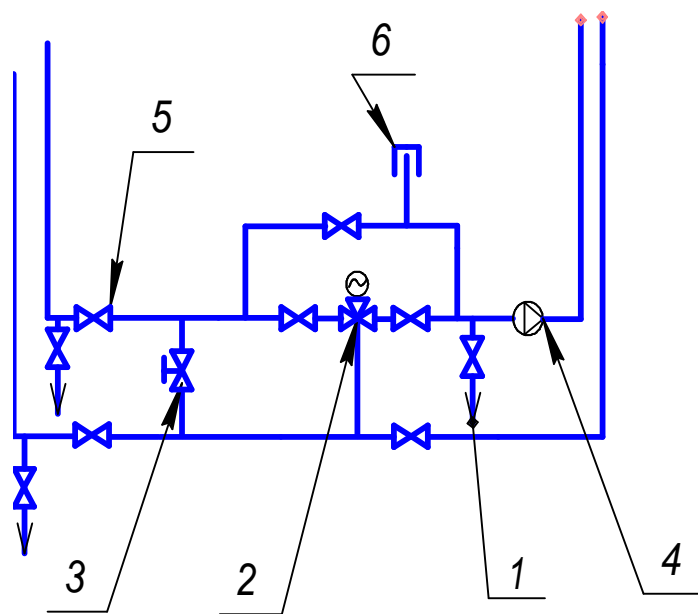


Рисунок 4.2 - Схема обв'язки нагрівального елемента біореактора

Для запобігання утворення повітряних пробок встановлено автоматичний повітроспусник. Для недопущення 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 відбувається за допомогою датчика t_1 . Коли температура на ньому знижується до $+10...+15$, подається сигнал на закривання сервоприводом клапана. 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 інтенсифікації теплообміну вибрано спосіб вібрації середовища, що в окремих випадках дозволяє збільшити тепловіддачу у десятки разів. Вібрація середовища чи 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.

Згідно з [21] рівняння, що узагальнює відносний коефіцієнт тепловіддачі через розмірні величини, апроксимується виразом

$$K = \frac{a}{a_0} = 2,67(d)^{0,25} \cdot (\Delta T)^{1/12} \cdot (\Delta A \cdot f)^{2/3}, \quad (4.1)$$

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 S ,

ΔA – амплітуда коливань нагрівального елемента, мм;

f – частота коливань нагрівального елемента, Гц.

4.2 Підготовка біогазу для використання в теплотехнічному обладнанні

Вироблення та використання біогазу не тільки як паливо, 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 [23] на біогаз метантенків вимагають зниження вмісту H_2S до $0,2 \text{ г/м}^3$.

Біогаз містить баластові і шкідливі домішки, здатні отруювати каталізатори, викликати корозію і забруднення апаратури. Для видалення цих домішок газ піддається очищенню. При виробленні біогазу його очищають від сірчистих з'єднань, 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 [24-27].

Основні властивості забруднювачів біогазу такі:

Діоксид вуглецю (вуглекислий газ, діоксид вуглецю, вуглекислота) – це кислотний оксид, що здатний 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 часток.

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.

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;
- окисно-адсорбційний метод очищення газів від сірководню.

4.2.1 Водневе очищення під тиском від сірководню та діоксиду вуглецю

Спосіб очищення 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 дуже 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:

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

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°C . 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), поглинених одним об'ємом води. 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. 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. Для очищення біогазу від домішок можна використовувати газопромивач, схема якого наведена на рисунку 4.2

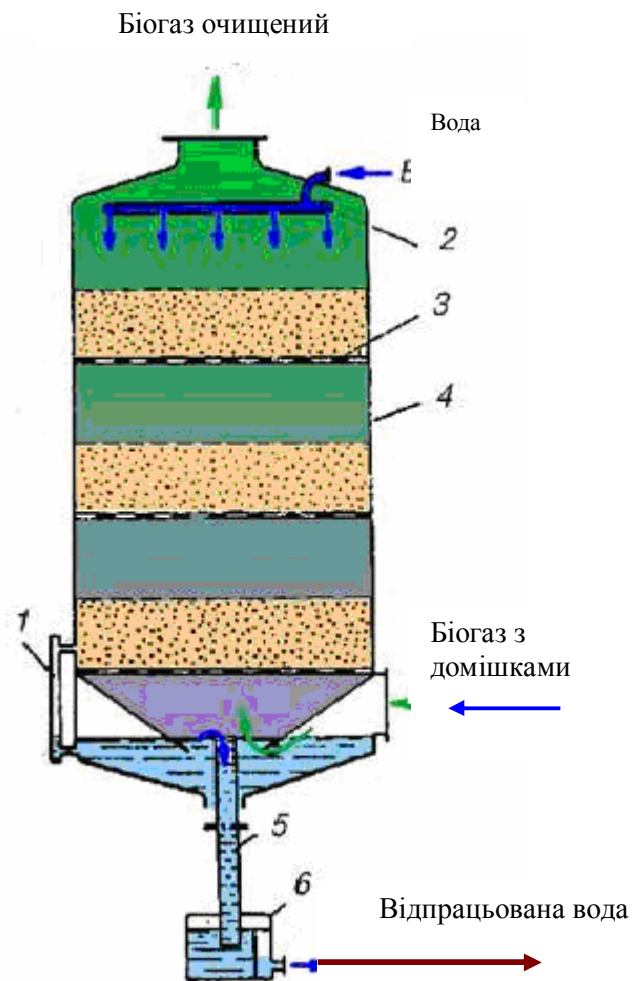


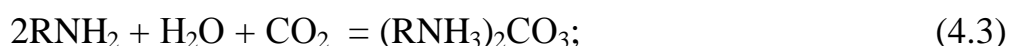
Рисунок 4.2 – Газопромивач біогазу

1 - водомірне скло; 2 - розподільник; 3 - колосникові решітки; 4 - чавунні царги; 5 - переливна труба; 6 - збирач

Вибір тиску для водяного очищення від CO₂ залежить від декількох факторів. Зі збільшенням тиску зростає розчинність вуглекислого газу у воді і зменшується кількість води, необхідної для промивання, майже обернено пропорційно тиску. При цьому знижується витрата енергії на подачу води. З іншого боку, робота стиску 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 CO₂.

4.2.2 Очищення газів від вуглекислого газу та сірководню розчинами етаноламінів

Для очищення газу від CO₂ застосовують розчини етаноламінів (аміноспиртів), що мають лужні властивості і при взаємодії з кислотами утворюють солі. Використовують водяні розчини етаноламіна CH₂OH-CH₂-NH₂, діетаноламіна (CH₂OH-CH₂)₂NH і триетаноламіна (CH₂OH-CH₂)₃N. Найсильнішою основою серед етаноламінов є моноетаноламін, що знайшов широке застосування в промисловості для очищення газів. При абсорбції CO₂ 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 CO₂ і H₂S. Взаємодією етаноламіну RNH₂ (де R - група CH₂OH-CH₂) 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 CO₂ і H₂S розчинність кожного компонента зменшується. Незважаючи на те, що поглинальна здатність розчину етаноламіна відносно H₂S у присутності CO₂ знижується, коефіцієнт абсорбції H₂S значно вищий, ніж CO₂, і можлива вибіркова абсорбція сірководню з газу, що містить діоксид вуглецю. Поглинальна 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 випарюванням з розчину води.

У процесі етаноламінового очищення газу від CO_2 протікають побічні реакції, які викликають необоротні 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 розчинам 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 вуглеродистої сталі. Тому необхідно застосовувати якомога чистіший моноетаноламін і систематично піддавати очищенню поглинальний розчин шляхом його перегонки в присутності 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 таблиці 4.1

Таблиця 4.1- Фізико-хімічні властивості МЕА і МДЕА

Показники	МЕА	МДЕА
Формула	$\text{HOC}_2\text{H}_4\text{NH}_2$	$(\text{HOC}_2\text{H}_4)_2\text{CH}_3\text{N}$
Молекулярна вага	61,1	119,2
Щільність 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) полягає в меншій корозійній активності, що дозволяє застосовувати концентрованіші розчини МДЭА (30-50% мас.) 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 біогазів від діоксиду вуглецю гарячим розчином поташу

Водяні розчини карбонатів натрію і калію поглинають діоксид вуглецю з утворенням бікарбонатів. У водяному розчині карбонат дисоціює на іони:



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. У даному 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. З іншого боку, підвищення температури сприяє збільшенню швидкості гідратації. Тому зростає швидкість 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 CO_2 .

Таким чином, зазначені фізико-хімічні особливості процесу очищення дозволяють проводити абсорбцію і регенерацію майже при однаковій температурі, причому 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 $20 - 35 \text{ м}^3 \text{ CO}_2/\text{м}^3$. Одноступінчасте очищення гарячим розчином поташу дозволяє досягти залишкового вмісту в очищеному газі $0,5 - 0,6\% \text{ CO}_2$ (грубе очищення газу).

Для виконання поташного очищення використовують різні пристрої (рис 4.3).

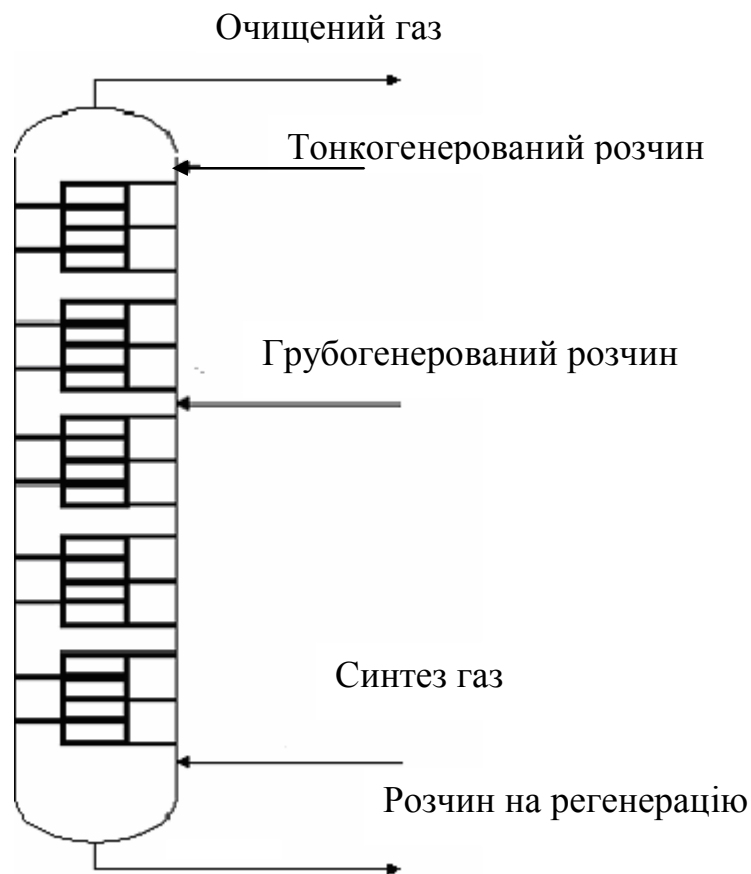


Рисунок 4.3 - Абсорбер ДО-100 поташного очищення біогазу

Підвищення температури до 100°C в процесі абсорбції недостатньо 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 CO_2 при максимальному насиченні до моменту появи твердої фази KHCO_3 , ніж відповідні для даної концентрації калію звичайні поташні розчини. Ця кількість CO_2 збільшується з підвищенням змісту миш'яку. Найбільше зростання швидкості абсорбції CO_2 спостерігається при концентрації As_2O_3 до 30 г/л. У цих умовах швидкість абсорбції в 2,7 рази вище, ніж у неактивованих поташних розчинах. Гарячі розчини поташу викликають корозійне руйнування вуглеродистої сталі. Тому в розчини додають інгібітори, а для виготовлення найвідповідальніших вузлів і деталей (насосів, клапанів і ін.) застосовують спеціальні нержавіючі сталі.

В абсорбері ДО-100 продуктивністю 65 тис. $\text{м}^3/\text{год}$ при тиску 1 МПа здійснюється очищення синтезу-газу (CO_2 - 18%) від CO_2 методом двопотокової подачі розчину поташу. Концентрація KHCO_3 у тонкогенерованому розчині підтримується не менше 7-10%, у грубогенерованому 12-18%. Норма вмісту CO_2 в очищеному газі не більше 1,0% .

4.2.4 Лужне очищення біогазу від вуглекислого газу

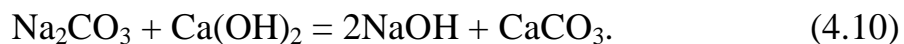
Очищення газів від CO_2 водяним розчином їдкого натрію NaOH засновані на необоротній реакції:



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:



Процес проходить у рідкій фазі при 90 - 95 °С і при перемішуванні. Установка регенерації лугу вапном є громіздкою і процес недостатньо задовольняє сучасним санітарно - гігієнічним вимогам (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% - ї каустичної соди (залежно від концентрації CO₂ у вихідному газі). На регенерацію відпрацьованого розчину лугу витрачається 9 кг CaO і 30 кг пари при тиску 0,5 МПа.

4.2.5 Очищення біогазу від діоксиду вуглецю методом низькотемпературної абсорбції метанолом

В інтервалі температур від (-30) до (-60)°С и при тиску 1-3 МПа метанол є ефективним абсорбентом не тільки діоксиду вуглецю, але і сірководню та деяких інших домішок, що є присутніми 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 витратами 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 змісті. Незважаючи на необхідність застосування холодильної машини, енергетичні витрати в описаному процесі не перевищують витрати енергії при промиванні газу водою.

4.2.6 Біокаталітична безреагентна технологія очищення від сірководню біогазу

Безупинна технологія очищення біогазів ґрунтується на хімічних реакціях, що протікають у рідкій фазі, фізичній абсорбції і наступній хімічній конверсії. Вона має 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 4.4).

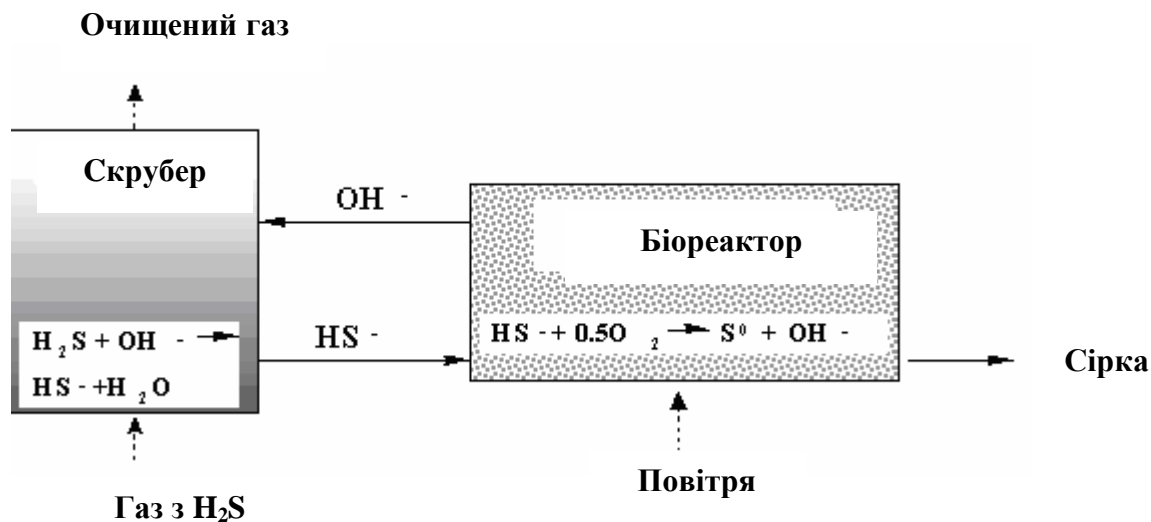


Рисунок 4.4 – Схема біокаталітичної безреагентної технології очищення від сірководню біогазу

У скрубери сірководень взаємодіє зі слабколужним розчином (рН 8.0-8.5), в якому відбувається абсорбція H₂S. Потім рідина зі скрубера надходить у мікроаеробний реактор, що містить іммобілізовані клітини бактерії *Thiobacillus*, які у м'яких умовах окисляють сульфід до елементарної сірки з регенерацією слабколужної рідини для повернення в скрубери. Елементарна сірка видаляється і рідина повертається в скрубери для абсорбції наступної порції H₂S.

Переваги запропонованої технології порівняно з традиційними методами:

- практично безреагентний характер (необхідні тільки деякі солі для життєдіяльності бактерій);
- дешевина;
- 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)°С і нормальному тиску.

4.2.7 Окисно-адсорбційний метод очищення біогазу від сірководню

Технологія очищення біогазу від сірководню ґрунтується на використанні окисно-адсорбційного методу з застосуванням активованого вугілля. Метод дозволяє проводити очищення біогазу з низьким вихідним

вмістом сірководню (від 3-6 г/м³ і менше) до залишкового вмісту сірководню в очищеному газі, рівного 0,2-1,0 мг/м³; у тому числі і для газів з високим змістом діоксиду вуглецю. Ступінь очищення складає 99-100 %.

Орієнтовані видаткові коефіцієнти на очищення 1000 м³ газу наведені нижче:

- електроенергія	2,0-3,0 кВт-год;
- пара	70-150 кг;
- вода	1,0-2,0 кг;
- реагенти	0,15 кг;
- активоване вугілля	0,1 кг.

Окисно-адсорбційний метод очищення біогазу від сірководню має наступні переваги:

- компактність технологічної установки;
- можливість одержання товарної сірки;
- можливість регулювання ступеня очищення газу від сірководню до необхідного рівня;
- можливість регенерації і повторного використання активованого вугілля.

Технологічну схему очищення біогазу від сірководню окисно-адсорбційним методом наведено на рис 4.5.

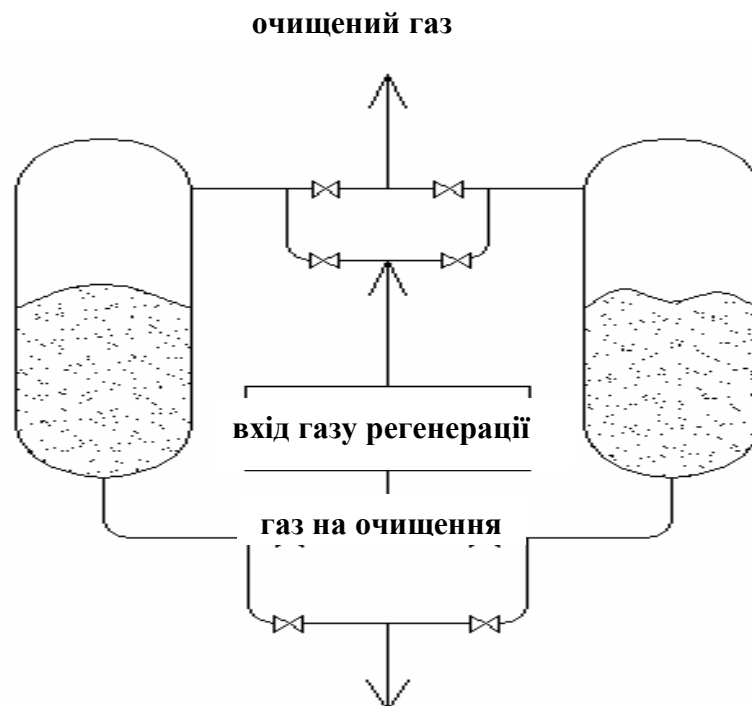


Рисунок 4.5 – Технологічна схема очищення окисно-адсорбційним методом біогазу від сірководню

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 [28]. Досягти високої продуктивності БГУ можливо при комплексному поєднанні всіх інноваційних рішень. Авторами запропоновано принципову енергозберігаючу технологічну схему з виробництвом біогазу (рис 4.6), яка втілює всі попередні рекомендації. На рис. 4.6 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. В міру накопичення в резервуарі 15 (рис.4.6) 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.

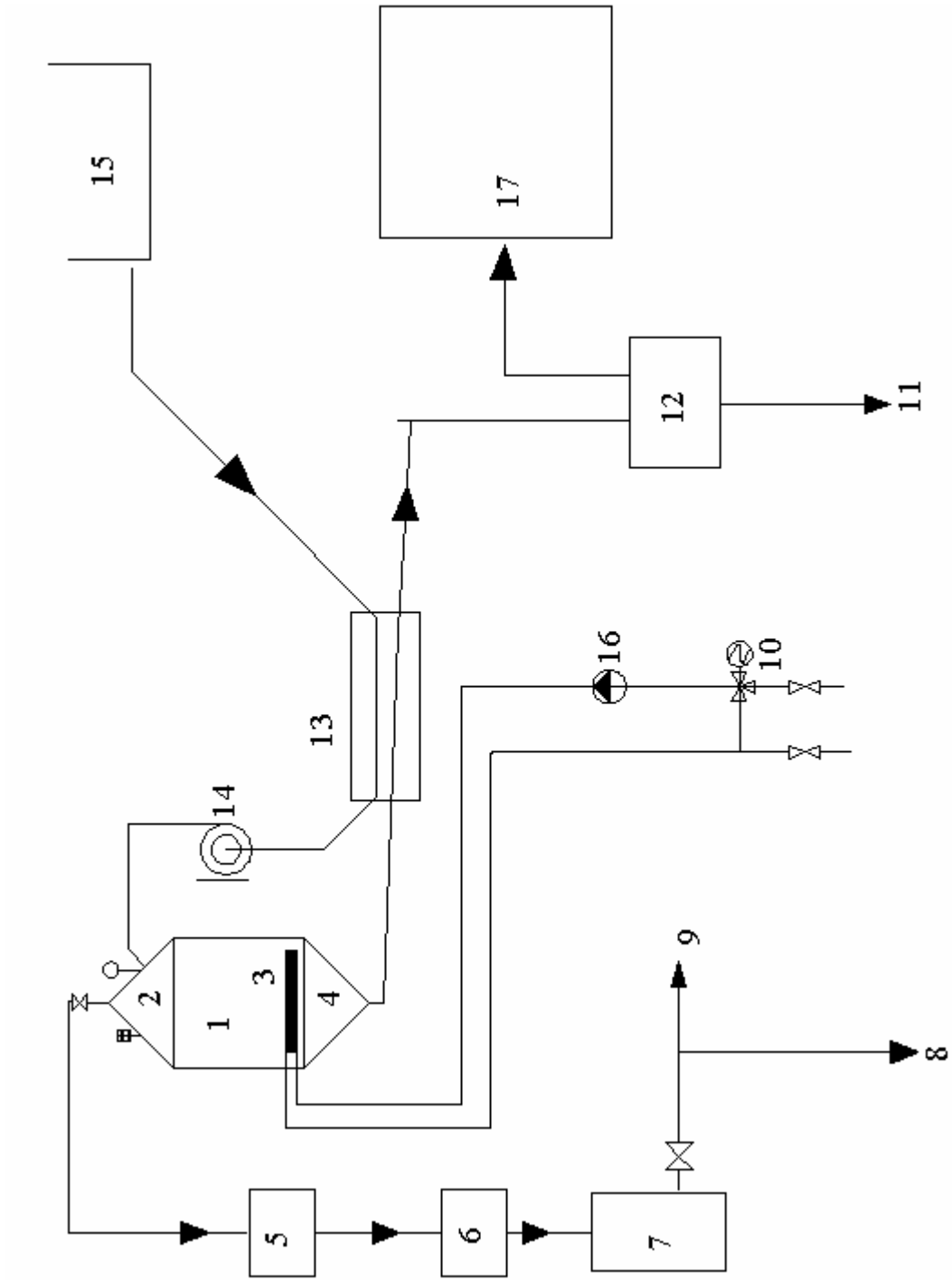


Рисунок 4.6- Технологічна схема вироблення біогазу

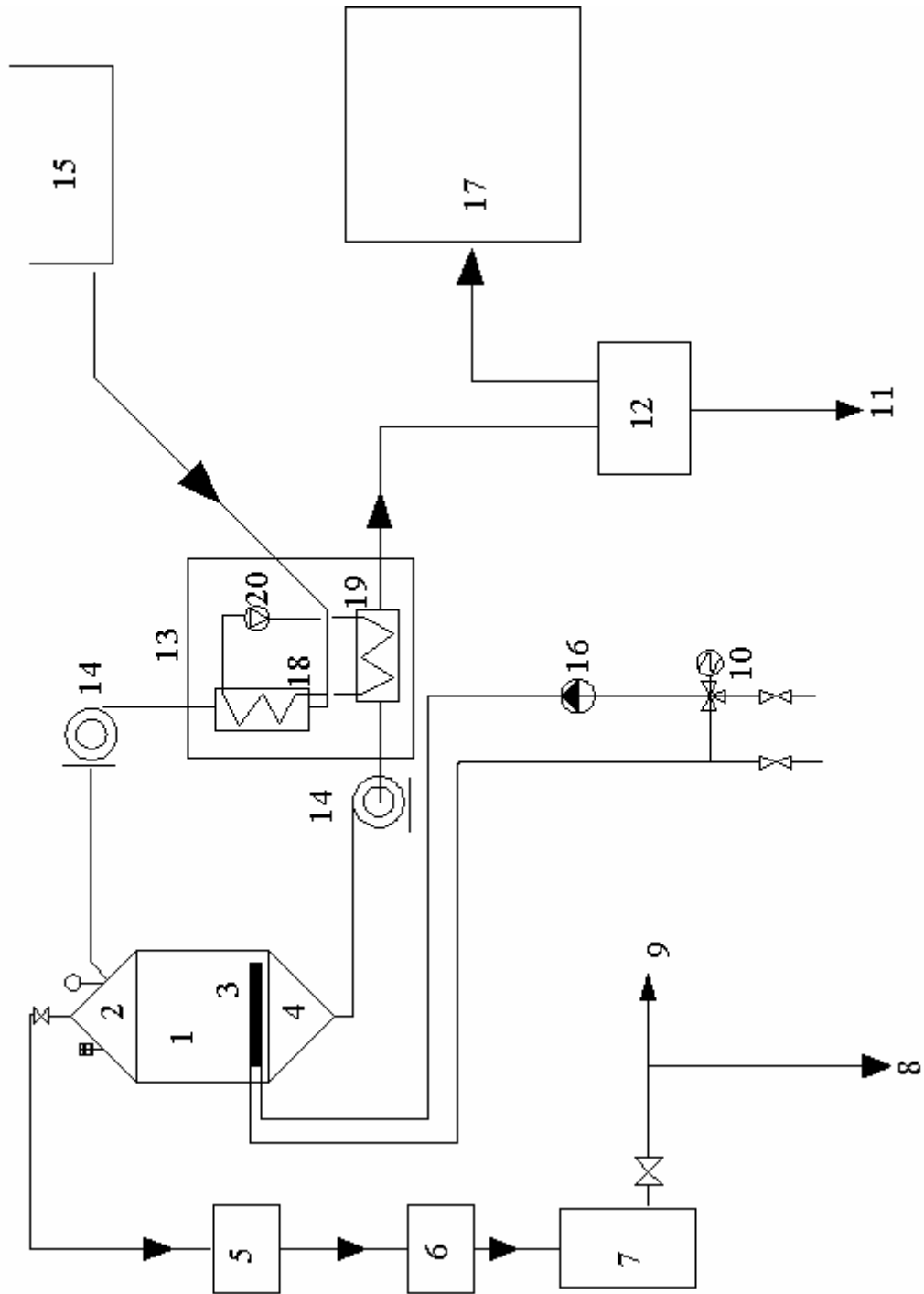


Рис. 4.7- Технологічна схема БГУ з утилізацією теплоти за допомогою теплового насоса

В міру свого накопичення 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 поступає в реактор, і тою, що його покидає, досягає $\Delta=20^{\circ}\text{C}$. В зимовий дана різниця досить значна і може становити $\Delta=40-50^{\circ}\text{C}$. 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 4.7

На рисунку 4.7 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 теплопостачання 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 більше глибокої рекуперації тепла. На рис. 4.8 зображено в розрізі пароконденсаторний тепловий насос фірми VISSMANN “Vitocal 100”. Первинний контур — вода, вторинний контур — вода. Номінальна теплова потужність 6,3 – 106,8 кВт.

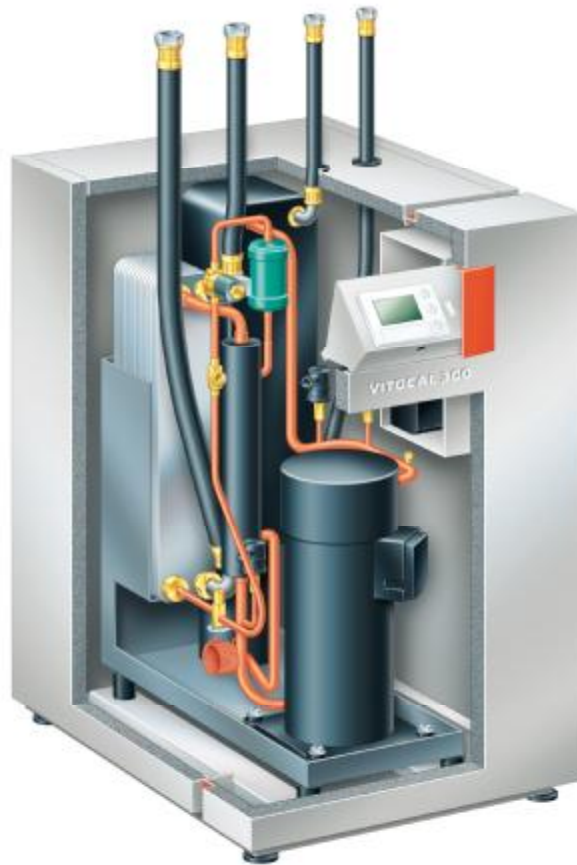


Рисунок 4.8 – Парокомпресійний тепловий насос Vitocal 100

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:

Енергоносії	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

Автоматичному управлінню технологічними процесами біогазових реакторів в 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.

Для створення експертно-моделювальної системи для багатофакторного аналізу процесів управління біореакторами використаний математичний апарат, що базується на теорії нечіткої логіки [29-31]. Цей метод, як взаємопов'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.

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

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

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 "конструктивне виконання";
 y_2 - ЛЗ "термічний опір стінки реактора";

z_3 - ЛЗ "якість автоматизованого управління";

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 (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 – об'єктивна теплообмінника,

q_2 - барботування,

q_3 - віброактивація.

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

де u_1 – частота вібрацій,

u_2 -амплітуда вібрацій.

За результатами аналізу сукупності співвідношень (4.11)...(4.16) побудовано дерево логічного висновку. Корінь дерева логічного висновку відповідає величині ефекту виходу біогазу, а висячі вершини - факторам, що впливають на його величину (рис 4.9).

Оцінка значень лінгвістичних змінних, які наведені 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. Для лінгвістичних змінних оціночні терми наведено в табл. 4.3

Таблиця 4.3 - Фактори як лінгвістичні змінні

Параметр	Позначення й назва змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки
1	2	3	4
Тип і якість сировини	x_1 - тип сировини	(1...3), у.о.	низька(н), середня (ср), висока (в)
	x_2 - подрібненість	(0,01-1), мм	здрибно(зд), нездрибно(нз)
	x_3 -вологість сировини	(80...98), %	низька(н), нормальна(нр), висока(в)

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4
Конструкція біореактора	у ₁ -конструктивне виконання	(1...3) у.о	циліндричний (ц) траншейного типу (тр) кулеподібний (к)
	у ₂ - термічний опір стінки реактора	(1,0-3,0), м ² ×°C/Вт	низька(н), помірна(п) висока (в)
	у ₃ - якість автоматизованого управління	(1...4) у.о.	низька(н), помірна(п) висока (в)
Стабільність режиму	z ₁ - градієнт температур	(0...30) Δt, °C	низький(н), задовільний(з), високий(в)
	z ₂ - інтенсифікація теплообміну	$K = \frac{Nu}{Nu_0} = 1.5...5$	низька(н), середня(ср), висока(в)
	z ₃ - тип теплообмінника	(1...2) у.о.	вмонтований(вм) трубчастий(тр)
	q ₁ - оребрення	(1...30), мм.	відсутнє(в), середнє (с), високе(вс)
	q ₂ - барботування	$V_{\text{прив}} (0...40) 10^{-4},$ м ³ /м ² ·с	відсутнє (в), середнє (с), високе(вс)
	q ₃ - віброактивація	$K = \frac{Nu}{Nu_0} = 0...5$	відсутнє (в), середнє (с), високе(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)

У табл. 4.3 використано такі позначення: у.о. - умовні одиниці, Δt – різниця температур між температурою стінки і температурою субстрату, $K = \frac{Nu}{Nu_0}$ - відношення критерію Нусельта при активації

теплообміну і при вільній конвекції. $V_{\text{прив}}$ - приведена швидкість барботування.

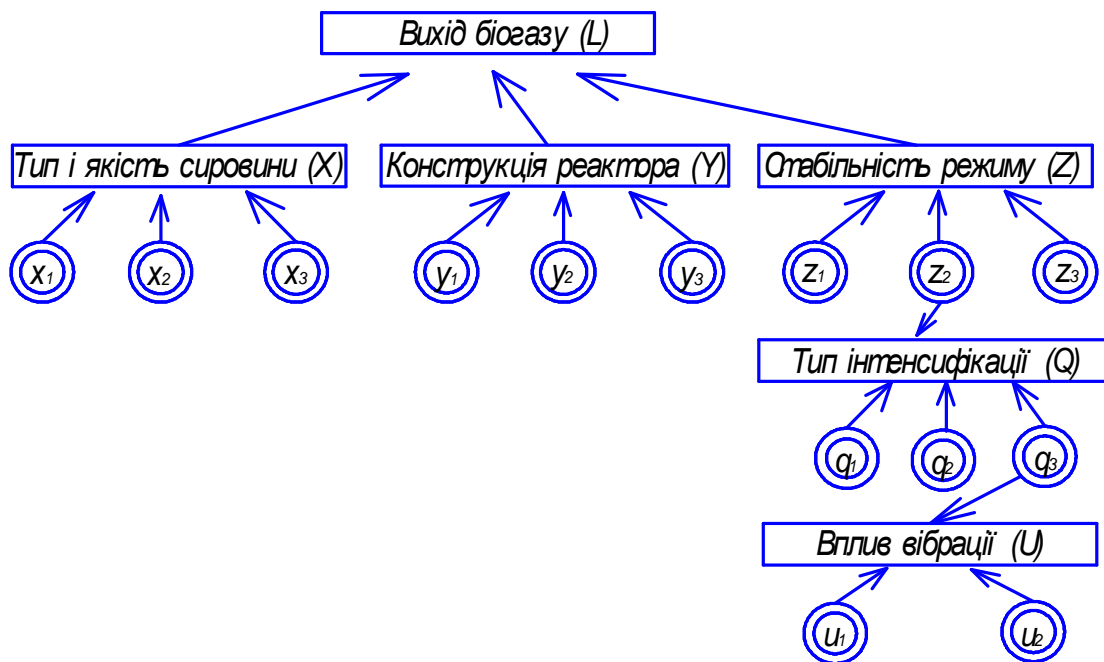


Рисунок 4.9 - Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на прийняття рішень з управління механізмами підвищення продуктивності біореакторів

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 даних систем [3-5]. 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. 4.4).

Нечітка множина, за допомогою якої формалізується терм \mathcal{S} , є сукупністю пар:

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

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 $u_i \in U$ до нечіткої множини \mathcal{S} .

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

Таблиця 4.4 - База знань про співвідношення (4.11)

ЯКЦО			ТО
Вплив типу і якості сировини (X)	Вплив конструкції реактора (Y)	Вплив стабільності режиму (Z)	Вихід біогазу (L _{вих})
Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)
Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	
Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Нижче середнього (нС)
Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	
Середні (С)	Середні (С)	Середні (С)	Середній (С)
Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	
Середні (С)	Середні (С)	Середні (С)	Вище середнього (вС)
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	
Середні (С)	Середні (С)	Середні (С)	Вище середнього (вС)
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	
Високі (В)	Високі (В)	Високі (В)	Високий (В)
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	
Високі (В)	Високі (В)	Високі (В)	

Лінгвістичним висловлюванням, що наведені в табл. 4.4, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідними термами:

$$\begin{aligned} \mu_n(L_{\text{вих}}) = & \mu_n(X) \wedge \mu_n(Y) \wedge \mu_n(Z) \vee \mu_{nC}(X) \wedge \\ & \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z), \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(L_{\text{вих}}) = & \mu_n(X) \wedge \mu_n(Y) \wedge \mu_n(Z) \vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \mu_c(X) \wedge \\ & \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_c(Z), \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(L_{\text{вих}}) = & \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \mu_c(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_c(Z) \vee \mu_{vC}(X) \wedge \\ & \wedge \mu_{vC}(Y) \wedge \mu_{vC}(Z), \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} \mu_{vC}(L_{\text{вих}}) = & \mu_c(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_c(Z) \vee \mu_{vC}(X) \wedge \mu_{vC}(Y) \wedge \mu_{vC}(Z) \vee \mu_B(X) \wedge \\ & \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_B(Z), \end{aligned} \quad (4.21)$$

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

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язує вплив типу і якості сировини (X) на вихід біогазу з типом сировини (x_1), подрібненістю (x_2), вологістю (x_3) наведено в табл. 4.5

Таблиця 4.5 - База знань про співвідношення (4.12)

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

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

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

$$\mu_{нС}(X) = \mu_n(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_v(x_3) \vee \mu_{ср}(x_1) \wedge \mu_{нз}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \mu_{нз}(x_2) \wedge \mu_n(x_3), \quad (4.24)$$

$$\mu_C(X) = \mu_n(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_{ср}(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_v(x_3) \vee \mu_{ср}(x_1) \wedge \mu_{нз}(x_2) \wedge \mu_n(x_3), \quad (4.25)$$

$$\mu_{\text{BC}}(X) = \mu_n(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_{ср}(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_v(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3), \quad (4.26)$$

$$\mu_B(X) = \mu_{ср}(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_v(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3). \quad (4.27)$$

Таким чином розробляються лінгвістичні висловлювання і відповідні системи нечітких логічних рівнянь для кожної змінної на всіх рівнях.

Таблиця 4.6 - База знань про співвідношення (4.14)

ЯКЩО			ТО
Градiєнт температур (z ₁)	iнтенсифiкацiя теплообмiну(z ₂)	Тип теплообмiнника (z ₃)	Стабiльнiсть режиму (Z)
Високий (в)	Низька (н)	Трубочастий (тр)	Низька (Н)
Високий (в)	Низька (н)	Вмонтований (вм)	
Високий (в)	Середня (ср)	Трубочастий (тр)	Нижче середньої (нС)
Задовiльний (з)	Низька (н)	Трубочастий (тр)	
Задовiльний (з)	Середня (ср)	Трубочастий (тр)	Середня (С)
Задовiльний (з)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	
Низький (н)	Середня (ср)	Трубочастий (тр)	Вище середнього (вС)
Задовiльний (з)	Висока(в)	Трубочастий (тр)	
Задовiльний (з)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	Висока (В)
Задовiльний (з)	Висока(в)	Вмонтований (вм)	
Низький (н)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	Висока (В)
Низький (н)	Висока(в)	Трубочастий (тр)	
Низький (н)	Висока(в)	Вмонтований (вм)	

Лiнгвiстичним висловлюванням, що наведено в табл. 4.6 вiдповiдає система нечiтких логiчних рiвнянь, якi характеризують поверхню належностi змiнних за вiдповiдним термом:

$$\mu_N(Z) = \mu_v(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3) \vee \mu_v(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3), \quad (4.28)$$

$$\mu_{нС}(Z) = \mu_v(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3) \vee \mu_z(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3) \vee \mu_z(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3), \quad (4.29)$$

$$\mu_C(Z) = \mu_z(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3) \vee \mu_z(z_1) \wedge \mu_v(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3), \quad (4.30)$$

$$\mu_{вС}(Z) = \mu_z(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3) \vee \mu_{з\partial}(z_1) \wedge \mu_v(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3), \quad (4.31)$$

$$\mu_B(Z) = \mu_n(z_1) \wedge \mu_v(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_v(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3). \quad (4.32)$$

Таблиця 4.7 - База знань про співвідношення (4.13)

ЯКЩО			ТО
Конструктивне виконання (y ₁)	Термічний опір стінки реактора (y ₂)	Якість автоматизованого управління (y ₃)	Вплив конструкції біореактора (Y)
1	2	3	4
траншейне (тр)	низький (н)	низька(н)	Низький (Н)
траншейне (тр)	середній (с)	низька(н)	
траншейне (тр)	середній (с)	середній (с)	Нижче середнього (нС)
циліндричний (ц)	низький (н)	середній (с)	
траншейне (тр)	середній (с)	середній (с)	
циліндричний (ц)	середній (с)	середній (с)	Середній (С)
кулеподібний(к)	середній (с)	середній (с)	
траншейне (тр)	середній (с)	високий (в)	
циліндричний (ц)	високий (в)	середній (с)	Вище середнього (вС)
кулеподібний(к)	високий (в)	середній (с)	
траншейне (тр)	високий (в)	високий (в)	
циліндричний (ц)	високий (в)	високий (в)	Високий (В)
кулеподібний(к)	високий (в)	високий (в)	

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

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

$$\mu_{nC}(Y) = \mu_{mp}(y_1) \wedge \mu_c(y_2) \wedge \mu_c(y_3) \vee \mu_c(y_1) \wedge \mu_n(y_2) \wedge \mu_c(y_3) \vee \mu_{mp}(y_1) \wedge \mu_c(y_2) \wedge \mu_c(y_3), \quad (4.34)$$

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

$$\mu_{vC}(Y) = \mu_c(y_1) \wedge \mu_v(y_2) \wedge \mu_c(y_3) \vee \mu_k(y_1) \wedge \mu_v(y_2) \wedge \mu_c(y_3) \vee \mu_{mp}(y_1) \wedge \mu_v(y_2) \wedge \mu_c(y_3), \quad (4.36)$$

$$\mu_v(Y) = \mu_c(y_1) \wedge \mu_v(y_2) \wedge \mu_v(y_3) \vee \mu_k(y_1) \wedge \mu_v(y_2) \wedge \mu_v(y_3). \quad (4.37)$$

В таблицю 4.8 зведемо логічні висловлювання, що стосуються факторів впливу на теплообмін: оребрення, барботування, віброактивація.

Таблиця 4.8 - База знань про співвідношення (4.15)

ЯКЩО			ТО
Оребрення (q ₁)	Барботування (q ₂)	Віброактивація (q ₃)	Інтенсифікація(Q)
Відсутнє (в)	Низьке(н)	Низьке(н)	Низький (Н)
Низьке(н)	Відсутнє (в)	Низьке(н)	
Низьке(н)	Низьке(н)	Відсутнє (в)	
Відсутнє (в)	Відсутнє (в)	Низьке(н)	Нижче середньої (нС)
Середнє (с)	Низьке(н)	Відсутнє (в)	
Низьке(н)	Середнє (с)	Відсутнє (в)	
Середнє (с)	Середнє (с)	Відсутнє (в)	Середній (С)
Високе (вс)	Відсутнє (в)	Відсутнє (в)	
Відсутнє (в)	Високе (вс)	Відсутнє (в)	
Середнє (с)	Високе (вс)	Відсутнє (в)	Вище середнього
Середнє (с)	Відсутнє (в)	Середнє (с)	(вС)
Високе (вс)	Відсутнє (в)	Середнє (с)	
Високе (вс)	Високе (вс)	Відсутнє (в)	Високий (В)
Середнє (с)	Середнє (с)	Високе (вс)	
Високе (вс)	Середнє (с)	Високе (вс)	

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

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

$$\mu_{nC}(Q) = \mu_v(q_1) \wedge \mu_v(q_2) \wedge \mu_n(q_3) \vee \mu_c(q_1) \wedge \mu_n(q_2) \wedge \mu_v(q_3) \vee \mu_n(q_1) \wedge \mu_c(q_2) \wedge \mu_v(q_3), \quad (4.39)$$

$$\mu_c(Q) = \mu_c(q_1) \wedge \mu_c(q_2) \wedge \mu_v(q_3) \vee \mu_{vc}(q_1) \wedge \mu_v(q_2) \wedge \mu_v(q_3) \vee \mu_v(q_1) \wedge \mu_{vc}(q_2) \wedge \mu_v(q_3), \quad (4.40)$$

$$\mu_{vC}(Q) = \mu_c(q_1) \wedge \mu_{vc}(q_2) \wedge \mu_v(q_3) \vee \mu_c(q_1) \wedge \mu_v(q_2) \wedge \mu_c(q_3) \vee \mu_{vc}(q_1) \wedge \mu_v(q_2) \wedge \mu_c(q_3), \quad (4.41)$$

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

Таблиця 4.9 - База знань про співвідношення (4.16)

ЯКЩО		ТО
Частота (u_1)	Амплітуда (u_2)	Віброінтенсифікація (q_3)
Низька(н)	Низька(н)	Низька (Н)
Низька(н)	Середнє (с)	
Середнє (с)	Низька(н)	Нижче середньої (нС)
Низька(н)	Висока (вс)	
Середнє (с)	Середнє (с)	Середня (С)
Високе (вс)	Низька(н)	
Середнє (с)	Висока (вс)	Вище середнього (вС)
Висока (вс)	Середнє (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:

$$\mu_n(q_3) = \mu_n(u_1) \wedge \mu_n(u_2) \vee \mu_n(u_1) \wedge \mu_c(u_2), \quad (4.43)$$

$$\mu_{nC}(q_3) = \mu_c(u_1) \wedge \mu_n(u_2) \vee \mu_n(u_1) \wedge \mu_{вс}(u_2), \quad (4.44)$$

$$\mu_c(q_3) = \mu_c(u_1) \wedge \mu_c(u_2) \vee \mu_{вс}(u_1) \wedge \mu_n(u_2), \quad (4.45)$$

$$\mu_{вс}(q_3) = \mu_c(u_1) \wedge \mu_{вс}(u_2) \vee \mu_{вс}(u_1) \wedge \mu_c(u_2), \quad (4.46)$$

$$\mu_v(q_3) = \mu_{вс}(u_1) \wedge \mu_{вс}(u_2). \quad (4.47)$$

Техніка нечіткого логічного висновку, що застосовувалася до інформації, яка зібрана на попередніх етапах, дозволяє обчислити показник, який прогнозується як нечіткі множини. Нечіткі множини визначають ступінь інтенсифікації теплообміну між нагрівником і середовищем для фіксованого вектора факторів, що впливають. Щоб перейти від отриманих нечітких множин до кількісної оцінки, необхідно виконати процедуру дефазифікації, тобто перетворення нечіткої інформації в чітку. Серед різних методів дефазифікації найпоширенішим є метод «Centroid» - центр тяжіння плоскої фігури, яка обмежена функцією належності нечіткої множини та горизонтальною координатою. Дефазифікацією нечіткої множини

$L = \sum_{i=1}^n m_A(u_i) / u_i$ за методом «Centroid» називається обчислення величини $L = \text{centroid} (L^0)$ за формулою

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

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

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 отримуємо ступені належності елементів $u_1 \dots u_3$ до терму «низька»

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

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

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

Аналогічно визначаємо матриці парних порівнянь для термів «середня» і «висока» та відповідні ступені належності. Результати наведено в табл. 4.11. Отримані результати функцій належності пронормовані 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																
низька	<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															
середня	<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															
висока	<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 поданий у вигляді таких нечітких множин:

- тип сировини «низька»

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

- тип сировини «середня»

$$= \left\{ \frac{0,5}{1}, \frac{1}{2}, \frac{0,63}{3} \right\};$$

- тип сировини «висока»

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

Нечіткі множини можна описати за допомогою графіків, які наведені на рис 4.10.

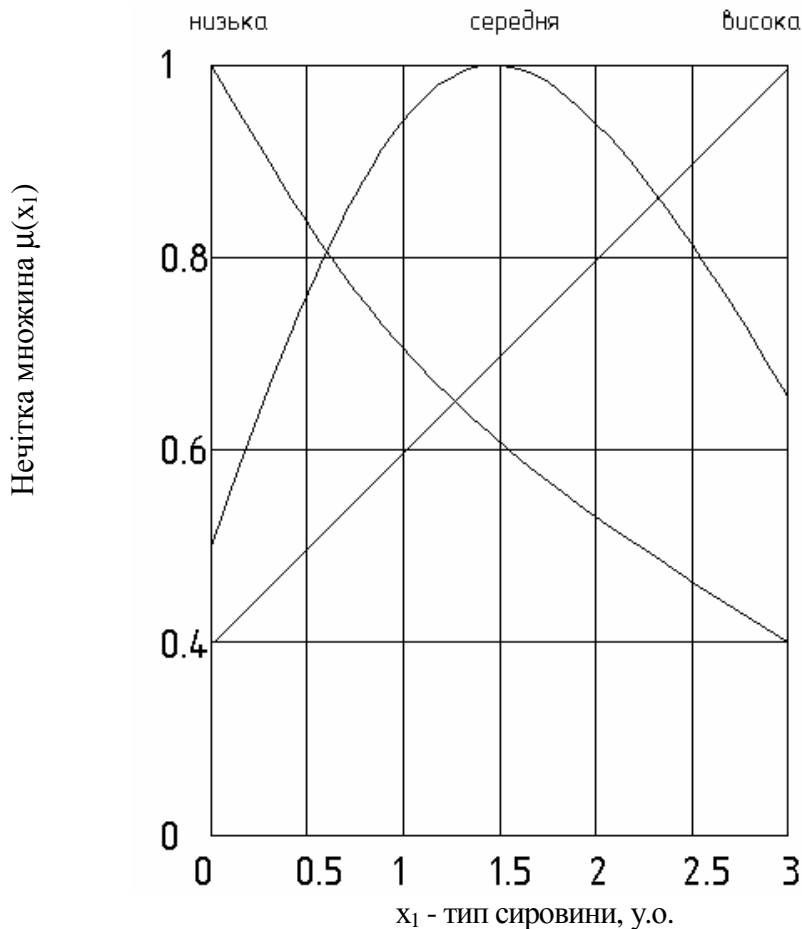


Рисунок 4.10 - **Функції належності для лінгвістичної змінної «тип сировини»**

Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень із управління технологічними механізмами підвищення продуктивності біогазових реакторів на базі теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної виконуються за допомогою розробленої структурної моделі прийняття рішень. Визначимо кількість біогазу, що може бути вироблена 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.;
- оребрення 1 мм – відсутнє;
- барботування $20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$;

- віброактивація $K=0$ - відсутня;
- частота коливань 0 Гц;
- амплітуда коливань 0 мм.

Для визначення продуктивності біореактора необхідно обчислити значення 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

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 %	$\mu_H(x_3)=0,4$ $\mu_H(x_3)=0,63$ $\mu_B(x_3)=1$	

Використовуючи аналітичні формули (4.23 – 4.27) та значення функції належності і 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 4.13 - 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)
y_1	2 у.о.	$\mu_{\text{тр}}(y_1)=0,38$ $\mu_{\text{ц}}(y_1)=0,72$ $\mu_{\text{к}}(y_1)=0,45$	$\mu_{\text{н}}(Y)=0,84$ $\mu_{\text{нС}}(Y)=0,63$ $\mu_{\text{С}}(Y)=0,63$ $\mu_{\text{вС}}(Y)=0,84$ $\mu_{\text{в}}(Y)=0,84$
y_2	2.8 $\text{M}^2 \times \text{C}/\text{BT}$	$\mu_{\text{н}}(y_2)=0,26$ $\mu_{\text{п}}(y_2)=0,63$ $\mu_{\text{в}}(y_2)=0,84$	
y_3	1,5 у.о.	$\mu_{\text{н}}(y_3)=0,84$ $\mu_{\text{п}}(y_3)=0,58$ $\mu_{\text{в}}(y_3)=0,28$	

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

$$\mu_{\text{н}}(Y) = 0,38 \wedge 0,26 \wedge 0,84 \vee 0,38 \wedge 0,63 \wedge 0,84 = 0,84, \quad (4.57)$$

$$\begin{aligned} \mu_{\text{нС}}(Y) &= 0,38 \wedge 0,63 \wedge 0,58 \vee 0,72 \wedge 0,26 \wedge 0,58 \vee 0,38 \wedge \\ &\wedge 0,63 \wedge 0,58 = 0,63, \end{aligned} \quad (4.58)$$

$$\begin{aligned} \mu_{\text{С}}(Y) &= 0,72 \wedge 0,63 \wedge 0,58 \vee 0,45 \wedge 0,63 \wedge 0,58 \vee 0,38 \wedge \\ &\wedge 0,63 \wedge 0,28 = 0,63, \end{aligned} \quad (4.58)$$

$$\begin{aligned} \mu_{\text{вС}}(Y) &= 0,72 \wedge 0,84 \wedge 0,58 \vee 0,45 \wedge 0,84 \wedge 0,58 \vee 0,38 \wedge \\ &\wedge 0,84 \wedge 0,28 = 0,84, \end{aligned} \quad (4.60)$$

$$\mu_{\text{в}}(Y) = 0,72 \wedge 0,84 \wedge 0,28 \vee 0,45 \wedge 0,84 \wedge 0,28 = 0,84. \quad (4.61)$$

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 °С.	$\mu_H(z_1)=0,38$ $\mu_3(z_1)=0,82$ $\mu_B(z_1)=0,56$	$\mu_H(Z)=0,70$ $\mu_{HC}(Z)=0,76$ $\mu_C(Z)=0,76$ $\mu_{BC}(Z)=0,63$ $\mu_B(Z)=0,38$
z_2	K= 2,5	$\mu_H(z_2)=0,70$ $\mu_C(z_2)=0,63$ $\mu_B(z_2)=0,34$	
z_3	1,4 у.о.	$\mu_{TP}(z_3)=0,76$ $\mu_{BM}(z_3)=0,4$	

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \mu_{BC}(L_{\text{вих}}) &= 0,63 \wedge 0,63 \wedge 0,76 \vee 0,4 \wedge 0,84 \wedge 0,63 \vee 0,4 \wedge 0,84 \wedge \\ &\wedge 0,38 = 0,76, \end{aligned} \quad (4.70)$$

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

Для даного прикладу, за умови, що нижня і верхня границі вихідної величини складають $\underline{Q} = 1,6 \text{ м}^3$ за добу, $\overline{Q} = 8 \text{ м}^3$ за добу проведемо дефазифікацію за формулою (4.48):

$$L = \frac{1.6 \cdot 0.7 + 3.2 \cdot 0.76 + 4.8 \cdot 0.76 + 6.4 \cdot 0.76 + 8 \cdot 0.84}{0.7 + 0.76 + 0.76 + 0.76 + 0.84} = 4.92$$

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 наведено вище. Використовуючи дану методику в комплексі для всіх підрівнів та рівнів можна отримати прогнозовану оцінку активуючого впливу наведених факторів на продуктивність біореактора.

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.

ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України « Про енергозбереження» К.: 1994. – 8 с.
2. Закон України « Про альтернативні джерела енергії» К.: 2003. – 9 с.
3. Баадер Б., Доне Е., Брендерфер М. Биогаз: Теория и практика. -М. : Колос, 1982. –148 с.
4. 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.
5. Ратушняк Г.С., Джеджула В. В. Енергозбереження в системах виробництва біогазу// Тези доповідей Міжнародної конференції « І всеукраїнський з'їзд екологів», 2006 – С. 229.
6. 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.
7. Семененко И.В. Проектирование биогазовых установок. - К.: Техніка, 1992.-346 с.
8. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів //Вісник ВПІ.- 2006.- № 2. – С. 26-31.
9. Ткаченко С.Й., Степанов Д.В., Джеджула В.В. Закономірності розподілу температурних напорів за умов локального газорідного омивання поверхні //Вісник ВПІ, 2003, № 4. - С. 42-45.
10. Ткаченко С.Й., Степанов Д.В., Резидент Н.В. Методичні основи моделювання системи термостабілізації реактора біогазової установки //Праці за матер. ІV всеукр. наук-техн. конф. «Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві».- Вінниця. – 2004. - С. 70-79.
11. Берглс А. Интенсификация теплообмена. В кн. Теплообмен. Достижения. Проблемы. Перспективы.// Избранные труды 6-й

- Международной конференции по теплообмену - Л.: Химия. - 1968. – С. 45-192.
12. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. Учебник для вузов. Изд.-е 3-е перераб и доп. - М.: Энергия, - 1975. - 488 с.
13. Ткаченко С.И., Степанов Д.В., Співак О.Ю. Стабілізований теплообмін в системі : нагрівальний елемент - обмежений об'єм рідини - навколишнє повітря // Вісник ТУП. -№ 1. -2001. - С. 74-76.
14. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Інтенсифікація виробництва та підготовка біогазу до використання в теплотехнічному обладнанні// Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, КНУБА, К.: 2005.- №8 – С. 52-60.
15. Асатурян А.Ш., Тонкошкуров Б.А. Свободная тепловая конвекция вблизи горизонтального цилиндра в высоковязких средах // ИФЖ. -1960.- т. 3.-№6.- С.55-61.
16. Авдеев А.А. Гидродинамика барботажа //Теплоэнергетика. - 1983.- № 11.- С.42-46.
17. Авдеев А.А. Универсальная зависимость для расчета скорости гравитационного всплытия пузырей //Теплоэнергетика. - 1989. - № 7.- С. 16-19.
18. 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.
19. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Підвищення продуктивності біогазового реактора управлінням параметрами вільноконвективних процесів теплообміну// Вісник Хмельницького національного університету. - 2006. - №2. – С. 29-32.

20. Деклараційний пат. № 13260 Україна. Біогазовий реактор/ Ратушняк Г.С., Джеджула В.В., Державний департамент інтелектуальної власності. - № u 2005 09738; Заяв від 17.10.2005; Опубл. 15.03.2006; Бюл № 3.
21. Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках - М: Машиностроение, 1977.-256 с.
22. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Контроль параметрів температурних напорів в одно– та багатозфазних середовищах //Вісник ВПІ. – 2005. - № 6. - С. 193-195.
23. ТУ "Біогаз метантенків." ТУУ-204. 14069366-13-97.
24. Боровой И.А., Колобродов В.Г., Кулько В.Б., Винокуров Э.И. Разработка технологии очистки биогаза от сероводорода с помощью жидкого поглотителя в скрубберной схеме.// Выбранные работы Первой международной конференции „Энергия з біомаси”. - Київ - 2002.
25. Карнацевич Л.В., Хажмурадов М.А., Колобродов В.Г., Волчок О.И., Григорова Т.К., Винокуров Э.И., Бондарь А.Ф. Комплекс по переработке биогаза.// Выбранные работы Первой международной конференции „Энергия з біомаси”. – Київ. - 2002.
26. Некрасов В.Г. Перспективы использования биогаза // Техника в сельском хозяйстве. - 1988. - № 4. - С. 25.
27. Джеджула В.В., Демченко Л.Л. Альтернативні джерела енергозабезпечення фермерських господарств. //Індивідуальний житловий будинок. Книга за матеріалами третьої республіканської науково-технічної конференції. – Вінниця. - 2001. - С. 137-141.
28. Степанов Д.В., Боднар Л.А. Теплообмінні пристрої в системі біоконверсії// Вісник ВПІ. - 2005. - № 1. - С. 55-57.

29. Ротштейн О.П., Ларюшкін Є.П., Котельніков Д.І. Багатофакторний аналіз технологічного процесу біоконверсії на основі лінгвістичної інформації // Вісник ВПП. - 1997. -№3.- С.- 38-45.
30. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии индентификации. Нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети - Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. - 320 с.
31. Митюшкин Ю.И., Мокин Б.И., Ротштейн А.П. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний. - Вінниця: УНІВЕРСУМ - Вінниця, 2002. - 145 с.
32. Деклараційний пат. № 7938 Україна. Біогазовий реактор/ Ратуш - няк Г.С., Джеджула В.В., Державний департамент інтелектуальної власності. - № 20041210473; Заяв. від 20.12.2004; Опубл. 15.07.2005; Бюл № 7.
33. 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.
34. Биомасса как источник энергии. Пер. с англ. Под ред. С. Соуера. -М.: Мир, 1985. -368 с.
35. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії в системах ТГВ / Сер - бін В.А. – Макіївка: ДонДАБА; 2003. - 153 с.
36. Виробництво біогазу на станціях очистки стічних вод //Ринок інсталяційний. - 2000. - № 11. - С. 34 -35.
37. Гелетуха Г.Г., Марценюк З.А. Энергетический потенциал биомассы в Украине // Пром. теплотехника. - 1998. - № 4. - С. 52-55.
38. Давиденко Е.В., Панцхава Е.С., Метангенерация твердых органических отходов городов. // Біотехнологія. - 1990. - № 4. - С. 49 - 53.
39. Никитин Г.А. Метановое брожение в биотехнологии. Учебное пособие. - К.: Вища школа, 1990. - 207 с.

40. Оборудование для производства биогаза из животноводческих отходов. /Цветков Б.П., Ясенецкий В.А. //Промышленная энергетика.-1988.-№11.- С. 9-13.
41. Л.М. Батунер. М.Е. Позин. Математические методы в химической технике. - М.: Стройиздат, 1985. - 310 с.
42. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. - М.: Стройиздат, 1975. - 327 с.
43. Панцхава Е.С. Техническая биоэнергетика. - М.: Знание, 1990. -64 с.
44. Панцхава Е.С. Биогаз - возобновляемый вид топлива и энергии. //Теплоэнергетика. - 1982. - № 9. - С. 35 - 37.
45. Е.С. Панцхава, Н.Л. Кошкин. Биоэнергетические установки по конверсии органических отходов в топливо и органические удобрения. // Теплоэнергетика. - 1993. - № 4. - С. 20-23.
46. Стрельцов Г.В, Алабовский А.Н., Белик Д.Н. Некоторые характеристики барботажного теплообменника-утилизатора в схеме аппарата с погружными горелками. //Пром. энергетика. - 1978. - №4. - С. 49-50.
47. Соколов В.Н., Соломахин А.Д. Теплообмен между газожидкостной системой и теплообменным элементом // ЖПХ. - 1962. - № 11.- С. 2570-2573.
48. Соколов В.Н., Доманский В.В. Газожидкостные реакторы. - Л.: Химия. - 1976.-287 с.
49. Таргоня В.С., Ясинецкий В.А. Оборудование для получения биогаза из навоза // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1990. - №44. - С. 23-24.
50. Технология орошения животноводческими стоками /А.М. Буцыкин, В.Г. Луцкий, А.Г. Пономарев, Л.П. Рева. - М.: Агропромиздат, 1987. - 160с.
51. Теплообменные аппараты бродильной промышленности / Николаев Л.К., Листовский Р.Р.- М.: Пищевая промышленность, 1973.- 177 с.

52. Тодес О. М., Бондарева А. К. Особенности технологических процессов во взвешенном слое //Химическая наука и промышленность. - Т. 11. - 1957. - № 2.- С. 8 – 14.
53. Тамарин А. И., Забродский С. С., Замниус И. Л. Исследование теплообмена между вибропсевдооживленным слоем тонкодисперсного материала и поверхностью нагрева. - В сб. «Исследование тепло- и массообмена в технологических процессах и аппаратах».- Минск.: Наука и техника, 1966.- С. 39- 46.
54. Утилизация отходов животноводства и птицеводства. / С.Д. Дурдыбаев, В.С. Данилкина, В.П. Рязанцев //ВНИИТЭИ Агропром. Обзорная информация. - М., 1989.
55. Федоткин И.М., Ткаченко С.И. Теплогидродинамические процессы в выпарных аппаратах. - К.: Техніка, 1975. - 224 с.
56. Hashimoto A.G. Methane from cattle waste // Biotechnologie & Bioengineering. - 1982. - №9. - vol. 24. - p. 2039 -2052.
57. Малогабаритні біогазові установки. Бюлетень "Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії". - 1999. - № 2.- С.83.
58. Utilisation of biogas in dual fuel engines. Duebel Frantz-Martin, Schmillen Karl, Seez A, "Energy Biomass and Wastes" 10-th Conf., Wachington D.C., 1986. London, Chicago, 1987. - P. 485-502.
59. Pich I.R., Janotti E.L. Production of methane from combination ofwheast and strow and swine manure. - Trans ASDE. - 1982. - №2. - vol. 26.- P.546 - 548.
60. Technical and economic considerations in biogas utilisation. Rautoma Erkki, Kuusinen Olli. "Raporttisar. Joensuun gllopisto. Mat. -luonnontieteellis tiedekunnan". - 1986. - №14. - P. 87 - 93.
61. The effects of reactor configuration on methane production from high-strength wastewaters. Veenstra John N, Barber John B. //Energy Biomass and

Wastes. 10-th Conf., Washington D.C., 1986, London, Chicago. - 1987.- P. 1667-1668.

62. Schurig O.R., Frick C.W. Heating and current carrying capacity of bare conductors for outdoor service. - Gen. Elec. Rev. - 1930. - vol. 33. - №3. - P. 141- 157с.

63. Wilkie D. Some doubtful natural convection correlation // Heat Transfer Confer. Jerusalem 1990. - vol. 2. - P.550-560.

64. Остроумов Г.А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. - М.: Гостехиздат, 1952. - 256 с.

65. Ларюшкін Є.П. Розробка експертно-моделюючої системи багатофакторного аналізу для управління технологічним процесом біоконверсії: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.07 /ВДТУ. - Вінниця. - 30 с.

66. Авизов А.Х., Сияк Ю.В. Экономическая эффективность технологии конверсии биомассы в топливо и удобрения. //Биотехнология кормопроизводства и переработки отходов. Рига. - 1987. - С. 197- 202.

67. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. - М.: Энергия, 1978. - 416 с.

68. Михеева И.М. Теплоотдача горизонтальной трубы при свободном движении различных жидкостей // Теплоэнергетика. - 1956. - № 4.-С.19-21.

69. Медведев И.Л. Экономические аспекты создания безотходных производств в условиях интенсификации с/х. // Биотехнология. - Т.4. - № 5.- 1988.-С. 640-642.

70. 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. 63-70.

Навчальне видання

Георгій Сергійович Ратушняк,
В'ячеслав Васильович Джеджула

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ БІОКОНВЕРСІЇ

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено авторами

Редактор Т.О. Старічек

Науково-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м.Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку
Формат 29,7x42¼
Друк різнографічний
Тираж ___ прим.
Зам. №

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ