

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи

освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**«Підвищення енергетичної ефективності біогазової установки за рахунок
удосконалення конструкції біореактора»**

Виконав: студентка 2 курсу, групи МГАІ-3-22
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

_____ Торган Кристина Віталіївна

Керівник: _____ Золотовська Олена Володимирівна

Рецензент: _____

Дніпро 2023

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: тракторів і сільськогосподарських машин
Освітній ступінь: "Магістр"
208 "Агроінженерія"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
тракторів і СГМ

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

„ ” _____ 20__ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Торган Кристина Віталіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи : Підвищення енергетичної ефективності біогазової установки за рахунок удосконалення конструкції біореактора

керівник роботи к.т.н., доцент Золотовська Олена Володимирівна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“09” 11 2023 року №3422

2. Строк подання студентом роботи 27.11.2023 р

3. Вихідні дані до роботи Огляд особливостей технічних вимог біогазових установок, огляд літературних джерел та обґрунтування дослідження з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз загальних технічних вимог біогазових установок. 2. Теоретичне обґрунтування процесів в біогазовій установці. 3. Обґрунтування методики експериментальних досліджень. 4. Охорона праці та захист навколишнього середовища. 5. Техніко-економічна оцінка біогазової установки. Висновок. Бібліографічний список.

5 Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і предмет досліджень. (2 аркуш, А4).
2. Огляд і аналіз конструкцій (1 аркуші, А4).
3. Теоретичні дослідження (2 аркуші, А4).
4. Експериментальні дослідження (3 аркуші А4)
5. Економічна частина. (1 аркуш 4А)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Золотовська О.В., доцент		
2	Золотовська О.В., доцент		
3	Золотовська О.В., доцент		
4	Деркач О.Д. , доцент		
5	Вініченко І.І., доцент		
Нормо-контроль	Пономаренко Н.О., доцент		

7. Дата видачі завдання 18.02.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз технічних рішень	до 29.05.23 р	
2.	Виконання теоретичних досліджень	до 29. 06.23 р	
3	Виконання експериментальних досліджень	до 5.09.23 р.	
4	Охорона праці	до 06.11.23 р.	
5	Економічна частина	до 10.11.23 р.	
6.	Демонстраційний матеріал	до 24.11.23 р.	

Студент

_____ (підпис)

Торган К.В.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Золотовська О.В.

_____ (прізвище та ініціали)

<i>n/n</i>	<i>Формат</i>	<i>Позначення</i>			<i>Найменування</i>	<i>Кількість аркушів</i>	<i>Номер аркуша</i>			<i>Примітка</i>	
					<u>Текстові</u>						
1	A4	52ДР043.000.000ПЗ			Пояснювальна	83					
					<u>Демонстраційні</u>						
2	A4				Мета і задачі	2	1,2				
3	A4				Огляд і аналіз	1	3				
4	A4				Теоретичні	2	4,5				
5	A4				Експериментальні дослідження	3	6,7,8				
6	A4				Економічна	1	9				
7	A4				Висновки	1	10				
					<i>52.ДР043.000.000ПЗ</i>						
3	Арк.	№ докум.		Під	Дата						
Розроби		Торган К.В.			<i>Відомість дипломної роботи</i>				літ	арк	арк
Перевіри		Золотовська О.В								3	83
Т. контр									<i>МгАІ-22</i>		
Н.		Пономаренко Н.О.									
Затверд		Теслюк Г.В.							<i>ДДАЕУ</i>		

АНОТАЦІЯ

Торган К.В. Підвищення енергетичної ефективності біогазової установки за рахунок удосконалення конструкції біореактора / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2023.

В дипломній роботі проаналізовано конструкції біогазових установок. Визначені перспективи застосування запропонованих конструкцій. Виконано порівняльний аналіз існуючих конструкцій. Виконані аналітичні дослідження теплових процесів в біореакторі, які враховують взаємозв'язки геометричних та енергетичних параметрів установки. Обґрунтувати лабораторні експерименти з виробництва біогазу та біодобрива біогазовою установкою з теплообмінником-змішувачем, визначити оптимальні параметри та режими роботи даної установки. Проведена економічна оцінка біогазової установки з теплообмінником-змішувачем.

Ключові слова: біогаз, удобрення, біомаса, енергетичні характеристики, теплові процеси

Публікація статті в збірнику «MODERN PROBLEMS OF SCIENCE, EDUCATION AND SOCIETY», The 9th International scientific and practical conference “Modern problems of science, education and society” (November 6-8, 2023) SPC “Sciconf.com.ua”, Kyiv, Ukraine.

ЗМІСТ

Вступ	7
1. Аналіз загальних технічних вимог біогазових установок	10
1.1 Технологічні рішення переробки посліду	12
1.2 Аналіз конструкцій біогазових установок	15
1.3 Фізико-хімічні особливості біогазу та біодобрива	26
Висновки	27
2. Теоретичне обґрунтування процесів в біогазовій установці	28
2.1 Мікробіологічні процеси	28
2.2 Моделювання теплових процесів	30
2.3 Моделювання режимів роботи та конструктивних параметрів біореактора	36
2.4 Результати аналітичного обґрунтування	44
Висновки	46
3 Обґрунтування експериментальних досліджень	47
3.1 Описання технологічної схеми БГУ в лабораторних умовах	47
3.2 Обґрунтування результатів досліджень БГУ	48
3.2.1 Визначення режимів роботи БГУ з максимальним виходом біогазу	49
3.2.2 Визначення термічного опору та тепловтрат в біореакторі	53
3.2.3 Методика розрахунку конструктивних параметрів БГУ	56
3.2.4 Визначення режимів роботи БГУ для максимального виходу біодобрива	62
Висновки	65
4. Охорона праці та захист навколишнього середовища	66
4.1 Вимоги для надійної та безпечної експлуатації установки	66
4.1.1 Перелік заходів безпеки включає	68
4.1.2 Правила та вимоги працівників	69
4.2 Організація і проведення евакуаційних заходів під час НС	71
Висновки	73
5 Техніко-економічна оцінка біогазової установки	74
Висновки	79
Список використаних джерел	80

ВСТУП

Загально відомо, що безвідповідальне і споживацьке ставлення людства до довкілля є основною причиною погіршення екологічної ситуації, скорочення невідновлюваних природних ресурсів і загалом загрозою виживанню людства. Сучасні екологічні проблеми вимагають не тільки впровадження ресурсних і ресурсозберігаючих технологій у всіх галузях виробництва та використання альтернативних джерел енергії, а й відновлення та подальшого збереження вже зруйнованих екосистем.

Таким чином, Україна належить до групи країн із комплексними екологічними проблемами, пов'язаними з періодами економічних перетворень, такими як непропорційне використання та виснаження природних ресурсів, як у країнах, що розвиваються, і забруднення довкілля внаслідок промислової діяльності, як у розвинених країнах. Ще однією проблемою, характерною для перехідного періоду, є утилізація відходів. Кількість відходів, що утворюються, продовжує зростати, але частка відходів, що переробляються, мізерно мала. Практика захоронення новоутворених відходів на переповнених полігонах, що склалася в країні, збільшує загрозу навколишньому середовищу і здоров'ю населення. Слід додати, що сучасна сільськогосподарська практика призводить до збідніння та виснаження родючих чорноземів України, промислового забруднення ґрунтів, інтенсивної експлуатації невикористовуваних земель, екстенсивного розвитку монокультури та використання азотних і нітратних добрив. Крім того, виснаження земельних, лісових і водних ресурсів призводить до незворотної втрати екосистем і біорізноманіття. Частка територій, що охороняються (6,6% території країни), недостатня для запобігання таким втратам.

Насьогодні, підвищується інтерес до альтернативної енергетики, що пов'язано як з обмеженими запасами традиційного палива, як наслідок - постійними підвищеннями тарифів на електричну й теплову енергію, так і з постійним зниженням вартості устаткування нетрадиційної та відновлюваної енергетики. Перспективним напрямком у сільськогосподарському виробництві є отримання енергії за рахунок біотехнологій.

В сільському господарстві приділяється особлива увага розвитку малих сільськогосподарських підприємств, у тому числі селянських і фермерських господарств. У невеликих господарствах застосування біогазових установок (БГУ) дасть змогу зробити їх енергетично незалежними.

Технічні засоби для БГУ виробляють як українські, так і зарубіжні підприємства. Однак, зарубіжні виробники орієнтовані на обладнання, розраховане для переробки десятків тонн відходів протягом доби, і великого поширення у нас не знайшли. У той же час вітчизняні виробники розробляють БГУ невеликої продуктивності з простою конструкцією, але й вони не мають широкого застосування.

Під час практичного вирішення питань раціональної технології процесів сільськогосподарського виробництва та розробки систем машин для комплексної їхньої механізації та електрифікації першорядного значення набуває використання місцевих енергетичних ресурсів. Основне значення в даний час мають енергетичні ресурси з відходів сільськогосподарського виробництва, у тому числі птахівництва, у зв'язку з їх недостатнім ступенем використання через недосконалість відповідних засобів техніки.

Традиційні енергетичні ресурси в низці районів нашої країни, особливо в сільській місцевості, вельми обмежені у зв'язку з їх дорожнечою, пов'язані з великими витратами, що робить це використання економічно не вигідним. Такі райони потребують нових джерел енергії, які змогли б замінити дороге привізне паливо, запаси якого в природі до того ж не безмежні.

Отже, розвиток біотехнологій, як альтернативної енергетики, це одночасне рішення утилізації відходів птахоферм та енергопостачання в окремому сільському регіоні. Сутність кваліфікаційної роботи полягає в обґрунтуванні та розробці енергетично ефективної, недорогої та доступної БГУ для виробництва біогазу та повністю знезаражених високоякісних органічних біодобрив для індивідуальних підприємців і малих сільськогосподарських підприємств і є актуальним завданням.

Таким чином, розвиток біотехнології та біогазової енергетики - це вирішення проблеми утилізації відходів, а також енергетичних проблем сільськогосподарських підприємств.

Мета досліджень - підвищення енергетичних показників біогазової установки за рахунок удосконалення конструкції біореактора та обґрунтування параметрів і режимів його роботи.

Об'єкт дослідження - перемішувальний і теплообмінний пристрій біогазової установки.

Предмет досліджень - закономірності теплообмінних процесів термофільного режиму анаеробного зброджування посліду з одночасним перемішуванням і нагріванням, з отриманням біогазу та біодобрив.

Задачі кваліфікаційної роботи:

1. Провести аналіз перспектив використання біотехнологій у сільськогосподарському виробництві.
2. Обґрунтувати технологічну схему та параметри біогазової установки, біореактор якої містить функціональний елемент, що виконує функції перемішувального пристрою та нагрівального елемента.
3. Виконати аналітичні дослідження теплових процесів в біореакторі, які враховують взаємозв'язки геометричних та енергетичних параметрів установки.
4. Обґрунтувати лабораторні експерименти з виробництва біогазу та біодобрива біогазовою установкою з теплообмінником-змішувачем, визначити оптимальні параметри та режими роботи даної установки.
5. Провести економічну оцінку біогазової установки з теплообмінником-змішувачем.

1. АНАЛІЗ ЗАГАЛЬНИХ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

Одним з ефективних методів переробки та утилізації сільськогосподарських відходів є анаеробне зброджування, завдяки чому є можливість отримати біогаз та біодобрива. Теплота згоряння 1 м³ біогазу приблизно має значення від 20 до 30 МДж (6-7 кВт) та залежить від змісту в отриманому газі метану та вуглекислого газу. Окрім того, біогазові технології являються дешевим джерелом органічних добрив. Послід складається з мікроелементів: в 100 грамах сухої речовини 16-39 мг – марганцю, 13-40 мг – цинку, 1,1-1,5 мг – кобальту, 0,6 – міді та 370-908 мг заліза. Перетворення посліду та гною у добрива потрібно від 6 до 9 місяців, при даній витримки втрачається більше поживних речовин. Біотехнологія, а саме анаеробне зброджування, дозволяє в короткі терміни отримати високоефективні біодобрива, які містять максимальну кількість біологічно активних речовин та мікроелементів.

За багатьма показниками біодобрива перевершують інші органічні добрива через наступні переваги:

- практично відсутнє насіння бур'янистої рослинності;
- є можливість прямого внесення в ґрунт, при цьому починають відразу ефективно працювати;
- наявність активної мікрофлори, що сприяє інтенсивному росту рослин;
- утримання азоту;
- стійкість до вимивання поживних речовин з ґрунту;
- екологічна чистота.

Дешеві та високоефективні органічні добрива - це можливість для фермерських господарств інтенсифікувати місцеве виробництво та підвищити свою конкурентоспроможність.

Виходячи з цього, створення високоефективної та енергоефективної установки з виробництва біодобрив (УБД) для малих сільськогосподарських підприємств, у тому числі фермерських господарств, є актуальним завданням.

Гній є найкращою сировиною для біогазової установки, яка забезпечує достатньо високий вихід біогазу. Наприклад, свіжий послід курей-несучок дає близько 132-142 м³/т біогазу при утриманні в клітці і близько 80 м³/т біогазу при утриманні на землі з підстилкою.

В даний час багато компаній в нашій країні почали розробляти та експлуатувати біогазові установки різної потужності. Загалом, біогазова установка - це комплекс обладнання та споруд, призначений для підготовки та перетворення біологічних відходів у біогаз та біодобриво. Передбачається, що біогаз є джерелом теплової та електричної енергії.

Основними цілями впровадження біогазу в сільськогосподарське виробництво є:

- отримання дешевого джерела для виробництва енергії;
- підвищити врожайність сільськогосподарських культур за рахунок використання біогазу як джерела тепла та електроенергії;
- підвищення якості сільськогосподарської продукції.

Розрахунки показують, що термін окупності інвестицій у біотехнології становить 3 роки і менше. Впровадження біотехнологій у сільськогосподарське виробництво, в тому числі в індивідуальних фермерських господарствах, дасть можливість:

- заощадити традиційні джерела енергії (вугілля, газ, нафта);
- підвищити продуктивність сільськогосподарських угідь та знизити собівартість сільськогосподарської продукції;
- зберегти екологічну рівновагу;
- децентралізоване виробництво енергії забезпечує безпеку енергетичної системи для всієї країни, зменшуючи при цьому втрати в енергосистемі та витрати на будівництво електро- і теплопроводів.

Таким чином, впровадження біогазової установки матиме позитивний вплив на розвиток аграрної енергетики.

Основною вимогою до біогазових установок є ефективне перетворення органічних відходів у біогаз, який може бути використаний для виробництва

високоєфективних рідких органічних добрив, палива та гумінових речовин, що містять тепло та електроенергію [21, 22].

Однак, важливо приділяти особливу увагу оптимальним робочим параметрам БГУ, підтримуючи анаеробні умови зброджування в метантенку, підтримуючи заданий температурний режим і кислотно-лужні властивості субстрату (біомаси) та забезпечуючи стабільну роботу за допомогою перемішувального обладнання та теплообмінників [7, 20].

Біогазову установку слід розташовувати якомога ближче до джерела відходів, що підлягають переробці (пташники, сховища тощо).

Резервуари для твердих відходів повинні бути спроектовані таким чином, щоб їх було легко встановлювати та обслуговувати.

Крім того, резервуар повинен бути обладнаний автоматичною системою управління. У цьому випадку важливо автоматизувати детектори газу, системи персональної сигналізації та аварійного відключення газотурбінної системи.

Основні показники надійності повинні бути вказані у випускних даних газотурбінної установки.

Вимоги стандартів промислової безпеки повинні забезпечувати технологічну, пожежну та екологічну безпеку, оскільки біогаз, змішаний з повітрям у пропорції від 5 до 15 % призводить до загоряння, а відкрите полум'я становить небезпеку за концентрації біогазу в повітрі понад 12 %.

1.1 Технологічні рішення переробки посліду

Птахофабрики щорічно виробляють понад 55 млн тонн пташиного посліду з вологістю 70-75%, що викликає проблеми не тільки з його утилізацією, а й із захистом ставків, водойм, ґрунтів і лісів від забруднення [23, 24].

Пташиний послід є висококонцентрованим і швидкодіючим добривом. Його хімічний склад наступний: 34,5-48,3 % сухої речовини, зола 15-40%, сирий жир 3-4,5 %, сира клітковина 15-25 %, безазотисті екстрактивні речовини 45-49 %. В середньому кури-несучки виділяють 175-190 г посліду на добу,

бройлери - 280-300, індики - 455, качки - 425, гуси - 598, молоді кури-несучки - 25 г в 1-4 тижні, 98 г в 5-9 тижнів і 177 г в 10-22 тижні.

Для зменшення втрат поживних речовин з гною рекомендується компостування з торфом, соломною, тирсою, суперфосфатом або іншими водопоглинаючими речовинами. Вологість компостованого гною не повинна перевищувати 70%. На 3-4 частини компосту використовується 1 частина наповнювача. Свіжий гній не слід використовувати в якості компосту, щоб запобігти поширенню хвороб і бур'янів. Компост з торф'яного гною виробляють на спеціальних майданчиках, на полях, птахофабриках і торфовищах. Місце компостування залежить від розташування птахофабрики, земельних ділянок, що використовуються під послід, місця видобутку торфу, часу і кількості посліду та наявності транспортних засобів. Торф'яний гній найкраще готувати безпосередньо на землі навесні та влітку. Для цього на ділянку завозять шар торф'яної тирси товщиною 30-40 см, поверх якого укладають гній у співвідношенні 1 частина гною на 3 частини торфу. Верхній шар гнойової купи засипають торфом. Компост збагачують фосфоритним борошном і калійними солями.

Під час зимового компостування купу розміщують на повну висоту, щоб гній, який транспортують протягом дня, не замерзав.

Для виробництва компосту з торфу і рідкого гною з поля використовують рідкий гній з відносною вологістю не менше 86%. У центрі купи викопується довга траншея глибиною 50-60 см, заповнюється гноем і засипається торфом. Потім компост переміщується екскаватором. Підготовка компосту до використання займає 1 місяць влітку і 2 місяці взимку [24, 25].

Термічна обробка посліду здійснюється в протитечійних барабанних сушарках при температурі 500-600 °С. Технологічний процес сушіння пташиного посліду включає наступні процеси: доставка сировини на сушильну установку, завантаження в бункери-накопичувачі, дозування та теплова обробка в сушильній камері, підготовка висушеного пташиного посліду у вигляді крихти та промислових гранул в грануляторі ГМО-1,5, видача готової продукції на склад. Фасування сухого пташиного посліду Висушений гній

пакують у паперові або поліетиленові мішки по 20-25 кг. Вологість сухого посліду становить 12-14%. Якщо сухий пташиний послід готують у гранульованому вигляді, його можна зберігати навалом. Пташиний послід зберігають у сухому приміщенні [18].

Пташиний послід має важливу перевагу - відносно високий вихід біогазу порівняно з коров'ячим та свинячим гноєм (табл. 1.1).

Утилізація вищезгаданих органічних і неорганічних відходів є важливою екологічною проблемою, і найбільш перспективним способом її вирішення є використання біогазових установок як альтернативного джерела енергії.

Таблиця 1.1 – Вихід газу технологією анаеробного зброджування

Біомаса	Показники	
	Вміст сухої речовини, %	Вихід біогазу, м ³ /т
Гній ВРХ	8	22
Гнойова жижа свиней	6	25
Пташиний послід	22	76
Подрібнена солома	86	300
Силосна трав'яна маса	40	200
Силосна кукурудзяна маса	35	208
Кукурудзяна зернострижнева суміш	65	414
Пшенична солома	86	280
Лучна трава	18	95

Розташування сільськогосподарських об'єктів, таких як птахофабрики і тваринницькі комплекси, багато в чому визначається екологічними проблемами, які вони піднімають, оскільки їх вплив на природне середовище визначається впливом на атмосферу і може бути серйозним забруднювачем. Наприклад, кожна курка виробляє 290 грамів фекалій на добу, і навіть для відносно невеликої ферми з 1 000 курей обробка 290 кг фекалій на добу може стати серйозною проблемою для існування ферми. Суворі вимоги, яких необхідно дотримуватися. Необхідно дотримуватися суворих вимог, наприклад, щоб ферма не розташовувалася поблизу спеціалізованого обладнання або житлових районів, а також щоб поблизу джерел води не було звалищ для птиці або пташиного посліду.

Найважливіше те, що економічні витрати, включаючи витрати на утилізацію промислових відходів на спеціалізованих полігонах, лягають значним тягарем на бізнес. Впровадження технології анаеробного зброджування сільськогосподарських відходів може зменшити цей тягар.

1.2 Аналіз конструкцій біогазових установок

Фактична продуктивність по газу, яка може бути досягнута на промисловій установці, залежить від багатьох факторів, вплив яких визначається конструкцією установки та умовами виробництва. Важливими факторами, що впливають на проектні параметри, є наступні [3, 4]:

- завантаження робочої камери (кількість субстрату на одиницю корисного об'єму реактора і продуктивність завантаження);
- технічна тривалість циклу анаеробного зброджування (час перебування органічної маси в реакторі);
- інтенсивність перемішування субстрату на одиницю об'єму реактора.

Установки з декількома реакторами та безперервним циклом анаеробного зброджування мають вищу продуктивність.

Класифікація біогазових реакторів відповідно до їх конструктивних характеристик показана на рисунку 1.1.

Таким чином, принципова схема виробництва біогазу включає накопичення та переробку біомаси, перетворення біомаси в біогаз (пряме біогазове бродіння) та раціональне використання продуктів бродіння (біогазу та компосту).

Для підтримки температури, яка необхідна для ферментації, субстрат, що подається в біореактор, має бути нагрітий до бажаної температури (для компенсації втрат тепла потрібен додатковий нагрів). Оскільки зниження температури навіть на 1-2 градуси негативно впливає на біологічний процес, крім того, необхідно домогтися того, щоб на поверхні нагрівального пристрою (теплообмінника) не осідали зважені частинки. Основні способи та схеми нагріву зброджувальної маси наведені на рисунку 1.2.



Рисунок 1.1 – Конструктивні особливості біогазових установок

Підігрів субстрату у робочому просторі виконується теплообмінними апаратами, які вбудовані в стінки реактора, за допомогою водяної сорочки, гарячою водою і паром під тиском: нагрівальні теплообмінні пристрої розташовані на внутрішніх стінках біореактора (рис. 1.2а); на днищі (рис. 1.б); у внутрішньому співвісному циліндрі (рис. 1.2в); розташованому поза біореактором теплообміннику (рис. 1.2); зміювиковому - розташованому усередині біореактора (рис 1.2д); нагрів паром під тиском (рис 1.2е); нагрів за допомогою водяної сорочки (рис. 1.2ж).

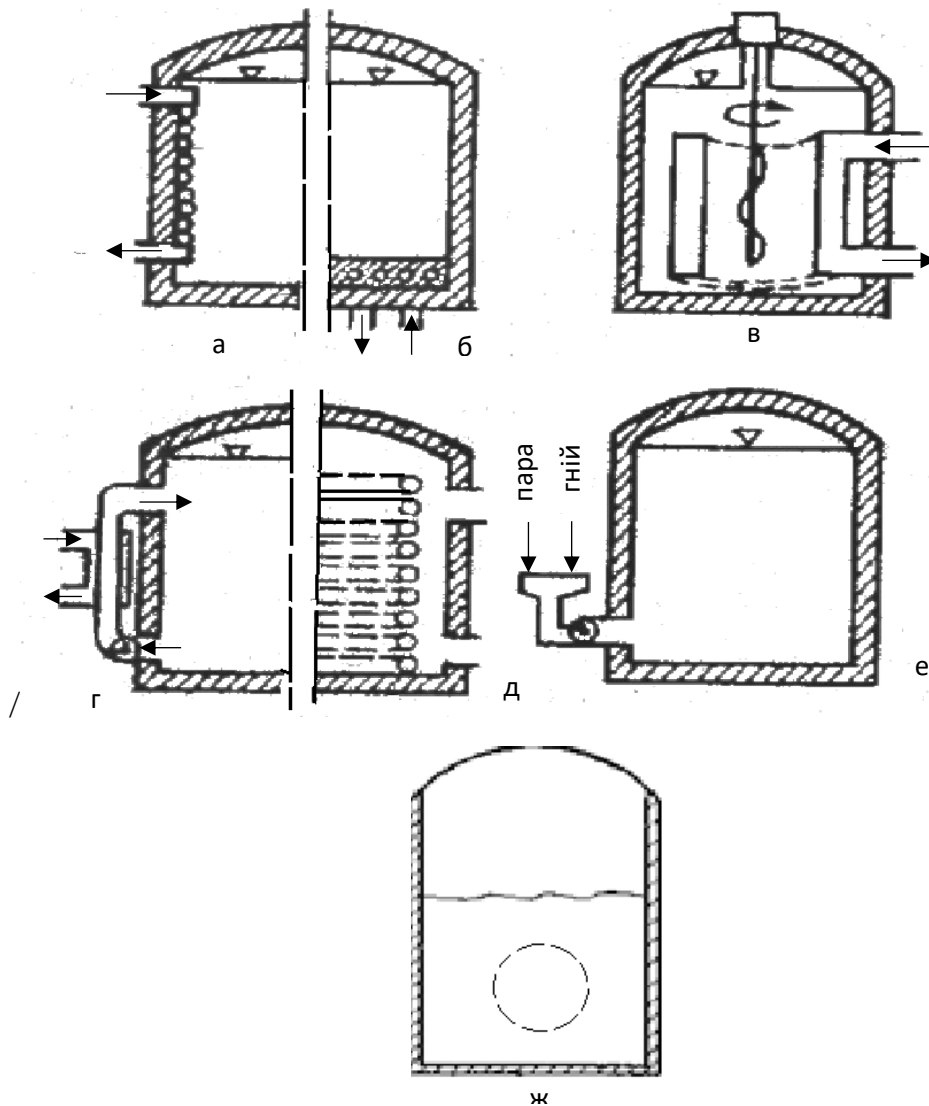
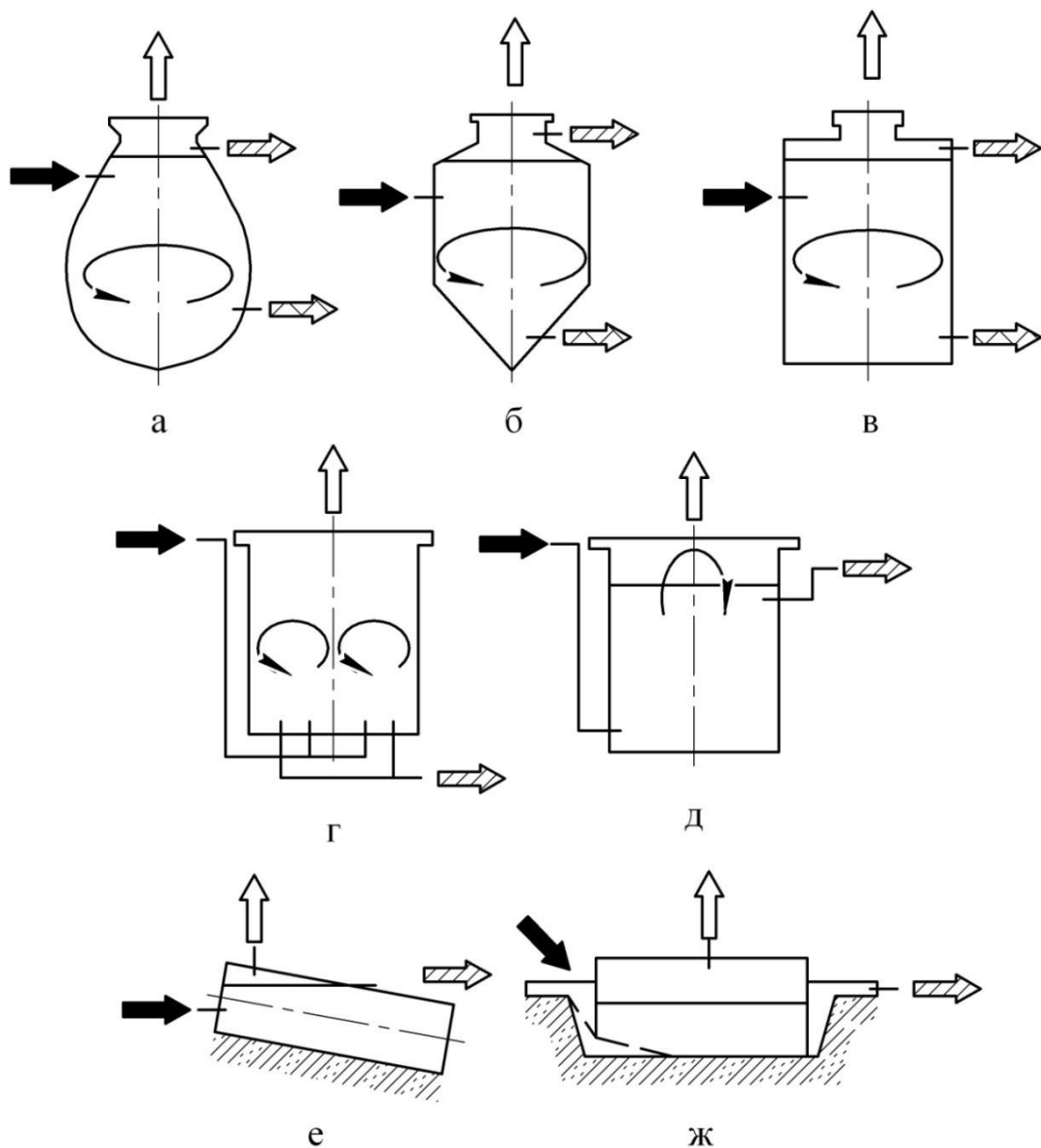


Рисунок 1.2 – Принципові схеми розташування теплообмінників в біореакторі

а – на стінках; б – на днищі; в – в циліндричному теплообміннику; г – розташованому зовні; д – змійовикового типу; е – з парою; ж – з водяною сорочкою

Форма реактора може бути різною. Для створення оптимальних умов для перемішування рідких субстратів, накопичення газів, видалення залишків добрив і розкладання солей, що утворилися на поверхні, рекомендується використовувати овальні резервуари (рис. 1.3). Великі реактори такої форми зазвичай виготовляються з бетону, що суттєво обмежує їх використання через високу вартість виробництва. Однак, менші реактори можуть бути легко виготовлені зі скловолокна, армованої поліефірної смоли, і також є недорогими.



- ← — газ
- ← — рідкий субстрат
- ← — субстрат, що перебродив
- ← — твердий осад

Рисунок 1.3 – Класифікація типів резервуарів біореакторів

а – овальний, б – циліндричний з конусними верхньою та нижньою частинами, в – циліндричний, г – циліндричний з перегородкою, д – у вигляді паралелепіпеда (з перегородкою), е – циліндричний (розміщений з нахилом), ж – траншея в ґрунті (із кришкою).

Циліндричні резервуари з конічним верхом і дном, а також овальні резервуари характеризуються невеликою площею накопичення газу, обмеженою кількістю зважених речовин і легким видаленням маси

відпрацьованих газів. Однак ці реактори створюють менш сприятливі умови для руху рідких субстратів. В індивідуальних установках цей тип реактора має меншу ємність, але виготовляється зі сталі або скловолокна. У скловолоконних реакторах створюються кращі умови для руху субстрату [3].

Циліндричні резервуари відносно прості у виготовленні, що пояснюється великим досвідом у будівництві сільськогосподарських резервуарів (сталь, бетон, склопластик для силосів та інших резервуарів).

Однак, порівняно з циліндричними резервуарами, субстрати не можуть достатньо рухатися в установці, тому слід очікувати вищих витрат на видалення мулу і зважених речовин, а також більшого споживання енергії для перемішування біомаси.

У простих біогазових установках, особливо в невеликих саморобних біогазових установках, камера бродіння має форму паралельного трубчастого резервуару (ставок або крита яма). Для підвищення ефективності такі реактори розділяють вертикальними стінками, утворюючи основну камеру ферментації та камеру для остаточної ферментації і вивантаження осаду. Однак такий тип конфігурації не дозволяє досягти високого ступеня деградації субстрату, оскільки практично неможливо гарантувати однорідну суміш біомаси та осаду.

Неможливо гарантувати однорідну суміш біомаси, контролювати робочий об'єм в камері і дотримуватися часу перебування маси в реакторі, який необхідний для отримання максимальної кількості газу. Утилізація завислого осаду та шламу пов'язана зі значними витратами [14].

Найбільш поширена конструкція біореактора, який використовується в Україні наведено на рисунку 1.4.

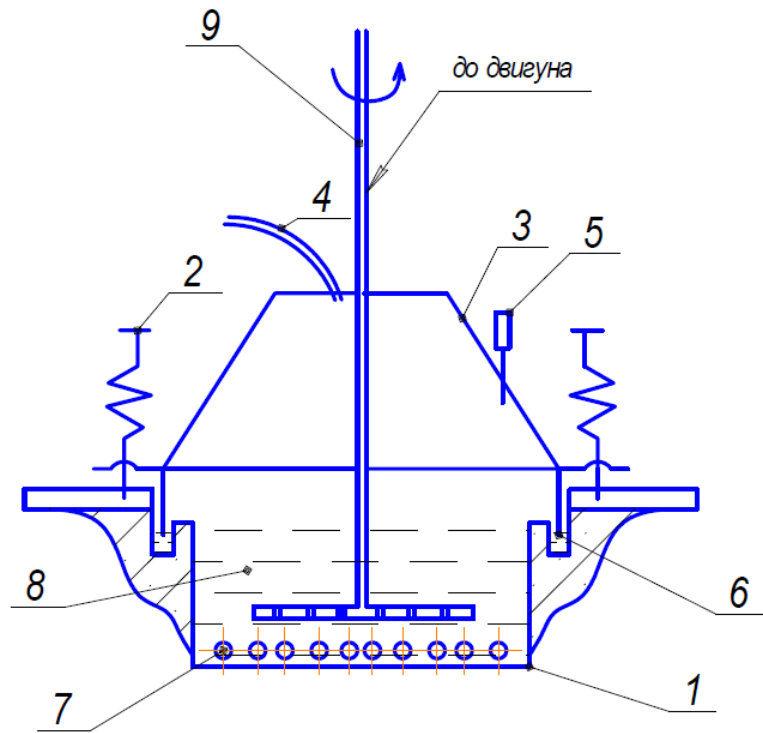


Рисунок 1.4 – Загальна конструкція біореактора

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

Якщо циліндричний резервуар розділений на дві камери вертикальною поперечною стінкою, система виробництва біогазу може бути організована таким чином, що камери резервуара використовуються по черзі (рис. 1.5). Будівництво одного резервуара з перегородкою є більш економічним, ніж будівництво двох окремих резервуарів: таке розташування зменшує важливість ізоляції зовнішньої стінки резервуара і надає системі конструктивну перевагу, оскільки в перегородці легко встановити обігрівачі з достатньо теплопровідного матеріалу.

У горизонтальних резервуарах субстрат переміщується поздовжньо. Для невеликих систем використовуються циліндричні реактори зі сталі або скловолокна. Великі горизонтальні резервуари виготовляються з бетону у вигляді паралельних труб.

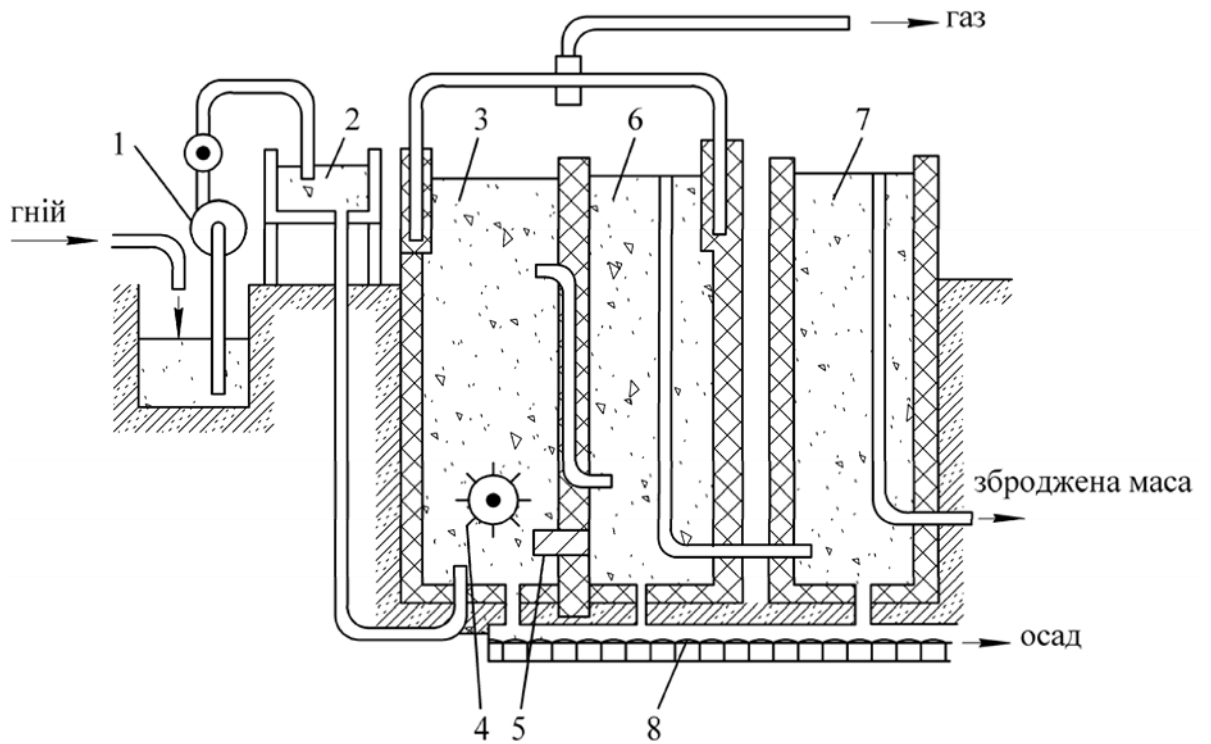


Рисунок 1.5 – Біогазова установка з двома камерами проточного типу

1 – насос; 2 – приймальна камера; 3 – бродильна камера;
 4 – пристрій для перемішування; 5 – підігрівач біомаси; 6 – камера
 остаточного зброджування; 7 – збірник збродженої маси; 8 – шнек

Похиłe положення цих резервуарів полегшує вивантаження відходів на виході. Така конструкція підходить для організації простого механізму змішування. Контейнери у формі траншеї, вкопані в землю, можуть транспортувати великі об'єми субстрату. В якості будівельного матеріалу для стін реактора часто використовують бетон. Траншейні біогазові установки широко розповсюджені (рис. 1.6). Гній, розбавлений водою, подається з фермерських будівель у біогазовий реактор, де відбувається ферментація. Ця установка має функцію перемішування субстрату та бункер для вивантаження збродженого гною.

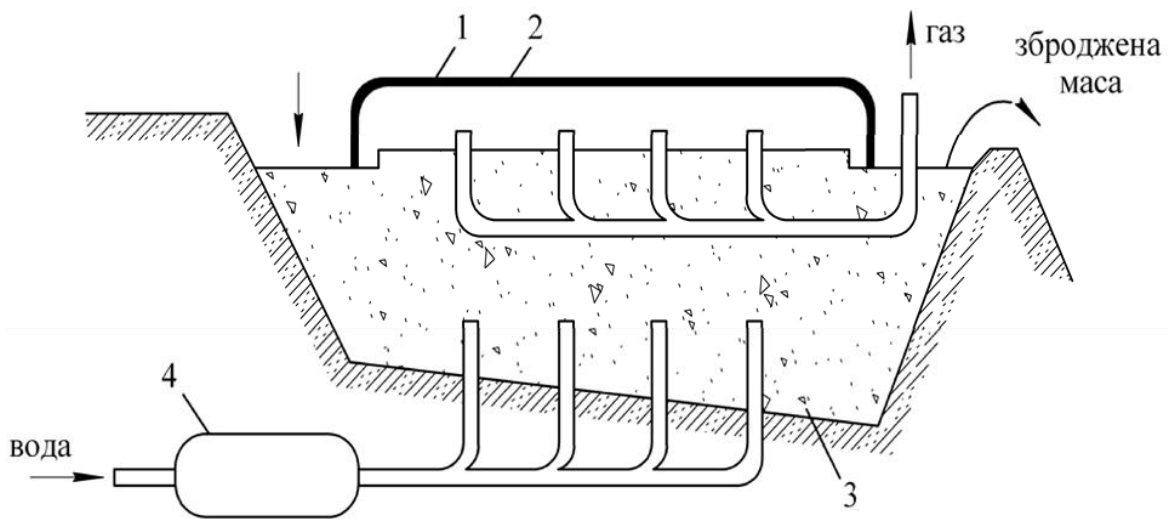


Рисунок 1.6 – Біогазова установка траншейного типу

1 – еластичний збірник біогазу; 2 – плити із пінопласту; 3 – бродильна камера; 4 – нагрівач(бойлер)

Підвищена вологість газу вимагає додаткових запобіжних заходів при підготовці його до використання. Субстрат необхідно примусово циркулювати (перемішувати), щоб контролювати температуру ферментації і мінімізувати різницю температур між вхідним субстратом і субстратом в камері.

Таким чином досягається більш висока температура ферментації і мінімізується різниця температур між вхідним субстратом і субстратом в камері.

Високої ефективності перемішування можна досягти за допомогою лопатевої мішалки, яка переміщує потік рідини під час обертання. При використанні фіксованих форсунок (гідравлічне перемішування) особливу увагу слід звернути на форму і розмір бункера і напрямок потоку рідини. Для перемішування субстратів, що піддаються ферментації, вироблений біогаз може бути перекачаний з компресора в камеру ферментації. Механічні, гідравлічні та газові мішалки призначені для досягнення ефективних процесів ферментації.

Конструкція та механізми роботи систем перемішування та аерації різняться і є важливим принципом класифікації різних типів біореакторів.

Механічні мішалки здебільшого використовуються в невеликих реакторах, тоді як гідравлічні мішалки з рухомими і нерухомими насадками застосовуються у великих реакторах, особливо циліндричних. Газові мішалки

використовуються для впорскування газу в рідкі субстрати під час ферментації. Зберігають біогаз у газгольдерах: високого тиску, мокрих і сухих низького тиску дзвонового типу, оболонкових і балонного типу низького тиску, а також у складних ємностях.

Під час підготовки біогазу до використання його фільтрують, осушують і видаляють вуглекислий газ.

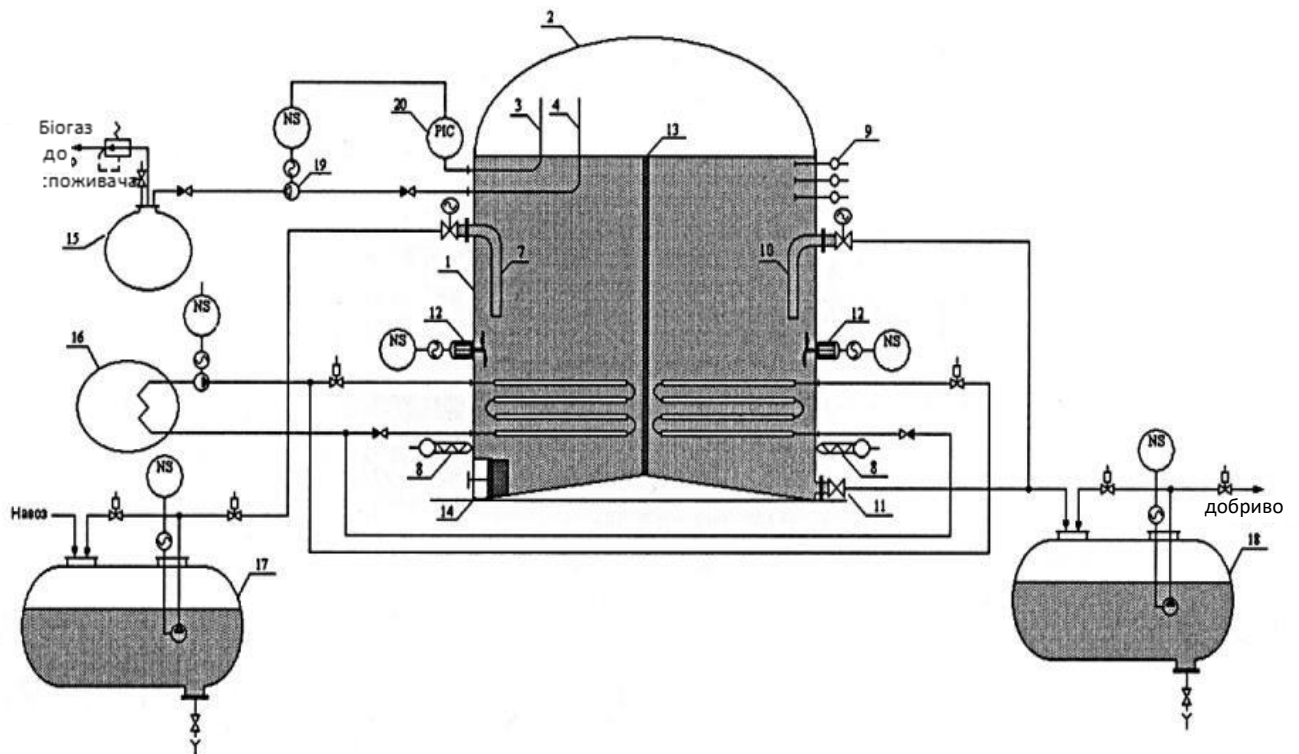


Рисунок 1.7 – Чотирьохкамерна біогазова установка

1 - вертикальна ємність; 2 - купол; 3 - відбірний пристрій для манометра; 4 - вихід біогазу; 5 - теплообмінник; 6 - заслінка; 7 - завантажувальний патрубок; 8 - температурний датчик; 9 - датчики рівня; 10 - вивантажувальний патрубок; 11 - запірний клапан; 12 - мішалка; 13 - перегородка; 14 - перепускні вікна; 15 - газгольдер; 16 - котел; 17 - ємність для біомаси; 18 - ємність для добрива; 19 - компресор; 20 - датчик тиску; 21, 22, 23, 24 - секції; 25 - регулювальна арматура.

Біогазова установка (рис.1.7), що складається з чотирьох камер розділених перегородками корпусу, усередині яких розташовані теплообмінні та перемішувальні пристрої, що працюють незалежно. У першій камері відбувається попереднє бродіння в мезофільному режимі при температурі 300 °С, далі біомаса надходить до другої камери, де відбувається бродіння при

температурі 400 °С, у третій та четвертій камерах відбувається бродіння в термофільному режимі при температурі 500 °С, та доброджування - відповідно. Після чого відбувається вивантаження перебродившої маси в накопичувач.

Біогазова установка барботажного типу (малюнок 1.8) складається з металевого корпусу, в якому розташовані циркуляційна і перфорована системи труб. Підігріта електронагрівачем вода подається в циркуляційну трубу, нагріваючи тим самим зброджувану масу, а частина біогазу, який виробляється, подається в перфоровану трубу та потрапляє в корпус і перемішує біомасу.

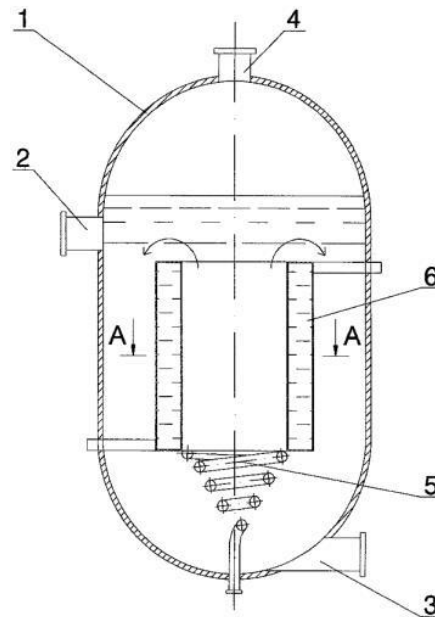


Рисунок 1.8 - Біогазова установка з мішалкою перфорованого типу

1 - корпус; 2,3,4 - патрубки; 5 - циркуляційна труба; 6 - перфорована труба

Найбільш технічно досконалою біогазовою установкою, що складається з біореактора (рисунок 1.9) з розміщеним усередині теплообмінним пристроєм і змішувальним пристроєм, яка представляє собою вертикальний вал із закріпленими лопатками.

Спочатку біомаса подається в камеру 3 біореактора 1, де виконується процес бродіння при мезофільному режимі з нагріванням від теплообмінника 2 і сонячного нагрівача 21. Привід перемішувального пристрою з верхніми 11, 14 і нижніми лопатками 12, 15 здійснюється за допомогою вітрової енергоустановки 18 через передачі 17 і муфти 16, що здійснюють пересування біомаси вгору й донизу, сприяючи тим самим посиленню перемішування та

процесу зброджування, а біогаз, що утворюється, надходить, накопичується в газгольдері 19 і потім подається споживачам 20.

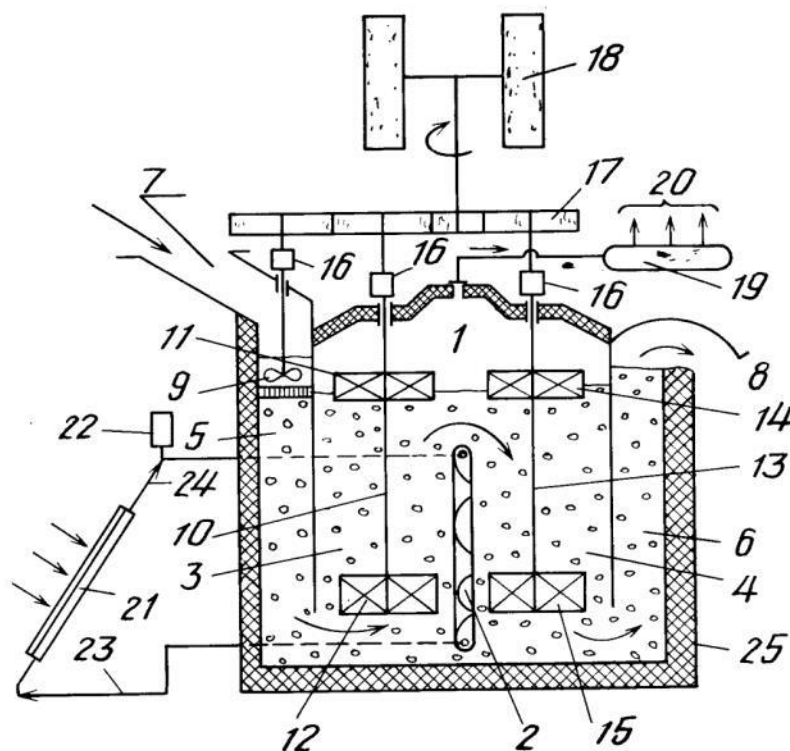


Рисунок 1.9 – Біогазова установка з мішалкою механічного типу

1 - біореактор; 2 - теплообмінник; 3,4 - бродильні камери; 5 - завантаження вихідної сировини; 6 - вивантаження відпрацьованої сировини; 7 - завантажувальний патрубок; 8 - люк; 9 - подрібнювальний пристрій; 10, 13 - вал; 11, 14 - верхні лопатки; 12, 15 - нижні лопатки; 16 - муфта; 17 - передача; 18 - вітродвигун; 19 - газгольдер; 20 - споживачі; 21 - сонячний нагрівач; 22 - розширювальний бак; 23, 24 - трубопроводи; 25 - ізоляція

Недоліками існуючих біогазових установок є складність конструкції, надлишкове й надмірне перемішування, нераціональне використання біогазу, що виробляється, а також нерівномірний нагрів (з різним температурним полем) біомаси по всьому об'єму біореактора.

Проведений аналіз показує, що в усіх наявних БГУ нагрівання і перемішування біомаси здійснюються теплообмінним пристроєм і мішалкою, встановленими усередині біореактора, що представляють два окремі вузли, які працюють незалежно один від одного.

Таким чином, необхідно провести дослідження з підвищенням енергетичних характеристик біогазової установки та оптимізації конструктивних і енергетичних параметрів метантенка.

1.3 Фізико-хімічні особливості біогазу та біодобрива

Біогаз - продукт анаеробного бродіння, тобто це газ, що складається з різних хімічних компонентів. Отже, газ, склад якого змінюється залежно від сировини, умов та часу ферментації. Він є частиною ферментації. Основними компонентами біогазу є метан (до 70%), вуглекислий газ (до 45%), також він містить сірководень і водень, загальний відсоток яких не перевищує 3%. Вміст забруднюючих речовин у баласті та рівень баластних домішок у біогазі досягає 50%, що не тільки ускладнює використання газу, але й пошкоджує обладнання, трубопроводи та газгольдери. Фізичні та хімічні властивості біогазу наведені в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Фізичні особливості біогазу

Основні характеристики	Показники
Густина, кг/м ³	1,3
Об'ємна теплота згоряння, МДж/м ³	20-30
Критичний тиск біогазу, МПа	7-8
Критичний відсоток спалахування у повітрі, %	6-12
Температура займання, °С	650-750
Критична температура, °С	-2,5

В результаті бродіння з органічної маси утворюється мул, який є дуже цінним добривом, що містить велику кількість аміаку, сполук калію і фосфору. Осад не має характерного запаху, який характерний для вихідного суслу до бродіння. Термічна обробка знищує патогенні бактерії та личинки шкідників. Оптимальний час бродіння для інактивації більшості бактерій - 30 днів. Менший час ферментації може бути неповним. Це може призвести до неповної

стерилізації. Осад, перероблений в біогазовій установці, може бути використаний як добриво, він негайно транспортується на поле і не спричиняє бактеріальної шкоди. У той же час, бактерії нейтралізуються разом з насінням, яке може бути присутнім у субстраті. Будь-яке насіння, яке може бути присутнім у субстраті, також знешкоджується. Рекомендується розділити біологічний мул на дві частини. Компоненти: рідка фаза і тверда фаза. Рідку фазу можна використовувати для поливу, тверду фазу можна гранулювати, висушити і використовувати як добриво восени.

Висновки

1. Проведено аналіз сучасних технологій переробки та утилізації посліду та розкрито особливості застосування мікроорганізмів як засобу контролю забруднення навколишнього середовища.
2. Виробництво біогазу з погляду охорони довкілля, енергетики та економіки є дуже важливим процесом, але саме внаслідок такого багатопланового ефекту на даний час не отримано прийнятної енергетичної та економічної оцінки цього процесу.
3. Виконано аналіз властивостей біогазу та добрив, що задовільняє використання біогазу з посліду у побуді.

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ

2.1 Мікробіологічні процеси

Ефективність (зокрема швидкість) мікробіологічних процесів у метантенку залежить від температури бродіння, кислотності оброблюваної маси та ступеня перемішування. У загальному випадку продуктивність процесу метанового бродіння включає додаткові функціональні елементи, що виконують такі функції, як нагрівання, перемішування, регулювання рН і відведення тепла з метантенка. Загалом продуктивність процесів метанового бродіння характеризується зміною об'єму біогазу з плином часу [11].

Продуктивність процесу метанового бродіння виражається таким рівнянням:

$$P = \frac{dG}{dt} \quad (2.1)$$

де $\frac{dG}{dt}$ - зміна кількості продукту в часі, м³/с

Загальний вид визначення продуктивності біогазу з рахунку технологічних характеристик процесу:

$$P = k\Delta C \quad (2.2)$$

де k – стала швидкості процесу

ΔC – рушійна сила процесу.

Рушійною силою процесу ΔC є постійна величина. Це пояснюється тим, що концентрація органічних речовин у посліді є постійною і залежить лише від технології утримання птиці.

Отже, продуктивність процесу метаногенеза визначається сталою швидкості процесу – рівняння Арреніуса:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2.3)$$

де k_0 – передекспоненціальний множник;

E – уявна енергія активації процесу, Дж/моль;

R – молярна стала газу, Дж/мольК;

T – абсолютна температура, К

З рівняння (2.3) спостерігаємо, що метаболізм бактерій знаходиться у функціональній залежності від енергії активації та абсолютної температури. Досвід експлуатації біогазових установок показує, що вони споживають від 20% до 50% виробленого біогазу для підтримки теплового режиму роботи. Це може призвести до значних коливань температури біогазу. Такий широкий діапазон зміни температури пов'язаний із залежністю теплового режиму роботи БГУ від температури навколишнього середовища. Причому одночасно. При цьому важливо, щоб різні види метаногенних бактерій завершували свій життєвий цикл за різних температур. Температури характеризуються двома інтервалами:

- мезофільний (мезофільні бактерії) – температурний режим їх утворення від 25 до 38 °С. При цьому оптимальна температура є 37 °С;
- термофільний (термофільні бактерії) – температурний режим – від 45 до 60 °С. При цьому оптимальна температура є 56 °С.

Недоліки та переваги наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики термо- та мезофільного режимів

Режим зброджування	Переваги	Недоліки
Мезофільний	<ul style="list-style-type: none"> - продуктивність газу не знижується при відхиленні температури в межах 1-2°C від номінального значення; - на підтримання температури необхідно менше енергетичних витрат 	<ul style="list-style-type: none"> - не інтенсивне виділення газу; - для повного розкладання субстрату необхідно 25 днів. - біодобриво не є повністю стерильним.
Термофільний	<ul style="list-style-type: none"> - більш інтенсивне виділення біогазу; - для повного розкладання субстрату необхідно 12 днів; - біодобриво є повністю стерильним. Крім того, його можна застосовувати в якості кормових добавок для тварин. 	<ul style="list-style-type: none"> - значно знижується продуктивність біогазу при зміні температури на 1-2°C від номінального значення. - на підтримання необхідної температури необхідно більше енергетичних витрат

БГУ містить пристрій для перемішування зброджуваної органічної маси. Основна мета перемішування - запобігання утворенню на поверхні біомаси, що

уповільнює бродіння і перемішування осаду. Таким чином, доцільно розглянути теплові процеси, що протікають в біогазові установці, щоб визначити вплив на них самої установки. Як правило, під час інженерних розрахунків визначають тепловіддачу, оскільки теплообмін у рідинах позначається і на тепловіддачі, а врівноважувальний потік тепла завжди спрямований у бік зниження температури.

2.2 Моделювання теплових процесів

Розглянемо процес теплопереносу: оскільки кожна частинка рухається з різною швидкістю, тому швидкість частинок зменшується у напрямлені до стінки біореактора установки ,а швидкість частинок, які прилипли до стінок біореактора дорівнює нулю. З урахуванням закону Фур'є (закон теплопровідності) визначаємо тепловий потік через шар води біля стінки.

$$q = -\lambda_g \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (2.4)$$

де λ_g – коефіцієнт теплопровідності води, Вт/(мК);

T- поточна температура, К.

Диференційне рівняння для рухомої частинки рідини:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \sigma_x \frac{\partial T}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial T}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\Theta}{c\rho} \quad (2.5)$$

де τ - час, с;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - складові швидкості води, м/с;

Θ - кількість теплоти, яка поглинається одиницею об'єму в одиницю часу, Дж/с;

$c\rho$ - питома об'ємна теплоємність, Дж/(м³К);

x, y, z – координати.

Для розрахунку процесу теплопередачі використовується закон теплопровідності, але необхідно знати вид функції температурного поля в рідині, яке описується рівнянням (2.5), яке складається з складових швидкості

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ визначаємо систему рівнянь (2.6-2.8), з яких знайдемо умову нерозривності потоку (2.9):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \tau} + \sigma_x \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \sigma_z \frac{\sigma T}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial z^2} \right) + \left(g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \tau} + \sigma_x \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \sigma_z \frac{\sigma T}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial z^2} \right) + \left(g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \right) \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \tau} + \sigma_x \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \sigma_z \frac{\sigma T}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial z^2} \right) + \left(g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \sigma_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

Рівняння (2.6-2.8) та (2.9) в загальному вигляді описують зв'язок між фізичними параметрами. Для повного опису теплових процесів дана система рівнянь повинна містити додаткові рівняння, в які пов'язують фізичні, геометричні та часові граничні умови.

Для розрахунку процесу тепловіддачі використаємо закон Ньютона-Ріхмана:

$$Q = \alpha_c F (t_g - t_c) \quad (2.10)$$

α_c - коефіцієнт теплопередачі стінки біореактора;

F – площа поверхні зіткнення рідини з стінкою теплообмінника;

t_g, t_c - температури рідини та поверхні стінки теплообмінника.

Коефіцієнт теплопередачі визначається з виразу:

$$\alpha_c = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{h_{c\sigma}}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2.14)$$

α_1, α_2 - коефіцієнт теплопередачі від гарячої рідини до стінки теплообмінника та від стінки до біомаси відповідно, Вт/(м²К);

$h_{c\sigma}$ - товщина стінки біореактора, м

λ_c - коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплообмінника, Вт/(мК)

Лінійну щільність теплового потоку визначимо за формулою:

$$q = \frac{\pi(t_g - t_n)}{\frac{1}{\alpha_n D_{\text{вв}}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{\text{нв}}}{D_{\text{вв}}} + \frac{1}{\alpha_g D_{\text{нв}}}} \quad (2.15)$$

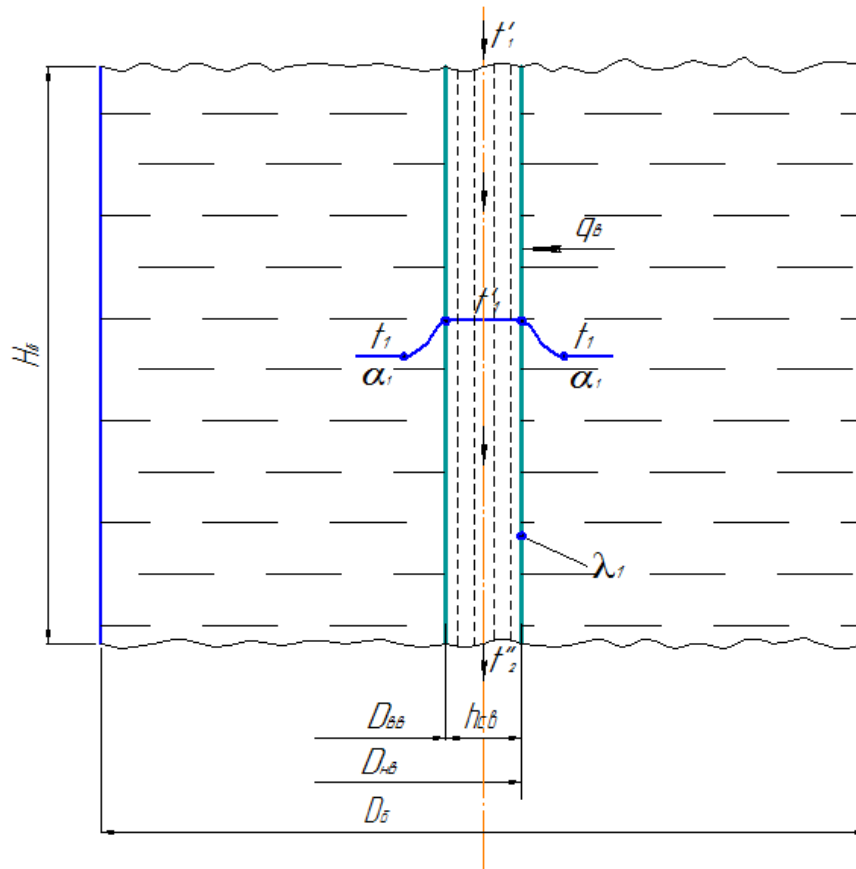


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема теплообмінника-змішувача біореактора

Знаменник рівняння (2.15) характеризує інтенсивність передачі тепла від рідини до посліду через стінку теплообмінника, та позначимо його як коефіцієнт K_T .

Таким чином, термічний опір теплопередачі:

$$R = \frac{1}{K_T} = \frac{1}{\alpha_n D_{\text{вв}}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{\text{нв}}}{D_{\text{вв}}} + \frac{1}{\alpha_g D_{\text{нв}}} \quad (2.16)$$

Де лінійний тепловий опір теплопровідності стінки біореактора:

$$R_c = \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{\text{нв}}}{D_{\text{вв}}} \quad (2.17)$$

Термічний опір теплопередачі залежить від діаметра стінки біореактора біогазової установки:

$$q_{\text{вв}} = \frac{Q}{\pi D_{\text{вв}} H_M} = \frac{K_T}{D_{\text{вв}}} (t_{\text{в}} - t_n) \quad (2.18)$$

$$q_{\text{нв}} = \frac{Q}{\pi D_{\text{нв}} H_M} = \frac{K_T}{D_{\text{нв}}} (t_{\text{в}} - t_n) \quad (2.19)$$

де H_M – висота біогазової установки, м

Якщо прийняти наступне:

$$K_{\text{вв}} = \frac{K_T}{D_{\text{вв}}}, K_{\text{нв}} = \frac{K_T}{D_{\text{нв}}} \quad (2.20)$$

Тоді отримаємо

$$\begin{aligned} q_{\text{вв}} &= K_{\text{вв}} (t_{\text{в}} - t_n), \\ q_{\text{нв}} &= K_{\text{нв}} (t_{\text{в}} - t_n) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Температури внутрішньої стінки біореактора:

$$\begin{aligned} t_{c_1} &= t_n - \frac{q_{\text{вв}}}{\pi \alpha_n D_{\text{вв}}} \frac{1}{\pi \alpha_n D_{\text{вв}}}, \\ t_{c_2} &= t_{\text{в}} + \frac{q_{\text{нв}}}{\pi \alpha_{\text{в}} D_{\text{нв}}} \frac{1}{\pi \alpha_{\text{в}} D_{\text{нв}}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Між зовнішньою стінкою біогазової установки та навколишнім середовищем здійснюється теплообмін. Перетин зовнішньої стінки БГУ умовно представим як плоску пластину, яка складається з двох частин (рис. 2.2).

Для кожного шару значення щільності теплового потоку визначається за формулою:

$$q_{c_1} = \frac{\lambda_c}{h_{nc}} (t_{c_1} - t_{c_2}), \quad (2.23)$$

$$q_{c_2} = \frac{\lambda_i}{h_i} (t_{c_2} - t_i) \quad (2.24)$$

λ_i – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції біореактора, Вт/(мК);

h_{nc} - товщина зовнішньої стінки біореактора;

t_{c_1}, t_{c_2} - температура внутрішньої та зовнішньої поверхні стінки відповідно, К

t_i - температура на поверхні теплоізоляції, К;

h_i - товщина теплоізоляційного матеріалу, м.

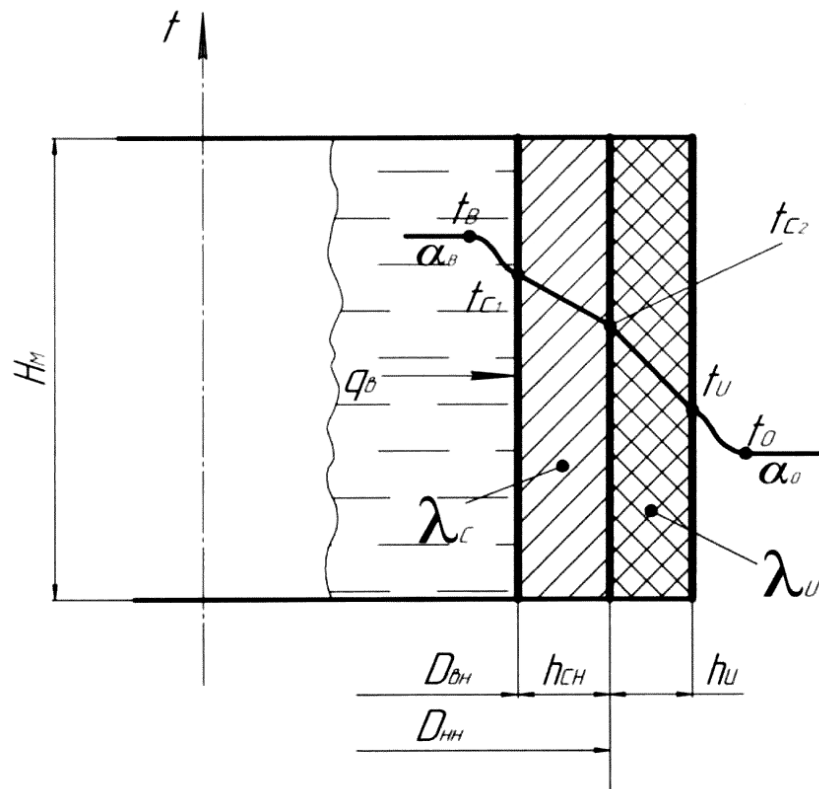


Рисунок 2.2 Розрахункова схема теплообміну

Вирішимо спільно вираз (2.23) та (2.24) відносно теплового опору:

$$t_{c1} - t_{c2} = \frac{q_{c1} h_{nc}}{\lambda_c}, \quad (2.25)$$

$$t_{c2} - t_i = \frac{q_{c2} h_i}{\lambda_i} \quad (2.26)$$

Отже, через всі шари проходить однаковий тепловий потік, то справедлива рівність.

$$q_{c1} = q_{c2} = q_в \quad (2.27)$$

З рахунку (2.27) отримуємо:

$$q_в = \frac{t_{c2} - t_i}{\frac{h_{nc}}{\lambda_c} + \frac{h_i}{\lambda_i}} \quad (2.28)$$

У відповідності залежності

$$R_{nc} = \frac{1}{\alpha_в D_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{нн}}{D_{вн}} + \frac{1}{\alpha_o D_{нн}} \quad (2.29)$$

α_o - коефіцієнт теплопередачі оточуючого повітря;

$D_{nn}, D_{вн}$ - зовнішній та внутрішній діаметр стінки біореактора, м.

Таким чином, при сталих значеннях $\alpha_o, D_{вн}, \lambda_c, \alpha_o$ повний термічний опір теплопередачі зовнішньої стінки біореактору БГУ залежить тільки від зовнішнього діаметра (2.29), тому відповідно $R_{вн} = \frac{1}{\alpha_o D_{вн}} = const$.

Отже, термічний опір теплопровідності зовнішньої стінки БР:

$$R_{нс} = \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{nn}}{D_{вн}} \quad (2.30)$$

Як видно з рівняння (2.30) із збільшенням D_{nn} збільшується опір теплопровідності зовнішньої стінки БР. В цьому випадку термічний опір теплопередачі на зовнішній поверхні БР буде сталим $R_{nn} = \frac{1}{\alpha_o D_{nn}} = const$. Таким чином, повний термічний опір зовнішньої стінки БР залежить від зміни термічних опорів теплопровідності та теплопередачі від зовнішньої поверхні БР.

Необхідно визначити, як буде змінюватись термічний опір зовнішньої стінки БР при збільшенні її товщини. Для цього, похідну прирівнюємо до нуля:

$$\frac{d(R)}{d(D)} = \frac{1}{2\lambda_c D_{nn}} + \frac{1}{\alpha_o D_{nn}^2} = 0 \quad (2.31)$$

Значення D_{nn} при $R_{nn} = \frac{1}{\alpha_o D_{nn}} = const$ відповідає екстремуму, зокрема мінімуму функції. При значенні $D_{нк} = \frac{2\lambda_c}{\alpha_o}$ термічний опір мінімальний.

Значення діаметра зовнішньої стінки БР відповідного мініимальному повному опору теплопередачі в стінці БР являється критичним реактором, який визначається за формулою:

$$D_{нк} = \frac{2\lambda_c}{\alpha_o} \quad (2.32)$$

Розглянуті залежності необхідно враховувати при виборі теплової ізоляції зовнішньої стінки БР. Для визначення критичного діаметра ізоляції зовнішньої стінки БР необхідно визначити опір теплопередачі:

$$R = \frac{1}{\alpha_o D_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{нн}}{D_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{D_i}{D_{нн}} + \frac{1}{\alpha_o D_{нн}} \quad (2.33)$$

D_i - діаметр ізоляції БР, м.

Після вибору ізоляційного матеріалу БР визначається критичний діаметр:

$$D_{кі} = \frac{2\lambda_i}{\alpha_o} \quad (2.34)$$

Таким чином, рішенням розглянутої системи рівнянь є складною задачею. Тому тільки експериментальні дослідження допоможуть отримати чисельні значення шуканих змінних, після чого складаються рівняння, які описують результати дослідів.

2.3 Моделювання режимів роботи та конструктивних параметрів біореактора

Найбільш точна і повна модель допомагає спростити процес аналізу динамічних характеристик фізичного явища, що протікає в об'єкті дослідження за умови її верифікації на предмет адекватності реальному процесу. Доцільність математичного моделювання зумовлена, як дорожнечою проведення експериментів на реальному біореакторі, за умови необхідності його проектування та виготовлення, так і значними витратами часу, внаслідок високої інерційності теплових процесів, на прикладі біореактора, через великі габаритні розміри установки.

Розглянемо процес формування математичної моделі для частини біореактора, яка дасть змогу полегшити дослідження теплових процесів, що протікають у даній установці.

На рис.2.3 наведена схема розташування лопатей теплообмінника-мішалки.

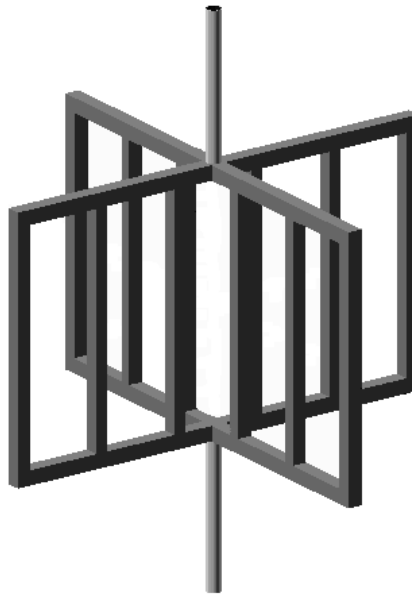


Рисунок 2.3 Модель розташування лопатей теплообмінника-мішалки
 На рисунку 2.4 зображені геометричні параметри біореактора та теплообмінника-мішалки.

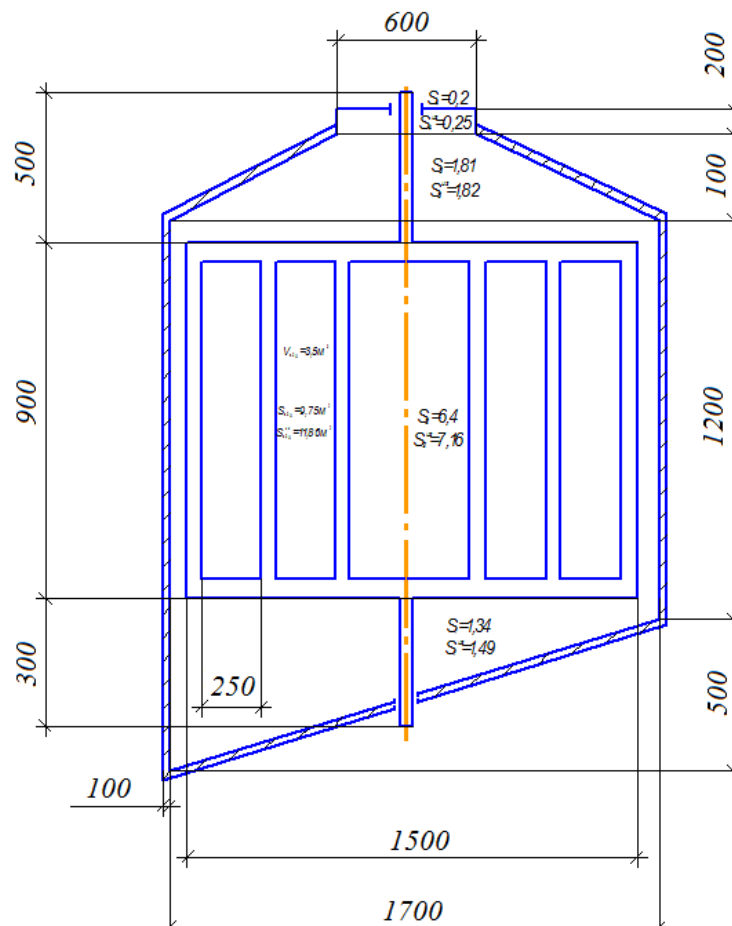


Рисунок 2.4 – Геометричні параметри БР та ТО-М

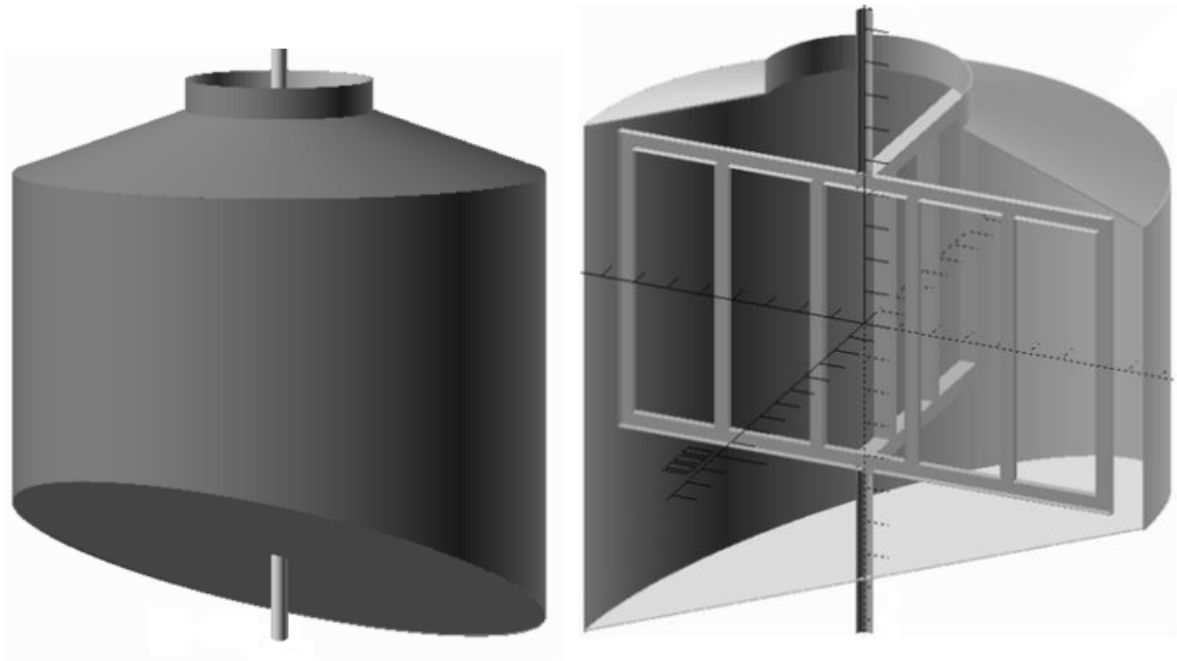


Рисунок 2.5 – Розрахункова тривимірна модель БР

Для математичного моделювання теплових процесів в БП, представимо моделюючу частину БР у вигляді спрощеної схеми (рис.2.5, 2.6)

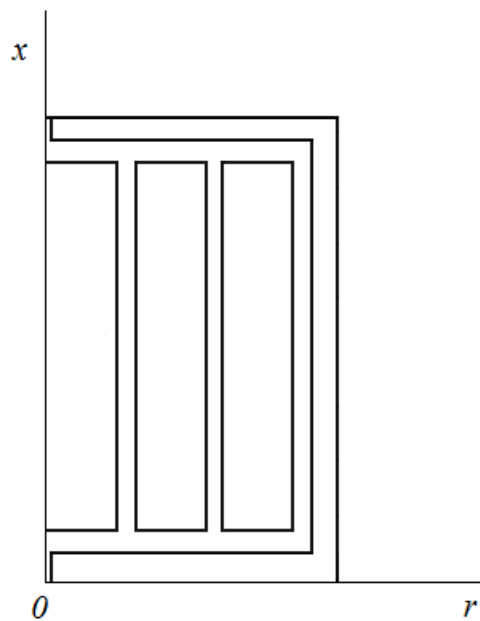


Рисунок 2.6 – Спрощена схема частини ТО-М

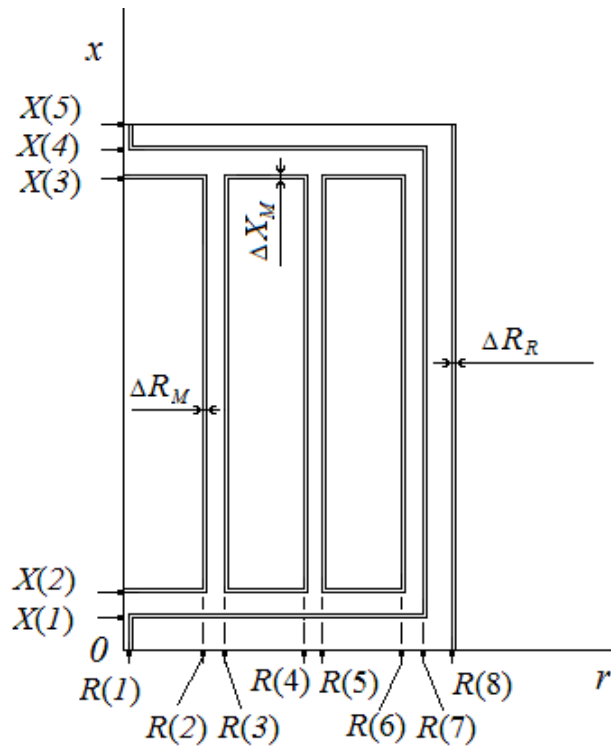


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема об’єкту моделювання з геометричними параметрами

Для опису математичної моделі в циліндричній системі координат, вводимо основні позначення:

x, r – просторові координати;

τ – час;

$R(\alpha), \alpha = 1, 2, \dots, 8, \Delta R_M, \Delta R_R$ – основні геометричні параметри камери по осі r ;

$X(\alpha), \alpha = 1, 2, \dots, 5, \Delta X_M$ – основні геометричні параметри по осі x .

Додаємо дані значення на схему з рисунка 2.6 (див. рис. 2.7).

Тоді система рівнянь теплопровідності для дослідного об’єкта наводиться в наступному вигляді:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T, T = f(x, r, \tau), \beta = 1, 2, \dots, 4,$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r^2}, \tau > 0$$

Якщо $\beta=1$, тоді:

$$1) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - g \frac{\partial T}{\partial x}, 0 < x < X(1) + \Delta X_M, 0 < r < R(1);$$

$$2) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - g \frac{\partial T}{\partial r}, X(1) + \Delta X_M \leq x < X(2), 0 < r < R(7);$$

$$3) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - \mathcal{G} \frac{\partial T}{\partial x}, X(2) + \Delta X_m \leq x < X(3) + \Delta X_m,$$

$$R(2) + \Delta R_m < r < R(3);$$

$$4) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - \mathcal{G} \frac{\partial T}{\partial x}, X(2) + \Delta X_m \leq x < X(3) + \Delta X_m,$$

$$R(4) + \Delta R_m < r < R(5);$$

$$5) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - \mathcal{G} \frac{\partial T}{\partial x}, X(2) + \Delta X_m \leq x < X(3) + \Delta X_m,$$

$$R(6) + \Delta R_m < r < R(7);$$

$$6) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - \mathcal{G} \frac{\partial T}{\partial x}, X(3) < x < X(4), 0 < r < R(7);$$

$$7) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - \mathcal{G} \frac{\partial T}{\partial x}, X(4) \leq x < X(5), 0 < r < R(1).$$

Якщо $\beta=2$, тоді:

$$8) 0 < x < X(1), R(1) + \Delta R_m < r < R(8);$$

$$9) X(1) \leq x \leq X(3) + \Delta X_m, R(7) + \Delta R_m < r < R(8);$$

$$10) X(4) + \Delta X_m \leq x < X(5), R(1) + \Delta R_m < r < R(8);$$

$$11) X(2) + \Delta X_m < x < X(3), 0 < r < R(2);$$

$$12) X(2) + \Delta X_m < x < X(3), R(3) + \Delta R_m < r < R(4);$$

$$13) X(2) + \Delta X_m < x < X(3), R(5) + \Delta R_m < r < R(6);$$

Якщо $\beta=3$, тоді:

$$14) 0 < x < X(1), R(1) < r < R(1) + \Delta R_m;$$

$$15) X(1) < x < X(1) + \Delta X_m, R(1) < r < R(7) + \Delta R_m;$$

$$16) X(1) + \Delta X_m < x < X(4), R(7) < r < R(7) + \Delta R_m;$$

$$17) X(4) < x < X(4) + \Delta X_m, R(1) < r < R(7) + \Delta R_m;$$

$$18) X(4) + \Delta X_m < x < X(5), R(1) < r < R(1) + \Delta R_m;$$

$$19) X(2) < x < X(2) + \Delta X_m, 0 < r < R(2) + \Delta R_m;$$

$$20) X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), R(2) < r < R(2) + \Delta R_m;$$

$$21) X(3) < x < X(3) + \Delta X_m, 0 < r < R(2) + \Delta R_m;$$

$$22) X(2) < x < X(2) + \Delta X_m, R(3) < r < R(4) + \Delta R_m;$$

$$23) X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), R(3) < r < R(3) + \Delta R_m;$$

$$24) X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), R(4) < r < R(4) + \Delta R_m;$$

$$25) X(3) < x < X(3) + \Delta X_m, R(3) < r < R(4) + \Delta R_m;$$

$$27) X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), R(5) < r < R(5) + \Delta R_m;$$

$$28) X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), R(6) < r < R(6) + \Delta R_m;$$

$$29) X(3) < x < X(3) + \Delta X_m, R(5) < r < R(6) + \Delta R_m.$$

Якщо $\beta=3$, тоді:

$$30) 0 < x < X(5), R(8) < r < R(8) + \Delta R_R.$$

Для вирішення отриманої системи рівнянь в частинних похідних необхідно описати крайові та граничні умови.

Крайові умови напишемо в наступній системі рівнянь. Отже, у зв'язку з тим що зовнішня частина камери теплоізолювана отримаємо:

$$\frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial \tau} = 0, 0 \leq x \leq X(5), r = R(8) + \Delta R_R, \tau \geq 0$$

В залежності з умовами симетрії, у центрі камери, виконується наступна умова:

$$\frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial \tau} = 0, 0 \leq x \leq X(5), \tau \geq 0.$$

Зверху та знизу в залежності з особливостями БР, приймаються наступні умови:

$$\lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = q1(\tau), x = X(5), 0 \leq r \leq R(1), \tau \geq 0$$

$$-\lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = q2(\tau), x = X(5), R(1) < r \leq R(8) + \Delta R_R, \tau \geq 0$$

$$-\lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = q3(\tau), x = 0, 0 \leq r \leq R(8) + \Delta R_R, \tau \geq 0$$

Напишемо умови на межах розділе середовищ ($\tau \geq 0$):

$$S5: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, 0 < x \leq X(1) + \Delta X_m, r = R(1);$$

$$S6: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, 0 < x \leq X(1), r = R(1) + \Delta R_R;$$

$$S7: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(1), R(1) + \Delta R_R \leq r \leq R(7) + \Delta R_R;$$

$$S8: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(1) + \Delta X_m, R(1) \leq r \leq R(7);$$

$$S9: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(1) \leq x \leq X(4) + \Delta X_m, r = R(7) + \Delta R_m;$$

$$S10: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(1) + \Delta X_m \leq x \leq X(4), r = R(7)$$

$$S11: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(4) + \Delta X_m, R(1) + \Delta R_r \leq r \leq R(7) + \Delta R_r;$$

$$S12: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(4), R(1) \leq r \leq R(7);$$

$$S13: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(4) + \Delta X_m \leq x \leq X(5), r = R(1) + \Delta R_r$$

$$S14: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(4) \leq x \leq X(5), r = R(1);$$

$$S15: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2), 0 \leq r \leq R(2) + \Delta R_m;$$

$$S16: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2) + \Delta X_m, 0 \leq r \leq R(2);$$

$$S17: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), r = R(2);$$

$$S18: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) \leq x \leq X(3) + \Delta X_m, r = R(2) + \Delta R_m;$$

$$S19: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(3), 0 \leq r \leq R(2) + \Delta R_m;$$

$$S20: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(3) + \Delta X_m, 0 \leq r \leq R(2);$$

$$S21: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2), R(3) \leq r \leq R(4) + \Delta R_m;$$

$$S22: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2) + \Delta X_m, R(3) + \Delta R_r \leq r \leq R(4);$$

$$S23: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) \leq x \leq X(3) + \Delta X_m, r = R(3);$$

$$S24: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), r = R(3) + \Delta R_m;$$

$$S25: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), r = R(4);$$

$$S26: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) \leq x \leq X(3) + \Delta X_m, r = R(4) + \Delta R_m;$$

$$S27: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2), R(3) \leq r \leq R(4) + \Delta R_m;$$

$$S28: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(3) + \Delta X_m, R(3) + \Delta R_m \leq r \leq R(4);$$

$$S29: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2), R(5) \leq r \leq R(6) + \Delta R_m;$$

$$S30: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2) + \Delta X_m, R(5) + \Delta R_m \leq r \leq R(6);$$

$$S31: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) \leq x \leq X(3) + \Delta X_m, r = R(5);$$

$$S32: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), r = R(5) + \Delta R_m;$$

$$S33: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), r = R(6);$$

$$S34: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) \leq x \leq X(3) + \Delta X_m, r = R(6) + \Delta R_m;$$

$$S35: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(3), R(5) \leq r \leq R(6) + \Delta R_m;$$

$$S36: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(3) + \Delta X_m, R(5) + \Delta R_m \leq r \leq R(6);$$

$$S37: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(4) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, 0 \leq x \leq X(4), r = R(8).$$

де $\Delta R_m, \Delta X_m$ - товщина стінок біореактора та труб теплообмінника-мішалки;

$q_1(\tau)$ – тепловий потік в теплообміннику-мішалки;

$q_2(\tau), q_3(\tau)$ – теплові втрати;

g - швидкість потоку теплоносія.

Моделювання проводили виходячи з припущення, що в початковий момент часу температура рівномірно розподілена по камері, тобто $T(x, r, \tau) = const = 0$.

Коефіцієнти температуропровідності $a(\beta)$ матеріалів визначаються із співвідношення:

$$a(\beta) = \frac{\lambda(\beta)}{c(\beta)\rho(\beta)}, \left[\frac{m^2}{c} \right], \beta = 1, 2, \dots, 4,$$

де ρ – густина речовини, кг/м³;

λ – коефіцієнт теплопровідності речовини, Вт/(мК);

c - теплоємність речовини, Дж/(кгК).

- Жаростійка сталь

$$a(3) = \alpha(4) \frac{54,4}{7800 \cdot 486} = 1,42505 \cdot 10^5, \left[\frac{m^2}{c} \right];$$

- повітря

$$a(1) = \frac{0,0075}{960 \cdot 1,32} = 0,0000059 \left[\frac{m^2}{c} \right];$$

- вода

$$a(2) = \frac{0,561}{4,195 \cdot 915} = 0,0004291 \left[\frac{m^2}{c} \right];$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Теплофізичні параметри речовин

Речовина	Теплопровідність, λ [Вт/мК]	Густина, ρ [кг/м ³]	Теплоємність, c [Дж/кгК]	Температуропровідність, a [м ² /с]
Вода	0,561	915	4,179	0,0004291
Повітря	0,0075	1,32	960	0,0000059
Жаростійка сталь	54,4	7760-8000	486	0,0000143505

2.4 Результати аналітичного обґрунтування

В роботі розглядали анаеробне перероблення з метою отримання біогазу при заданих температурних режимах: мезофільному та термофільному. Дані режими важко підтримати з оптимальними параметрами, особливо коли температура повітря є від'ємною. Тому забезпечення процесу бродіння виконується шляхом зниження тепловтрат через конструкцію біореактора (теплоізоляція).

Отже, температура впливає на кількість газу, яка може бути вироблена з певної кількості органічної речовини протягом певного часу в біореакторі, а також на тривалість процесу зброджування, необхідного для виділення певної кількості газу при певній температурі.

Таким чином, для різних теплових режимів проведені аналітичні дослідження із визначення теплових втрат завдяки термічному опору у відповідному температурному режимі (-20...20⁰С) через захисні конструкції біореактора. (таблиця 2.3, 2.4)

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

Термічний опір	Температура зовнішнього середовища, $^{\circ}\text{C}$								
	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
$R=1$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{опт}}\text{БГУ}=32^{\circ}\text{C}$	12,5	16,8	22	27,1	32	38	41,8	46	52
$R=1$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{макс}}\text{БГУ}=45^{\circ}\text{C}$	24,5	29	34,8	41	44,8	51	55	61	66
$R=2$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{опт}}\text{БГУ}=32^{\circ}\text{C}$	6	8,5	11,3	13,8	16,1	19	22	24	27
$R=2$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{макс}}\text{БГУ}=45^{\circ}\text{C}$	12	15	17	20,5	22	24,5	28	29	31,5
$R=3$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{опт}}\text{БГУ}=32^{\circ}\text{C}$	4,5	5,5	7	9,1	11	13	14,5	16	17,5
$R=3$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{макс}}\text{БГУ}=45^{\circ}\text{C}$	8,15	9,8	11,8	13,2	14	17	18	21	22
$R=4$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{опт}}\text{БГУ}=32^{\circ}\text{C}$	3,2	4,5	5,6	6,7	8,3	9,5	11	12	13,5
$R=4$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{макс}}\text{БГУ}=45^{\circ}\text{C}$	6,5	7,6	8,5	10,1	11,6	13	14	14,8	17,1

Таблиця 3.3 – Тепловтрати для термофільного інтервалу бродіння ($T=45-55^{\circ}\text{C}$,
 $T_{\text{опт}}=48-51^{\circ}\text{C}$)

Термічний опір	Температура зовнішнього середовища, $^{\circ}\text{C}$								
	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
$R=1$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{опт}}\text{БГУ}=50^{\circ}\text{C}$	31	36	40	46	50	55	6,5	66	70
$R=1$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{макс}}\text{БГУ}=55^{\circ}\text{C}$	34,5	41	46	51	55	60	64,8	71	74
$R=2$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{опт}}\text{БГУ}=50^{\circ}\text{C}$	15	17,5	21	22,5	26	28	31	33	38
$R=2$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{макс}}\text{БГУ}=55^{\circ}\text{C}$	17	21	22,5	26,1	28	31	33,1	35	39
$R=3$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{опт}}\text{БГУ}=50^{\circ}\text{C}$	10,5	11,9	14	15,5	17	19	21	23,5	24
$R=3$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{макс}}\text{БГУ}=55^{\circ}\text{C}$	11	14	16	17	18,5	21	22,1	23	26
$R=4$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{опт}}\text{БГУ}=50^{\circ}\text{C}$	8	9	11	12	13	14	15,8	16	18
$R=4$ ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), $T_{\text{макс}}\text{БГУ}=55^{\circ}\text{C}$	8,9	11	11,5	13	14	15,3	17,2	18	19

Аналіз отриманих результатів свідчить, що для мезофільного режиму анаеробного процесу в БР при відємних температурах і термічному опорі, який рівняється одиниці, тепловтрати досягають величин 45-65 Вт. Найбільш значні втрати при термофільному режимі при -20°C можуть досягти 75 Вт. Слід зазначити, що найменші тепловтрати досягаються при $R > 3$ ($\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$)/Вт. Це свідчить про те, що оптимального теплового балансу можна досягти за рахунок збільшення термічного опору захисної конструкції та зменшення теплових втрат біогазової установки.

Висновки

1. Обґрунтовано мікробіологічні процеси, що відбуваються в біогазових установках. Показано, що метаболічна активність і плодючість метаногенних бактерій залежать головним чином від температури. Для підтримання заданого температурного режиму в біогазовій установці витрачається 20-50% від загального обсягу виробленого біогазу.
2. Обґрунтовано технологічну схему та параметри біогазової установки, яка відрізняється від відомих схем тим, що змішувальний пристрій є одночасно нагрівальним елементом.
3. Отримані аналітичні вирази для визначення термічного опору теплопередачі в залежності від геометричних розмірів поверхні біореактора.
4. Розроблена математична модель теплових процесів в БР, за допомогою якою можна проводити дослідження зі зміною геометричних параметрів БР та режимів роботи біогазової установки.

3 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Описання технологічної схеми БГУ в лабораторних умовах

При проектуванні біогазової установки конструктивним рішенням є сумісне використання змішувача та нагрівального елемента в одному вузлі, що дає можливість підтримувати задану температуру по всьому об'єму.

Технологічна схема розробленої БГУ наведена на рисунку 3.1.

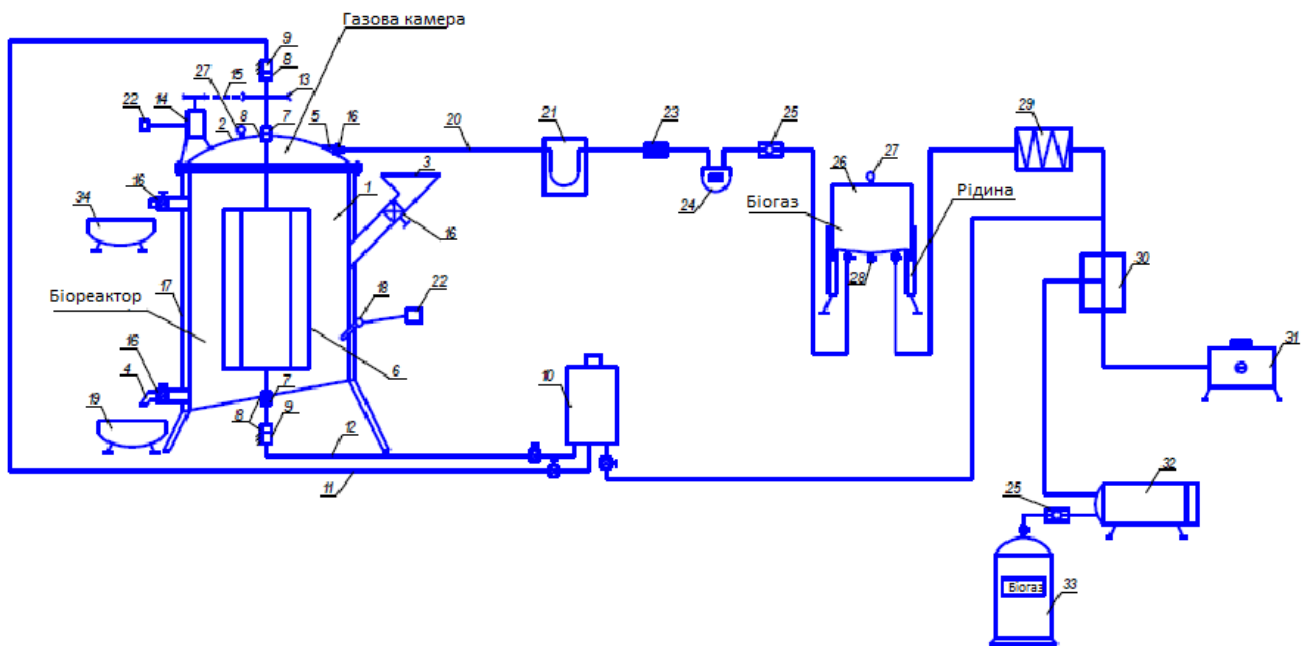


Рисунок 3.1 – Технологічна схема БГУ з теплообмінником-змішувачем (мішалка)

1 - корпус біореактора; 2 - кришка; 3 і 4 - завантажувальна і вивантажувальна горловини; 5 - вихід біогазу; 6 - теплообмінник-змішувач; 7 - підшипник; 8 - сальниковий ущільнювач; 9 - нерухомий циліндр; 10 - газовий котел; 11, 12 - подавальний та зворотний трубопровід; 13 - шків; 14 - електродвигун; 15 - приводний ремінь; 16 - вентиль; 17 - теплоізоляція; 18 - термодатчик; 19 і 34 - резервуар для відпрацьованої маси; 20 - газопровід; 21 - гідрозатвор; 22 - регулятор мікропроцесорний; 23 - фільтр; 24 - лічильник газовий; 25 - зворотний клапан; 26 - газгольдер; 27 - манометр; 28 - зливний штуцер; 29 - іскрогасник; 30 - автоматичний перемикач; 31 - споживач газу; 32 - компресорна установка; 33 - газовий балон

Згідно з технологічною схемою БГУ працює таким чином. Із резервуару органічних відходів подаються в верхню частину біореактора. В реакторі суміш

перемішується і зволожується до відповідної концентрації сухої речовини. В процесі транспортування відпрацьований субстрат і свіжа органічна маса обмінюються теплом в теплообміннику-змішувачі, при цьому відбувається інтенсивніше передача теплоти, тобто відпрацьований шлам втрачає своє тепло, а свіжа маса нагрівається. Отже, дана біомаса (пташиний послід) подається в бродильну камеру з вологістю 80-90%, де відбувається по термофільному режимі (при температурі 50-55⁰С) бродіння без доступу повітря. Стабільний режим утворення біогазу відбувається через 10-11 діб. Біомаса в біореактор завантажуються цілодобово. При цьому, завантаження складає 20 % від вихідної біомаси (6-7 літрів). Переброджена маса самовільно потрапляє через завантажувальний пристрій у накопичувач. Корпус біореактора виконано теплоізолюваним поліуретановим пінопластом. Підігрів біомаси виконується за допомогою газового котла, а температура контролюється за допомогою термодатчика та регулюється мікропроцесорним регулятором. Фільтр призначений для очищення газу від домішок, зворотний клапан, виконує захист системи від оборотного потоку газу.

Поступово накопичений біогаз випускають у пристрої видалення сірки, вуглекислого газу та збирають у газгольдері. З газгольдера газ направляють трубопроводом на потреби самої установки та на потреби до споживача. Конструктивно газгольдер складається з трьох циліндрів різного діаметру. Зазор між двома з них наповнюється рідиною, а третя виконує функцію поплавка, призначеного для вимірювання корисного об'єму газової камери та створення надлишкового тиску.

3.2 Обґрунтування результатів досліджень БГУ

На базі результатів проведених лабораторних досліджень виконана дослідна БГУ, стенд якої наведено на рисунку 3.2.

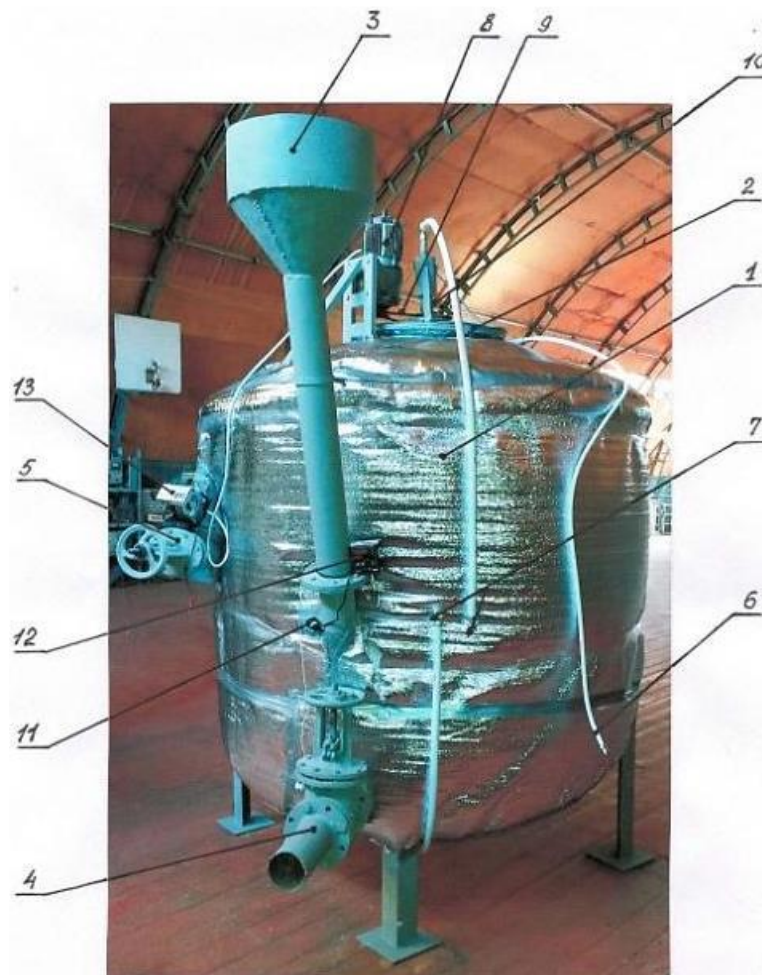


Рисунок 3.2 – Лабораторний стенд БГУ

1 – корпус біореактора з теплоізоляцією, 2 - знімна кришка корпусу; 3 - завантажувальна горловина; 4 - вивантажувальна горловина; 5 - зливна горловина; 6 - вихід біогазу; 7 - трубопровід подачі і зворотний трубопровід теплоносія; 8 - електродвигун із редуктором; 9 - клиноремінна передача; 10 - вал теплообмінника-мішалки; 11 - термодатчик; 12 - вимірювач регулятор мікропроцесорний; 13 - програмне реле часу.

3.2.1 Визначення режимів роботи БГУ з максимальним виходом біогазу

Першочергове завантаження складає 2160 кг, добова 430 кг субстрату: 86 кг – курячий послід (вологість 90%), 344 кг – води. Таким чином, БГУ забезпечує переробку посліду 350 курей за умови підлогового утримання. Розрахунок проводиться з урахуванням того, що вологість використовуваного посліду становить 75 %, тому $1 \text{ кг } C+V=100/(100-75)=4\text{кг}$ посліду.

Таким чином, доза щодобового завантаження біомаси в біореактор складає 430 кг. При виході БГУ в робочий експлуатаційний режим обсяг виробленого біогазу, досягав максимальних значень і становив 15,5 м³/добу (рисунок 3.3).

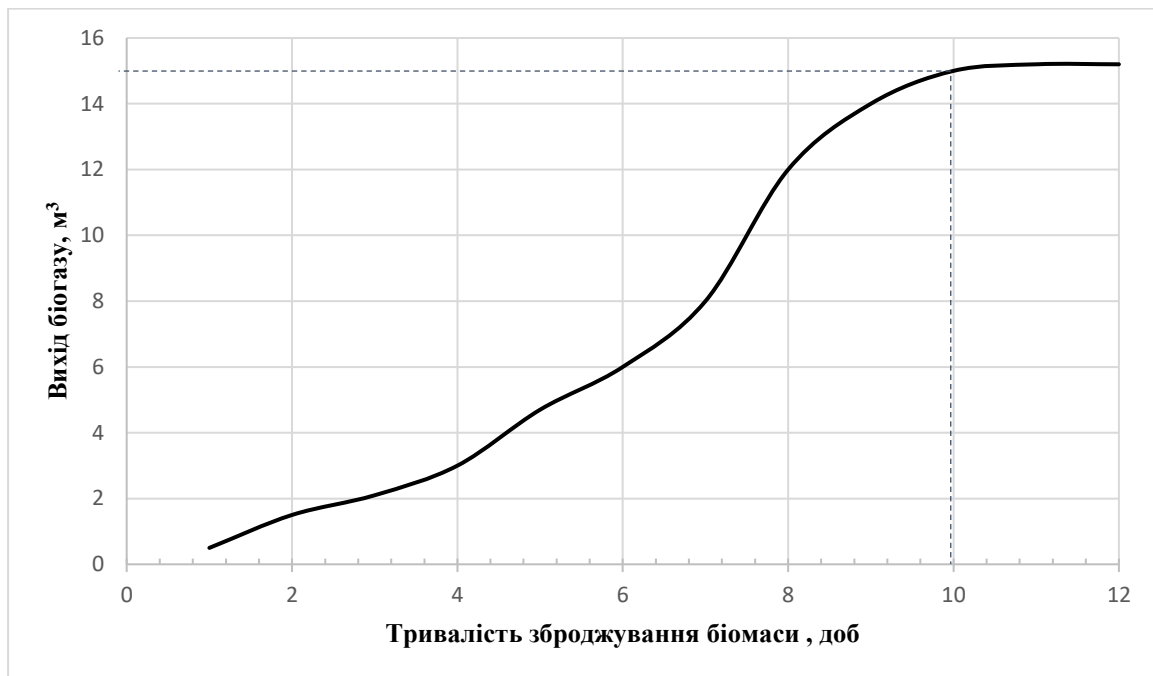


Рисунок 3.3 – Вихід біогазу з неперервною роботою БГУ

Вихід біогазу при роботі в обсязі 15,5 м³/добу відповідає продуктивності птахів по біогазу:

$$W = \frac{14,2}{300 \cdot 24} = 0,002 \text{ м}^3$$

Загальний об'єм біогазу, отриманого на одиницю маси посліду визначається як відношення загального вироблення біогазу на одиницю маси ходового посліду:

$$W = \frac{14,2}{86} = 0,17 \text{ м}^3/\text{кг посліду за добу}$$

$$W = \frac{14,2}{21,5} = 0,66 \text{ м}^3/\text{кг СВ за добу}$$

Розбіжність результатів експериментальних і лабораторних досліджень становить не більше 1,5 %.

Один і той самий експеримент слід проводити кілька разів у кожному режимі, оскільки під час експерименту можуть виникнути помилки. Одним з методів експериментального дослідження динамічних властивостей об'єкта є запис його характеристик. Цей метод широко використовується при плануванні експериментів. Для визначення оптимальних конструктивних параметрів та режиму роботи БГУ, які б забезпечили максимальний вихід біогазу, було проведено багатofакторний експеримент.

На основі отриманих даних були розроблені рівняння регресії для оцінки впливу змінних на максимальний вихід біогазу (критерії оптимізації):

$$Y(Q_{\text{бг}}) = 15,3 - 0,68X_1 + 0,092X_2 - 0,29X_3 - 0,27X_1X_2 - 0,78X_1X_3 + 0,77X_2X_3 - 1,3X_1^2 - 1,05X_2^2 - 1,12X_3^2$$

В результаті перевірки адекватності рівняння по критерію Фішера є адекватним. ($F_{\text{розрах}} = 0,765 < F_{\text{табл}} = 2,359$).

Рівняння регресії в розкодованому вигляді:

$$Y(Q_{\text{бг}}) = 15,3 - 0,68 \frac{T_{\text{II}} - 57}{3} + 0,092 \frac{t_{\text{II}} - 17}{3} - 0,29 \frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} - 0,27 \left(\frac{T_{\text{II}} - 57}{3} \right) \left(\frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right) - 0,78 \left(\frac{T_{\text{II}} - 57}{3} \right) \left(\frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} \right) + 0,77 \left(\frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right) \left(\frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} \right) - 1,3 \left(\frac{T_{\text{II}} - 57}{3} \right)^2 - 1,05 \left(\frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right)^2 - 1,12 \left(\frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} \right)^2$$

Після перетворень рівняння має наступний вигляд:

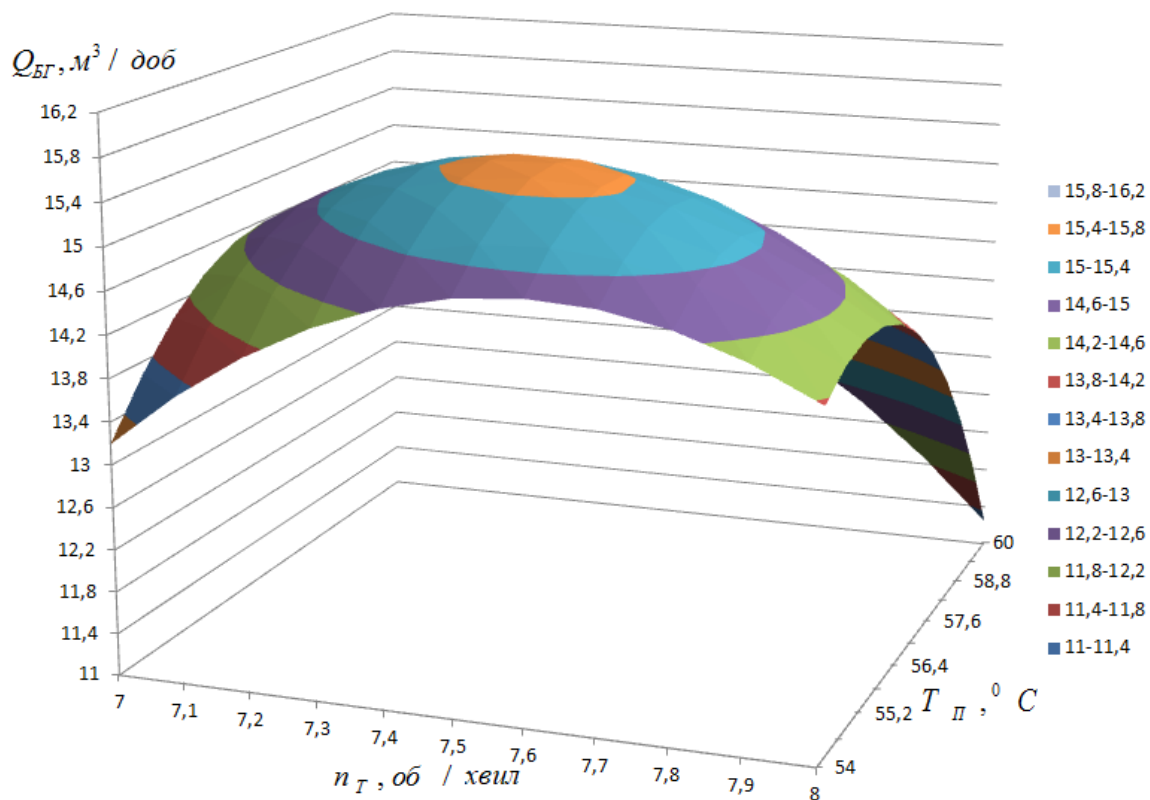
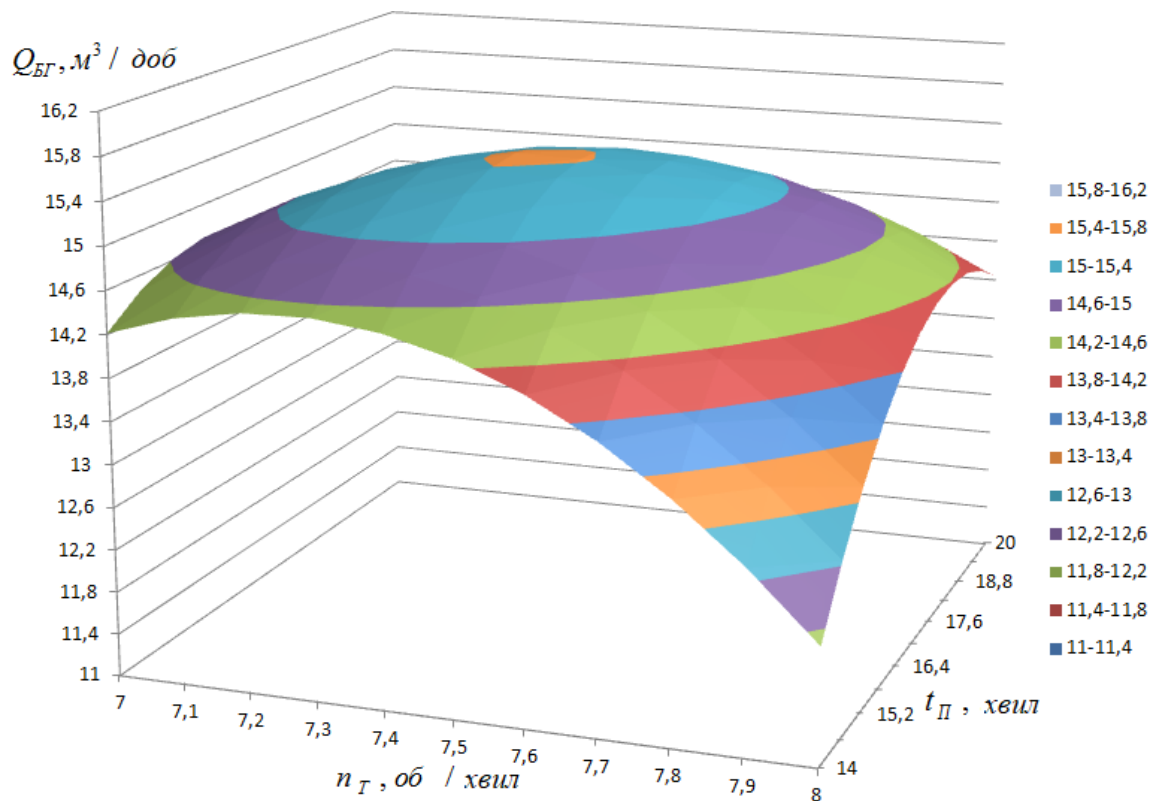
$$Q_{\text{бг}} = -906 + 21T_{\text{II}} + 1,82t_{\text{II}} + 87n_{\text{T}} - 0,03T_{\text{II}}t_{\text{II}} - 0,52T_{\text{II}}n_{\text{T}} + 0,52t_{\text{II}}n_{\text{T}} - 0,15T_{\text{II}}^2 - 0,12t_{\text{II}}^2 - 4,48n_{\text{T}}^2$$

Таким чином, оптимальні значення параметрів для максимального виходу біогазу наступні (табл 3.1):

Таблиця 3.1 – Результати багатофакторного експерименту

Температура зброджування	$X_1 = -0,2519$	$T_{\text{II}} = 56,2^{\circ}\text{C}$
Тривалість перемішування зброджуваної маси	$X_2 = 0,0014$	$t_{\text{II}} = 17 \text{ хвил}$
Число обертів теплообмінника-змішувача	$X_3 = -0,0381$	$n_{\text{T}} = 7,5 \text{ об/хв}$
Вихід біогазу	$Y(Q_{\text{БГ}}) = 15,5 \text{ м}^3/\text{доб}$	

Отже поверхні відгуку при зміні тривалості перемішування та числа оборотів теплообмінника-змішувача наведено на графіках (рис.3.4).



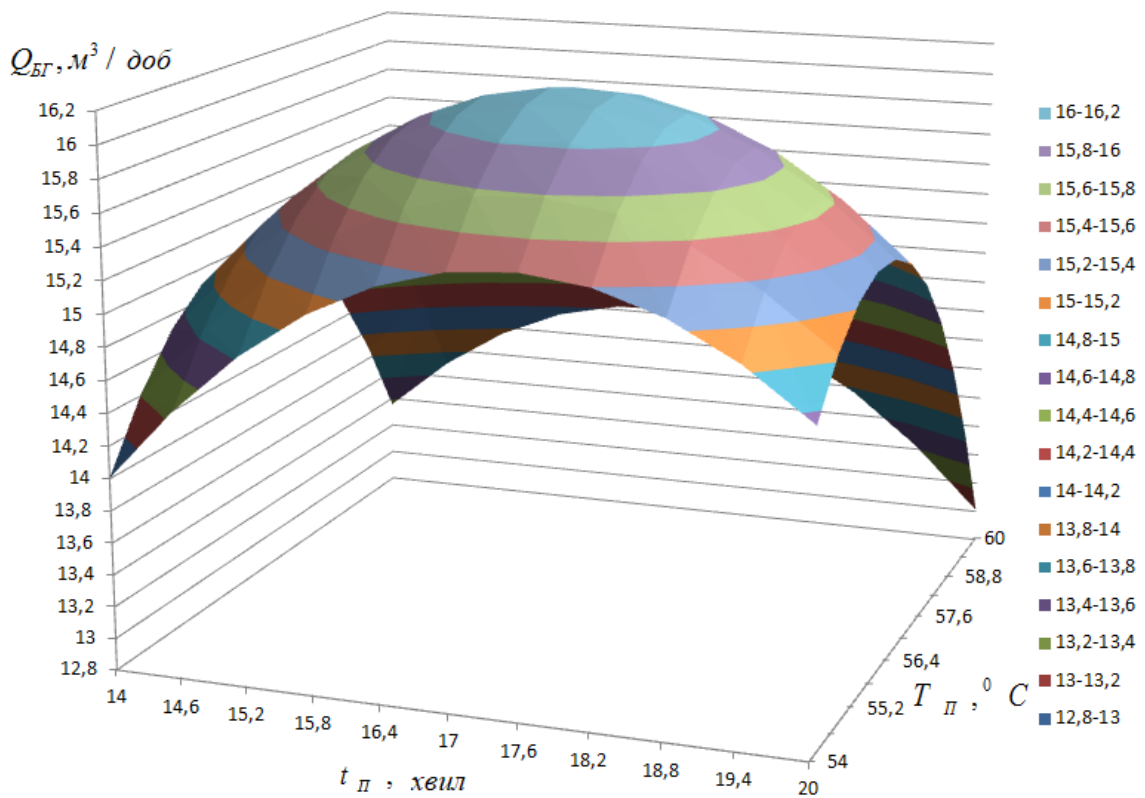


Рисунок 3.4 – Поверхня відгуку виходу біогазу

3.2.2 Визначення термічного опору та тепловтрат в біореакторі

Термічний опір усіх зон огороження біореактора визначимо для площі поверхні $F = 9,75 \text{ м}^2$. Стінка біореактора товщиною 10 мм.

Для розрахунку конструкції БГУ отримаємо:

для сталеві циліндричної оболонки теплопровідність $\lambda=74 \text{ Вт}/(\text{мК})$, величина термічного опору:

$$R = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \text{ м}^2 \text{ К} / \text{Вт}$$

де $\sum_{i=1}^{i=m} \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ - сума термічного опору теплопровідності окремих шарів огороження товщиною $\delta_{i,m}$, виконаних з матеріалів теплопровідністю λ_i .

$$R_{cm} = \frac{0,005}{74} = 0,000067, m^2 K / Bm$$

$$R_{iz} = \frac{0,05}{0,048} = 1,04, m^2 K / Bm$$

$$R = R_{cm} + R_{iz} = 1,042 m^2 K / Bm$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні показники дослідної установки

Параметр	Значення
Поголів`я	350
Загальний об`єм вихода посліду, кг/доб	86
Об`єм біореактора, м ³	3,5
Температура бродіння, °С	54-55
Вологість зброджуваної біомаси, %	90
Добове завантаження, м ³ /доб	0,43
Тривалість зброджування, доб	11
Період виходу в експлуатаційний режим, доб	4-5
Добовий вихід біогазу, м ³ /доб	15,5
Кількість тепла, необхідного для нагріву вихідної біомаси, МДж	54,45
Кількість теплоти, що йде з виробленим газом, МДж/доб	0,02
Кількість теплоти, що втрачається в навколишнє середовище, МДж/доб	0,41
Кількість теплоти, що втрачається з переробленою біомасою, МДж/доб	0,05
Кількість теплоти, що витрачається на перемішування біомаси, МДж/доб	2,1
Кількість теплоти, що витрачається на власні потреби, МДж/доб	30,75
Кількість енергії, що міститься у виробленому газі, МДж/доб	85,2
Частина біогазу, необхідного для нагріву та підтримки температурного режиму, %	20
Вихід біодобрив, %	13

Величина теплового потоку між внутрішньою та зовнішньою температурою за опалювальний період:

$$Q_{opr} = \frac{F}{R} (t_1 - t_2), \text{кДж/доб}$$

де $t_1=54$ °С – оптимальна температура зброджування;

$t_2=9,1$ °C – середньорічна температура.

Тоді

$$Q_{огр} = \frac{7,9}{1,04} 44,9 = 341,1 \text{ кДж/доб}$$

Для підтримки температури в БГУ необхідна тепла установка потужність 341,1 кДж/доб. Для цього можна використовувати біогаз, який виробляється БГУ з теплотворною здатністю 33,3 МДж/м³.

Витрати біогазу з рахунком ККД=0,8 теплової установки визнається з виразу:

$$B = \frac{Q_{огр}}{Q_{біог} \cdot \eta} = \frac{341,1}{33300 \cdot 0,8} = 0,0128 \text{ м}^3 / \text{доб} = 12,8 \text{ л} / \text{доб}$$

Тепловтрати визначаємо наступним чином.

Добове завантаження біомаси визначається з урахуванням характеристик біореактора об'ємом 3,5 м³: $G_M=0,43$ м³/доб=430 кг/доб

Витрати теплоти на нагрівання збродженої біомаси та конструкційних елементів БГУ визначається з формули:

$$Q_{носл} = \frac{G_M(t_1 - t_2)C_n}{\eta} = \frac{420 \cdot (54 - 20) \cdot 4,06}{0,8} = 74196,5 \text{ кДж} / \text{доб}$$

$\eta=0,8$ – ККД нагрівального приладу;

C_n – питома теплоємність посліду.

Таким чином, витрати тепла для виходу БГУ в робочий термофільний режим та необхідний об'єм біогазу для виробництва теплової потужності:

$$Q = Q_{огр} + Q_{носл} = 74196,5 + 341,1 = 74537,6 \text{ кДж} / \text{доб}$$

$$B = \frac{74537,6}{33300 \cdot 0,8} = 2,8 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

Що відповідає характеристикам використаних джерел теплової енергії.

3.2.3 Методика розрахунку конструктивних параметрів БГУ

При умові неперервної роботи газового котла для підігріву біореактора, з споживанням газу $0,023 \text{ м}^3/\text{год}$, також враховується витрата газу на технологічні потреби – $0,3 \text{ м}^3/\text{год}$ за час його роботи 10 годин, тоді добова витрата газу:

$$G = 24 \cdot 0,023 + 0,3 \cdot 10 = 3,55 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

Для отримання такої кількості газу визначимо об'єм біореактора з урахуванням середньостатистичних даних щодо виходу біогазу на одну тунну перероблюваного посліду:

$$V = K_3 \frac{G}{q} = 1,3 \frac{3,55}{1,32} = 3,5 \text{ м}^3$$

K_3 – коефіцієнт запасу.

Щоденне добове завантаження біореактора:

$$M_{\text{зав}} = \frac{V}{t} = 0,29 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

t – 12 днів – тривалість зброджування.

Об'єм газгольдера визначається виходячи з необхідного годинного запасу біомаси:

$$V_{\text{год}} = G \frac{t}{24} = 0,177 \text{ м}^3$$

Тоді загальна теплова енергія від одержуваного газу:

$$Q_{\text{газ}} = G \cdot Q_{\text{біог}} = 3,55 \cdot 24 = 85,2 \text{ МДж} = 23,7 \text{ кВт}$$

$Q_{\text{біог}}$ - теплотворна здатність біогазу.

Витрата теплоти на нагрівання посліду з температури $15 \text{ }^\circ\text{C}$ до температури термофільного режиму $54 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$Q_{\text{нагр}} = \frac{M_{\text{зав}}(t_1 - t_2)c}{\eta} = 54,45 \text{ МДж} = 15,1 \text{ кВт}$$

Витрата теплової енергії на власні потреби визначається з формули:

$$Q = Q_{\text{зав}} - Q_{\text{нагр}} = 30,75 \text{ МДж} = 8,5 \text{ кВт}$$

Об'єм контейнеру для зберігання запасу посліду:

$$V_{\text{к.запас}} = V_{\text{біореак}} \cdot t \cdot \kappa = 5,25 \text{ м}^3$$

t – час накопичення посліду за добу;

$\kappa=1.5$ – коефіцієнт, який враховує зміни густини посліду в залежності від вихідної вологості.

Для визначення раціональної конструкції біореактора необхідно розглянути процеси теплообміну і теплопередачі. Розрахунки з визначення основних енергетичних параметрів біореактора доцільно провести для літнього та зимового періодів роботи БГУ.

Споживання теплоти БГУ в літній період:

$$Q_{\text{л}} = \frac{(t_1 - t_{\text{л}})F}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}} = 170,2 \text{ Вт} = 0,6 \text{ МДж}$$

$t_{\text{л}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – середня температура влітку;

$F=9,75 \text{ м}^2$ – загальна площа поверхні біореактора;

$\delta=0,1 \text{ м}$ – товщина стінки біореактора;

$\lambda=0,048 \text{ Вт/(мК)}$ – теплопровідність стінки біореактора з урахуванням теплоізоляційного матеріалу (еластичний пінопласт);

$\alpha=23 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ – коефіцієнт теплопередачі.

ККД установки влітку:

$$\eta_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{зав}} - Q_{\text{л}}}{Q_{\text{зав}}} = \frac{85,2 - 0,6}{85,2} = 0,99$$

Споживання теплоти установкою взимку:

$$Q_{зим} = \frac{(t_1 - t_{зим})F}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}} = 250,2Вт = 0,9Мдж$$

$t_{зим} = 0^{\circ}C$ – середня температура взимку.

ККД установки взимку:

$$\eta_l = \frac{Q_{заг} - Q_{зим}}{Q_{заг}} = \frac{85,2 - 0,9}{85,2} = 0,98$$

Кількість теплоти, що витрачається БГУ під час роботи з біомасою, що перебродила при її видаленні:

$$Q_{нб} = c_{нб} M_{зав} t_2 = 4,06 \cdot 290 \cdot 55 = 64,76 \cdot 10^3 \text{ кДж}$$

Із завантажувальною масою:

$$Q_{зб} = c_{нб} M_{зав} (t_1 - t_{л}) = 4,06 \cdot 290 \cdot (55 - 18) = 43,56 \cdot 10^3 \text{ кДж}$$

Сумарна витрати теплоти при щодобовому завантаженні біореактора:

$$Q_{дзав} = Q_{нб} + Q_{зб} = 10,83 \cdot 10^3 \text{ кДж}$$

Сумарні добові тепловтрати з поверхні біореактора:

$$Q_{\Sigma доб} = Q_{зим} t = 0,9 \cdot 24 = 21,6 \cdot 10^3 \text{ кДж}$$

Загальні добові тепловтрати при роботі БГУ:

$$Q_{заг.доб} = Q_{дзав} + Q_{\Sigma доб} = 12,99 \cdot 10^3 \text{ кДж}$$

Середньодобова потреба експлуатаційної теплової потужності за зимовий період:

$$Q_{ср.доб} = \frac{Q_{заг.доб}}{t} = \frac{12,99 \cdot 10^3 \cdot 1000}{24 \cdot 3600} = 1504 \text{ кДж}$$

Біореактор дає змогу забезпечити переробку відходів пташника з поголів'ям до 350 голів. Таким чином, розроблена БГУ відповідає основним новим вимогам, що пред'являються як за експлуатаційними витратами, так і за утилізацією

всього обсягу відходів птахівництва, так і щодо утилізації всього обсягу відходів птахівництва.

Для конструктивної схеми біореактора об'ємом 3,5 м³ з теплообмінником-змішувачем (рис.3.4) проводяться розрахунки енергетичних параметрів у відповідності зі схемою наведеною на рисунку 2.1 (розділ 2 пояснювальної записки).



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд теплообмінника-змішувача

Теплове навантаження БГУ визначається втратами з поверхні біореактора:

$$Q = \frac{(t_1 - t_{зим}) S_{заг}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт}$$

t_1, t_2 – температура біомаси при термофільному режимі (55 °С) та навколишнього повітря взимку (-10 °С);

$S_{заг}$ - загальна площа поверхні біореактора БГУ з врахуванням товщини теплової ізоляції;

$\alpha_1 = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ – коефіцієнт тепловіддачі від біомаси до внутрішньої поверхні біореактора; α_2 - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні БР до повітря;

$\lambda_1 = 37,7 \text{ Вт}/(\text{мК})$ – коефіцієнт теплопровідності сталі стінки біореактора при температурі до 100 °С;

$\delta_1 = 0,003 \text{ м}$ – товщина стінки біореактора; $\delta_2 = 0,1 \text{ м}$ – товщина ізоляції

$\lambda_2 = 0,05 \text{ Вт}/(\text{мК})$ - коефіцієнт теплопровідності ізоляції.

Теплові втрати з поверхні біореактора БГУ визначаються для двох значень розрахункової температури :

- при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$: $Q_{\max}=410,5\text{ Вт}$
- при середній температурі $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$: $Q_{\text{cp}}=312,6\text{ Вт}$

Рівняння теплового балансу теплообмінника-змішувача:

$$Q = cG(t'_1 - t''_2)$$

c - теплоємність біомаси, Дж/(кгК)

G - витрата теплоносія в теплообміннику, кг/с.

t'_1, t''_2 - температури теплоносія на вході та виході з теплообмінника, $^{\circ}\text{C}$.

Максимальна витрата теплоносія при температурі $25\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$G_{\max} = \frac{Q_{\max}}{c(t'_1 - t''_2)} = \frac{410,5}{4060 \cdot 25} = 0,004\text{ кг / с.}$$

Кількість теплоти, необхідне на підігрів M_3 кг біомаси, яка завантажується один раз на добу:

$$Q = Mc(t_p - t_{\text{зовн}})$$

t_p – робоча температура біомаси в біореакторі;

$t_{\text{зовн}}$ – температура зовнішнього повітря.

Кількість теплоти, що витрачається за одну добу для підтримки робочої температури біомаси в реакторі:

$$Q_2 = Q\tau \cdot 24 \cdot 3600 = 0,4105 \cdot 1 \cdot 24 \cdot 3,6 = 35,47\text{ МДж / доб}$$

τ -кількість діб, 24 – число годин в добі.

Сумарні добові витрати тепла для підтримки робочої температури біомаси:

$$Q_3 = Q_2 + Q_1 = 56,5 + 35,47 = 92\text{ МДж}$$

Сумарні добові витрати тепла для підтримки робочої температури з підгівом за допомогою водяної сорочки: $Q_{з.в.} = 129,9 \text{ МДж}$.

Відповідно економія витрат тепла складає:

$$E = 100 - \frac{Q}{Q_{зв}} 100 = 29,2\%$$

Середня розрахункова потужність теплообмінника-змішувача:

$$Q_{роб} = \frac{Q_3}{\tau} = \frac{137,035}{24 \cdot 3,6} = 1,58 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника-змішувача:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{84} + \frac{0,003}{40} + \frac{1}{87}} = 41,7 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

α_1, α_2 - коефіцієнти тепловіддачі від внутрішньої та зовнішньої поверхні теплообмінника, $\text{Вт/м}^2\text{К}$;

λ – коефіцієнт теплопровідності теплообмінника, Вт/мК ;

δ – товщина стінки теплообмінника, м.

Площа поверхні теплообмінника-змішувача:

$$F = \frac{Q}{k(t_{cp} - t_p)} = \frac{410,5}{41,7(72,5 - 53)} = 0,505 \text{ м}^2$$

де $t_{cp} = \frac{t_1' + t_2''}{2} = \frac{85 + 60}{2} = 72,5^\circ \text{C}$ середня температура теплоносія.

З діаметром труби $d_{тр} = 0,032 \text{ м}$ знайдемо її довжину:

$$l = \frac{F}{\pi d} = \frac{0,505}{3,14 \cdot 0,032} = 5,2 \text{ м}$$

З діаметром труби $d_{\text{тр}}=0,025\text{м}$ її довжина складає:

$$l = \frac{F}{\pi d} = \frac{0,505}{3,14 \cdot 0,025} = 6,4\text{м}$$

Проведені обчислення енергетичних параметрів дозволяють засвідчити, що сумарні витрати тепла на підігрів та підтримку заданої температури при використанні сумісного теплообмінника та змішувача знижуються у порівнянні з існуючими способами на 25-30%.

3.2.4 Визначення режимів роботи БГУ для максимального виходу біодобрива

Було проведено багатофакторний експеримент для встановлення оптимальних параметрів та режиму роботи БГУ, які б забезпечили максимальний вихід біодобрива. На основі отриманих даних були розроблені рівняння регресії для оцінки впливу змінних на вихід біогазу (критерій оптимізації) мають вигляд:

$$Y(Q_{\text{БД}}) = 0,26 - 0,0061X_1 - 0,002X_2 - 0,0124X_3 - 0,0015X_1X_2 - 0,001X_2X_3 - \\ - 0,024X_1^2 - 0,0152X_2^2 - 0,025X_3^2$$

В результаті перевірки адекватності рівняння по критерію Фішера є адекватним. ($F_{\text{розр}}=0,765 < F_{\text{табл}}=2,359$).

Рівняння регресії в розкодованому вигляді:

$$Y(Q_{\text{БД}}) = 0,26 - 0,0061 \frac{T_{\text{II}} - 57}{3} + 0,002 \frac{t_{\text{II}} - 17}{3} - 0,012 \frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} - \\ - 0,0015 \left(\frac{T_{\text{II}} - 57}{3} \right) \left(\frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right) + 0,001 \left(\frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right) \left(\frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} \right) - \\ - 0,024 \left(\frac{T_{\text{II}} - 57}{3} \right)^2 - 0,0152 \left(\frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right)^2 - 0,0254 \left(\frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} \right)^2$$

Після перетворень рівняння регресії має вигляд:

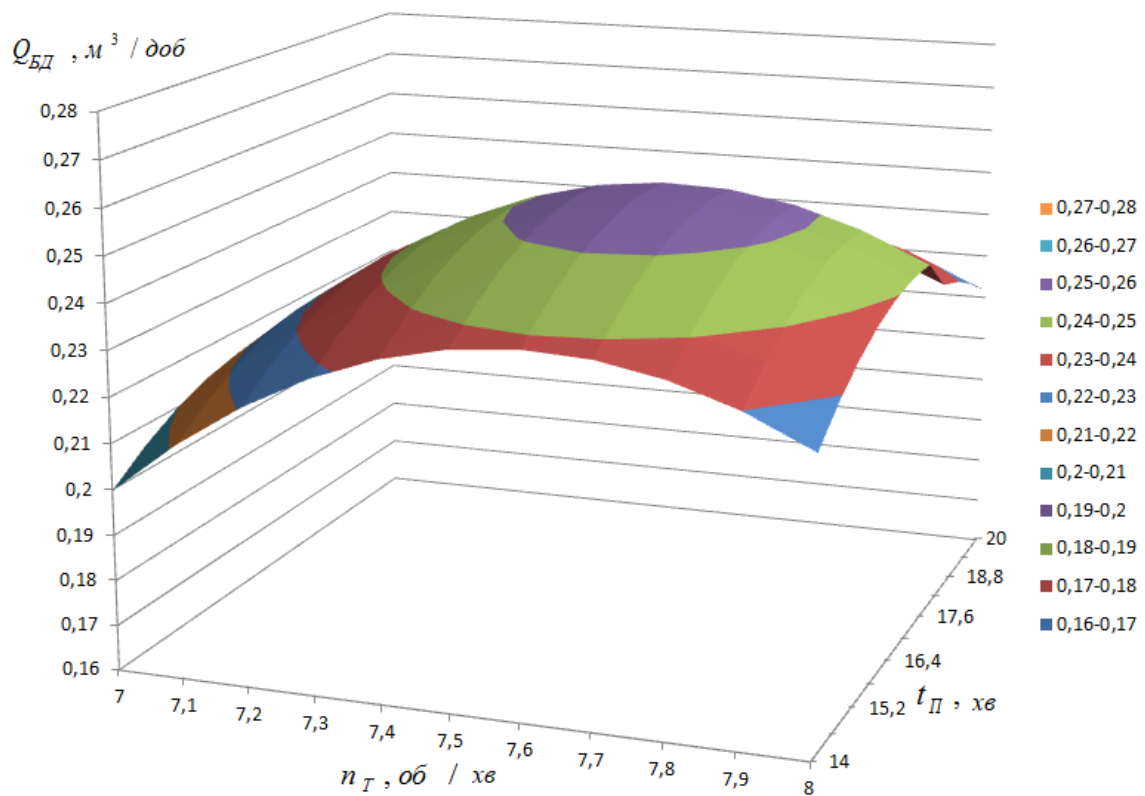
$$Q_{БД} = -8,79 + 0,1022T_{П} + 0,0474t_{П} + 1,5375n_{T} - 0,0001T_{П}t_{П} - 0,0007t_{П}n_{T} - 0,001T_{П}^2 - 0,0017t_{П}^2 - 0,101n_{T}^2$$

Таким чином, оптимальні значення параметрів для максимального виходу біодобрива наступні (табл.3.3):

Таблиця 3.3 – Результати багатофакторного експерименту

Температура зброджування	$X_1 = -0,1217$	$T_{П} = 54,4^{\circ}\text{C}$
Тривалість перемішування зброджуваної маси	$X_2 = 0,06$	$t_{П} = 17,2 \text{ хвил}$
Число обертів теплообмінника-змішувача	$X_3 = 0,2422$	$n_{T} = 7,6 \text{ об/хв}$
Вихід біогазу	$Y(Q_{БД}) = 0,26 \text{ м}^3/\text{доб}$	

Графіки поверхні відгуку при перемішуванні зброженої маси тривалістю 17 хвилин, при зміні температурі зброження та числом обертів теплообмінника-змішувача 7,6 об/хв зображено на рисунку 3.6.



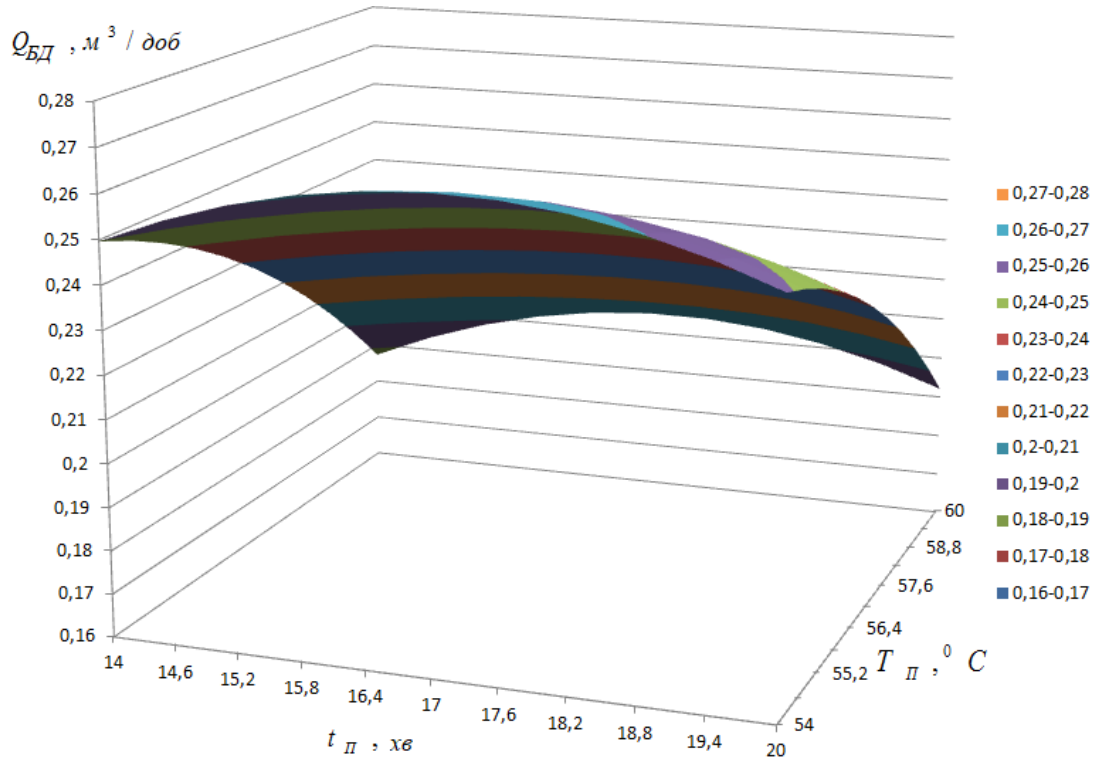
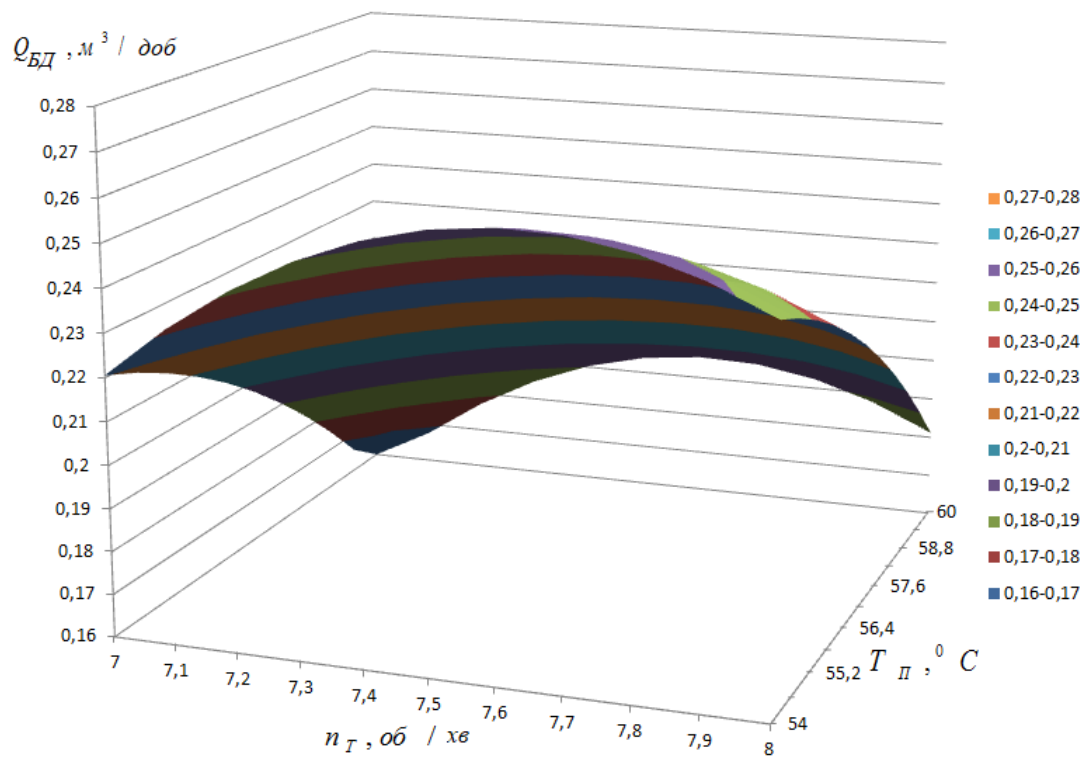


Рисунок 3.6 – Поверхня відгуку виходу біодобрива при оптимальних режимах роботи біореактора

Аналіз багатофакторно експерименту доводить, що максимальне значення виходу біодобрива 0,26 м³/доб досягається з оптимальними значеннями $T_{II}=54,4^{\circ}\text{C}$, $t_{II}=17,2$ хвилини , $n_T=7,6$ об/хв.

За даними проведених вище досліджень, обсяг одержуваного за весь період обробки становить 80 м^3 біогазу з 1 тони пташиного посліду та час початку виходу товарного біогазу становить 11-12 днів. Використовуючи ці дані для розрахунку БГУ, з об'ємом $3,5 \text{ м}^3$ можна отримати $15,5 \text{ м}^3$ біогазу, проте частина цього біогазу витрачається на нагрівання та підтримання термофільного режиму біомаси і становить до 20 % ($3,1 \text{ м}^3$ біогазу). А іншу частину можна використовувати для вироблення електроенергії, що становить $12,4 \text{ м}^3$ біогазу. Газогенератор здатен виробляти до 3 кВт з 1 м^3 біогазу, тож з повного об'єму БГУ вихід електроенергії становитиме до 37,2 кВт/добу. Відповідно на рік вихід енергії становитиме 13,4 МВт. Оскільки енергетичні витрати модернізованої БГУ на 25-30% менші за базовий варіант і виражаються в меншій витраті біогазу на власний нагрів і підтримання термофільного режиму, що становить 14,03 % або $2,33 \text{ м}^3$ біогазу.

Висновки

1. Розроблено методику інженерного розрахунку біогазової установки, що включає розрахунок основних параметрів модернізованої біогазової установки та теплообмінного пристрою, включаючи теплові втрати, максимальну витрату теплоносія, кількість тепла, що витрачається на підтримання температури біомаси, потужність теплообмінника, а також коефіцієнт теплопередачі та площу поверхні.
2. Проведені обчислення енергетичних параметрів дозволяють засвідчити, що сумарні витрати тепла на підігрів та підтримку заданої температури при використанні сумісного теплообмінника та змішувача знижуються у порівнянні з існуючими способами на 25-30%.
3. При обґрунтуванні багатofакторного експерименту встановлено що максимальний вихід біогазу складає $15,5 \text{ м}^3$, проте частина цього біогазу витрачається на нагрівання та підтримання термофільного режиму біомаси і становить до 20 % ($3,1 \text{ м}^3$ біогазу).
4. Максимальне значення виходу біодобрива становить $0,26 \text{ м}^3/\text{доб}$, яке досягається з оптимальними значеннями $T_{\text{П}}=54,4^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{П}}=17,2$ хвилин , $n_{\text{Т}}=7,6$ об/хв.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Для виробничих підприємств охорона праці має важливе значення і полягає у зростанні продуктивності суспільного виробництва за допомогою безперервного покращення високопродуктивних умов праці, підвищення безпеки персоналу, зменшення кількості нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань. Це спостерігається у збільшенні ефективності роботи, збереженні трудових ресурсів. В умовах ринкових відносин все більше підприємств активно розвивають виробництво біогазових установок (БГУ) різної ефективності та призначення. У більшості країн використання технології біогазу стало стандартом для поводження та утилізації промислових та комунальних відходів, очищення стічних вод, твердих побутових та сільськогосподарських відходів для отримання біогазу, тепла та електроенергії, а також дуже ефективного органічного добрива. Безпечна експлуатація, пожежо- та вибухозахист біогазової установки є одним із найважливіших способів захисту людей та навколишнього середовища від серйозного впливу цих факторів.

4.1 Вимоги для надійної та безпечної експлуатації установки

За останні десятиліття активного використання БГУ було накопичено значний досвід у забезпеченні надійності та безпечної експлуатації, а також виявлено фактори, що становлять аварійний стан та негативний вплив на природне середовище. Виробництво біогазової продукції можна здійснювати чітко, яка пройшла медичний огляд, спеціальну підготовку, навчання техніці безпеки та дотримується їх. Вагітні жінки та матері-годувальниці також не допускаються [65]. На виробництві обов'язковим є регулярне навчання техніці безпеки, надання першої допомоги при травмах і пошкодженнях.

Кількість вогнегасників має виходити з норм безпеки. Робочі місця повинні бути в належному стані. Усі прилади та інструменти необхідно регулярно перевіряти на справність. Вразі при появі будь-яких проблем,

несправностей або пошкоджень їх необхідно терміново усунути, деталі замінити. У разі виникнення відкритого полум'я для гасіння вогню використовують сухий пісок та вуглекислотні вогнегасники [66]. Під час роботи на гнойовище необхідно використовувати респіратори. Робота насосів, напірних пристроїв і заслінок повинна виконуватися належним чином, відповідно до інструкцій та правил внутрішнього виробництва. Неочищений біогаз є дуже отруйною речовиною для людини через наявність у ньому сірководню, який має сильну токсичну дію і викликає задишку. Біогаз навіть після обробки без сірки може призвести до смерті через нестачу кисню [67]. Категорично забороняється палити і розводити вогонь поблизу місця установки, зварювальні роботи повинні проводитись на відстані 10 м від газового обладнання. Існує також ризик виникнення небезпечної або аварійної ситуації через електронні пристрої, обертові частини, труби та пристрої, які працюють під тиском. Газ метан, у свою чергу, негативно впливає на центральну нервову систему, пригнічує роботу і координацію рухів. Він небезпечний при концентрації більше 5%. При проектуванні, будівництві та роботі на виробництві з надходженням газу обов'язковими є наявність вогнегасників, пожежної сигналізації, а особливо заслінок надлишку газу від метантеру, у зв'язку з тим, що таким чином можна зменшити ступінь небезпеки, що виникає при роботі з пристроєм.

При проектуванні біогазових установок розробляються заходи безпеки виробничого персоналу при роботі з пристроями, автоматичними та спеціалізованими пристроями відповідно до державного законодавства, що забезпечується виконанням Закону України «Про охорону праці».

При експлуатації обладнання для отримання біогазу і його використання необхідно враховувати вибухонебезпечність метану. Небезпека вибуху виникає при змішуванні метану з повітрям у співвідношенні від 5 до 15% за об'ємом. У разі витоку, за наявності вентиляції, газ випаровується без яких або наслідків. У зв'язку з цим на установці для отримання метану і в оточуваній її зоні необхідно суворо дотримуватись заходів безпеки, необхідних для попередження пожежі і вибуху. До складу біогазу також входять сірководень

(H₂S), вуглекислий газ (CO₂). Сірководень, якщо і представляє небезпеку для здоров'я людей, то зустрічається в невеликих кількостях і легко виявляється по неприємному запаху. Оскільки сірководень важчий за повітря, необхідно звертати увагу на те, щоб при витоках цей газ не зміг нагромаджуватися в поглибленнях. При високих концентраціях він притупляє сприйняття запаху, що утрудняє його виявлення і може привести до смертельних отруєнь, але ще раз можна відзначити, що частка сірководню в біогазі дуже мала і складає не більше 1 %. Вуглекислий газ входить до складу біогазу, теж може накопичуватись в глибоких виїмках, оскільки він важчий за повітря, за наявності нещільності в установці викликає небезпеку задухи.

4.1.1 Перелік заходів безпеки включає

1. Ємності для газу необхідно розміщувати на достатній відстані від житлових будинків, складів і громадських доріг. Мінімально допустимі такі відстані: від будинків з м'якою покрівлею - 10 м; від будинків з твердою покрівлею - 5 м.

2. Забороняється паління і розпалювання вогню поблизу газових резервуарів (в радіусі 10 м). Встановлюються спеціальні таблички з відповідними надписами.

3. Регулярно перевіряють рівень води в резервуарі газгольдера циліндричного типу. Зимою необхідно попереджувати утворення крижаної кірки. Ремонт резервуарів і трубопроводів повинні проводити тільки спеціалісти (організація виготовлювач обладнання), що особливо важливо для усіх робіт, які виконуються з відкритим полум'ям і зварюванням на газгольдері і трубопроводах.

4. Попередження виходу метану і змішування його з повітрям в обмеженому просторі включає в себе забезпеченість герметичності газопровідних ліній і вентиляцію редукційних клапанів з відводом повітря назовні,

5. Видалення повітря із газопровідних ліній шляхом пропускання по них газу до його використання.
6. Установка вогнегасників на газопровідних лініях, які проходять поблизу газоспалювальних установок.
7. Забезпечення відповідних вентиляцій в зоні газопровідних ліній.
8. Обладнання вентиляційного отвору під стелею приміщення для виходу назовні газу, щільність якого менша щільності повітря.
9. Укладання газопровідних ліній з позитивним або зворотним нахилом, з обладнанням на нижньому кінці лінії водовідокремлювача (біогаз містить водяну пару).
10. Захист газопровідних ліній і особливо водовідокремлювачів і вогнегасників від замерзання, оскільки це може перервати подачу газу, пошкодити газопровідну лінію і привести до значного збільшення тиску в метантенку або газгольдері, розрахованому на низький тиск.
11. Видалення всіх потенційних джерел іскроутворення із зони біогазової установки і газопровідних ліній.
12. Установка вогнегасника у місці збереження газу.
13. Резервуари для зберігання газу, що призначаються для зарядки балонів, повинні бути розраховані натиск 170 кг/см^2 .

4.1.2 Правила та вимоги працівників

Оскільки люди працюють на біогазових установках, до них також існують певні правила та вимоги:

1. Робітник повинен працювати лише на своєму постійному місці.
2. На робочому місці не повинні бути інші речі та предмети.
3. Дотримання правил мікробіології техніки безпеки при роботі з мікроорганізмами.
4. Предмети, які контактували з мікроорганізмами, підлягають обов'язковому проходженню дезінфекції, палінню або дезінфекції.
5. На робочому місці заборонено палити, пити та їсти.

Перед початком роботи, установка біогазу повинна бути зроблена експертним висновком. Орган, який надає ліцензію на введення в експлуатацію БГУ, повинен отримати документ, що підтверджує довговічність використаного матеріалу, метану та герметичність газового бака. Важливою є наявність протоколу, який доводить, що газопроводи відповідають всім вимогам і правилам технічної безпеки, а електрообладнання також відповідає вимогам безпечної експлуатації. Дотримання всіх правил безпеки допоможе знизити ризик роботи з газовим приладом і можливість виробничого травматизму. Таким чином, налаштування біогазова повинні виконуватися та експлуатуватися відповідно до вимог стандартів і правил електронного обладнання, а також стандартів і технічних умов певного типу, які розробляються виробником. Працівники повинні дотримуватися всіх заходів безпеки. Щодо санітарної безпеки, то слід зауважити що на 1 дм³ рідкого гною завжди налічується до 100 яєць гельмінтів а також кишкова паличка *Escherichia coli*. Також, наявність збудників хвороб у вихідній сировині залежить від стану здоров'я тварин. Працівники виробництва повинні: 1. носити спеціальний захисний одяг та взуття; 2. не вживати їжу на території збору та підготовки субстрату та у зоні метанового зброджування; 3. носити рукавички із товстої та щільної гуми; 4. по завершенню роботи проводити дезінфекцію рук із милом та з теплою водою; 5. проводити щоденно вологе прибирання у всіх приміщеннях.

При дотриманні техніки безпеки знижується небезпека роботи з газовим приладом, що допомагає запобігти виробничому травматизму. Під охороною навколишнього природного середовища воно враховується з метою підтримки чистоти повітря, водних ресурсів та захисту від шуму. Чистота повітря – це передусім мінімізація запахів відходів, пилу та шкідливих речовин. Конструкція біогазової установки повинна виконуватися таким чином, щоб її експлуатація не забруднювала водосховище та підземні води. Сировина, яка використовується для анаеробних відходів (гній та інші), складається з речовин першого класу небезпеки. Цілі двори, резервуари, труби та насосні лінії повинні бути водонепроникними, щоб запобігти забрудненню. Усі вторинні гази, що

утворюються при виробництві та спалюванні біомаси, повинні бути очищені перед скиданням в атмосферу.

4.2 Організація і проведення евакуаційних заходів під час НС

Залежно від умов, що склалися евакуацію проводять у межах окремого регіону з території, яка може піддаватися впливу НС техногенного або природного характеру, або з міст і промислових районів - у разі загрози виникнення війни. Переміщення великої кількості людей за короткий термін у складних умовах і на значні відстані вимагає організованості і керованості процесом на всіх його етапах з метою своєчасного проведення та запобігання виникнення паніки та недопущення загибелі людей [45]. При плануванні евакуаційних заходів в особливий період прогнозують очікувану обстановку, визначають межу зони можливих сильних руйнувань (на кордоні цієї зони очікується $P_f = 30$ кПа) і межу зони можливих слабких руйнувань ($P_f = 10$ кПа). Разом ці зони утворюють зону можливих руйнувань. Населення міст евакуюють із зони можливих сильних руйнувань в заміську зону - місцевість поза зоною можливих руйнувань, поза зонами можливого небезпечного хімічного, радіоактивного зараження, катастрофічного затоплення. Населення із зони можливих слабких руйнувань не евакуюють, оскільки щільність населення невелика і є можливість захистити людей в місцях проживання [21]. Населення, що підлягає евакуації, поділяють на дві категорії. До першої належать працівники та службовці, які працюватимуть під час війни на підприємствах і в установах, продукція яких потрібна для оборони, а також працівники комунальних підприємств міста. Захист людей зі зміни, яка працює, забезпечують у сховищах на об'єктах. Захист членів сімей та людей з інших змін забезпечують в заміській зоні. Для цієї категорії населення евакуаційні заходи називають рассредоточением працівників і службовців, що діють за принципом: жити за межами міста, працювати в місті. Тому для них райони розміщення призначають ближче до міста, поруч з транспортними магістралями з урахуванням того, щоб час проїзду на роботу і назад в заміську

зону не перевищував 4-5 годин. Евакуацією називають вивезення або виведення з міста в заміську зону решти населення, тобто робітників і службовців об'єктів, припиняють роботу під час війни або переносять її в заміську зону, і незайнятого у сфері виробництва та обслуговування населення. Евакуйоване населення живе в заміській зоні до особливого розпорядження. Розосередження та евакуацію проводять в період загрози нападу ворога, безпосередньої загрози НС такими способами: - Вивезення населення транспортом; - Висновок пішки; - Комбінованим, при якому висновок з міста пішки поєднують з вивезенням деяких категорій населення. Транспорті вивозять працівників об'єктів, що функціонують формування ЦЗ, інвалідів, хворих, жінок з дітьми до 10 років. Після розосередження і евакуації в містах залишається тільки зміна, працює [45]. Розосередження та евакуацію працівників, службовців, членів їх сімей планують і організують за територіально-виробничим принципом, тобто працівники - по об'єктам господарювання, а населення, не має відношення до виробництва, - за місцем проживання, через житлово-експлуатаційні організації. Евакуйоване населення, робітників і службовців підприємств, що функціонують, розмішують в заміській зоні на житловій площі місцевих жителів, в клубах, пристосованих для проживання службових і виробничих будівлях, будинках відпочинку, пансіонатах, дачних селищах. Евакуйоване населення розміщують у більш віддалених районах. Для безпосереднього управління підготовкою та проведенням евакозаходів створюють евакуаційні органи, до яких належать: у містах - міські, районні та об'єктові евакуаційні комісії (ЕК) збірні евакуаційні пункти (СЕР), у сільських районах - евакоприймні комісії (ЕРК), прийомні евакуаційні пункти (ПЕР) і проміжні пункти евакуації (ПРЕ) [43]. Евакуаційні комісії та ЕРК здійснюють планування, підготовку, організацію і керівництво проведенням евакуаційних заходів. Збірні евакуаційні пункти призначені для організації збору, реєстрації, обліку та відправки міського населення в заміську зону. Їх розмішують поблизу станцій, пристаней, пунктів посадки на транспорт. Приблизний склад ЗЕР: керівник, його заступник, групи - оповіщення, реєстрації та обліку, охорони громадського порядку, комендант і чергові, голови ешелонів (колон). У

евакуаційному пункті організують медичний пункт, кімната матері і дитини, довідкова. До ЗЕП приписують заздалегідь певні об'єкти і частина населення.

Висновки

1. Наведено перелік основних заходів щодо охорони праці та навколишнього середовища, яких необхідно дотримуватися на виробництві у зв'язку з надходженням колод та при роботі з установками біогазу.
2. Проведення заходів з евакуації вимагає всебічного забезпечення, яке включає – протирадіаційні та протихімічні захисні речі; медичне, матеріальне, технічне, транспортне забезпечення та охорону громадського порядку

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВОКИ

Для визначення ефективності впровадження БГУ було проведено її енергетичну оцінку.

На відміну від промисловості кількість продукції в сільському господарстві залежить не стільки від маси застосованих засобів праці, скільки від ступеня їхнього впливу на перебіг біологічних процесів, можливості контролювати природні закономірності, наслідком яких і є накопичення біологічної маси. Різниця між сільським господарством і промисловістю з погляду споживання енергії полягає в тому, що при створенні промислової продукції використовується однорідна за своїм складом енергія - штучна, а сільгоспгосподарської - два види: штучна і природна.

Саме різниця споживаної енергії та її кількісна неоднорідність становлять одну зі специфічних сторін отримання біогазу в сільському господарстві.

Тому основні фонди як потенційні носії та споживачі енергії, та й самі енергетичні потужності відображають не всю енергію, витрачену на одержання біогазу, а тільки її частину - штучну енергію. Відомо, що власне біологічну масу формує природна енергія, а штучна енергія відіграє роль допоміжної, тоді як у промисловості вона є основною.

Загальною основою, що забезпечує можливість здійснення виробничого процесу одержання біогазу та біодобрив у сільському господарстві, слугує земля, а загальним елементом, що зв'язує всі складові в єдиний виробничий процес, є енергетичні витрати.

Енергетичні витрати поділяються на носії енергії прямого і непрямого використання. До носіїв енергії прямого використання належать насамперед витрати технологічної енергії, а його аналіз дає уявлення про енергію як фізичну категорію, необхідну для виробництва біогазу та біодобрив.

Енергетичний аналіз як проміжних результатів, так і деяких окремих видів продукції дасть змогу суттєво вплинути на підвищення економічної ефективності виробництва.

БГУ буде ефективною, якщо ціна одержуваного біогазу перевищує додаткові витрати на виготовлення установки, тобто коли буде виконано умову виконуватиметься умова:

$$\frac{B}{E} > \frac{B_1 + \Delta B}{E_1 + \Delta E}$$

де B - виробництво біогазу на існуючій установці (аналог), м^3

B_1 – виробництво біогазу з теплообмінником-змішувачем (БГУ-ТЗ), м^3

ΔB – виробництво додаткового біогазу на БГУ-ТЗ, м^3

E – енергетичні витрати на виробництво існуючої установки (аналог), $\text{МДж}/\text{м}^3$

E_1 – енергетичні витрати на виробництво БГУ-ТЗ, $\text{МДж}/\text{м}^3$

ΔE – додаткові енергетичні витрати на виробництво БГУ-ТЗ, $\text{МДж}/\text{м}^3$

Енергетичні витрати на виробництво модернізованої БГУ визначаються з використанням коефіцієнта перерахунку металоємності в енергетичний еквівалент:

$$E = M_{\text{пит.тепл}} K$$

$M_{\text{пит.тепл}}$ – питома металоємність конструкції БГУ, $(\text{кг} \cdot \text{год})/\text{м}^3$

K – енергетичний еквівалент БГУ, $K=104 \text{ МДж}/\text{кг} \cdot \text{год}$.

Оцінюючи модернізовану БГУ, можна засвідчити що з коефіцієнтом відтворення енергії більше одиниці є ефективною установкою, тобто $K=1,22 > 1$, отже проектування БГУ по виробництву біогазу враховується ефективним.

Рівень процесу інтенсифікації оцінюється коефіцієнтом ефективності:

$$A = \frac{(B_1 + \Delta B) / (E_1 + \Delta E)}{B / E} = \frac{E}{E_1}$$

При $A > 1$ процес ефективний.

Згідно експериментальних досліджень виконано порівняльний аналіз БГУ-ТЗ з аналогом (без теплообмінника-змішувача).

Питома металоємність БГУ визначається за формулою:

$$M_{\text{пит.тепл}} = M / B$$

M – маса установки, кг

$$M_{\text{нпт.мелл}}^1 = 1400 / 14,2 = 98,59 \text{ кг} \cdot \text{год} / \text{м}^3$$

$$M_{\text{нпт.мелл}}^2 = 1300 / 12 = 108,3 \text{ кг} \cdot \text{год} / \text{м}^3$$

Індекс 1;2 – модернізована і аналог БГУ відповідно.

$$E_1 = 98,59 \cdot 104 = 10253,36 \text{ МДж} / \text{м}^3$$

$$E_2 = 108,3 \cdot 104 = 11263,2 \text{ МДж} / \text{м}^3$$

$$\text{Тоді } \Delta E = E_2 - E_1 = 1009,84 \text{ МДж} / \text{м}^3$$

$$\Delta B = B_2 - B_1 = 2,2 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

Рівень процесу інтенсифікації $A=1,1$, тобто впровадження модернізованої установки з енергетичної точки зору враховується ефективним.

Основним завданням підвищення економічної ефективності сільськогосподарського виробництва є зниження енерго- та ресурсоемності. Енергетичний аналіз результатів виробництва в сільському господарстві дає змогу провести аналіз факторів, що підвищують виробництво продукції.

Слід зазначити, що економічна оцінка ефективності необхідна для визначення доцільності проведення оптимізації роботи модернізованої БГУ з теплообмінником-змішувачем під час зброджування пташиного посліду, а також для зниження економічних та енергетичних витрат під час вироблення біогазу, результати яких наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Техніко-економічні показники ефективності використання БГУ

Показники	Позначення	Одиниці виміру	Значення
Кількість отриманого газу за весь період	V	м ³ /т	80
Витрата біогазу для підвищення теплої здатності		м ³	3,1
Енергетична цінність отриманого газу	Q _{оп}	МДж/м ³	1555,2
Середньодобове споживання електроенергії	W	кВт·год/м ³	3
Процентна частка середньодобового споживання енергії від виробленого газу	φ	%	41,6
Кількісна частка середньодобового споживання енергії від виробленого газу	W _б / W	раз	2,4
Річне виробництво теплової енергії установкою	Q _{річ}	МВт год	13,4
Тривалість споживання палива, дні (тривалість можна прирівняти наприклад до опалювального сезону)	T _{оп}	днів	205
Капіталовкладення	K	грн	148020
Економія природного газу	B	м ³	21176
Ціна 1000 м ³	Ц _{гр}	грн	7990
Вартість зекономленого газу	E _{нпде}	грн	119808
Термін окупності	T _{нпде}	міс	9,6

Висновки

1. Основним завданням підвищення економічної ефективності сільськогосподарського виробництва є зниження енерго- та ресурсоемності. Енергетичний аналіз результатів виробництва в сільському господарстві дає змогу провести аналіз факторів, що підвищують виробництво продукції.
2. Слід зазначити, що економічна оцінка ефективності необхідна для визначення доцільності проведення оптимізації роботи модернізованої БГУ з теплообмінником-змішувачем під час зброджування пташиного посліду, а також для зниження економічних та енергетичних витрат під час вироблення
3. Термін окупності використання БГУ складає 9,6 місяців.
4. Таким чином, розрахунки підтвердили доцільність використання установки.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сучасних технологій переробки та утилізації посліду та розкрито особливості застосування мікроорганізмів як засобу контролю забруднення навколишнього середовища.
2. Виконано аналіз властивостей біогазу та добрив, що задовільняє використання біогазу з посліду у побуді.
3. Обґрунтовано мікробіологічні процеси, що відбуваються в біогазових установках. Показано, що метаболічна активність і плодючість метаногенних бактерій залежать головним чином від температури. Для підтримання заданого температурного режиму в біогазовій установці витрачається 20-50% від загального обсягу виробленого біогазу.
4. Обґрунтовано технологічну схему та параметри біогазової установки, яка відрізняється від відомих схем тим, що змішувальний пристрій є одночасно нагрівальним елементом.
5. Отримані аналітичні вирази для визначення термічного опору теплопередачі в залежності від геометричних розмірів поверхні біореактора.
6. При обґрунтуванні багатofакторного експерименту встановлено що максимальних вихід біогазу складає $15,5 \text{ м}^3$, проте частина цього біогазу витрачається на нагрівання та підтримання термофільного режиму біомаси і становить до 20 % ($3,1 \text{ м}^3$ біогазу).
7. Максимальне значення виходу біодобрива становить $0,26 \text{ м}^3/\text{доб}$, яке досягається з оптимальними значеннями $T_{\text{П}}=54,40\text{C}$, $t_{\text{П}}=17,2$ хвилин , $T_{\text{П}}=7,6$ об/хв.
8. Економічна оцінка ефективності необхідна для визначення доцільності проведення оптимізації роботи модернізованої БГУ з теплообмінником-змішувачем під час зброджування пташиного посліду, а також для зниження економічних та енергетичних витрат під час вироблення. Термін окупності використання БГУ складає 9,6 місяців.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Низькопотенційна енергетика : навч. посіб. / А. О. Редько, М. К. Безродний, М. В. Загорученко [та ін.] ; під ред. академіка НАНУ А. А. Долинського. – Харків : Друкарня Мадрид, 2016. – 412 с.
2. Шацький В.В., Скляр О.Г., Скляр Р.В., Солодка О.О. Вплив структури субстрату на вихід біогазу при метановому зброджуванні. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 13. Т.3. С. 3-12.
3. Ратушняк Г. С. Моделювання теплового режиму на початковій фазі бродіння в біогазовій установці з пропелерною мішалкою / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вісник ХНУ. – 2010. – № 4. – С. 19–22.
4. Скляр О.Г., Скляр Р.В. Аналіз існуючих багатопарових захисних конструкцій біогазових установок. Науковий вісник ТДАТУ. Мелітополь, 2014. Вип.4. Т.1. С. 88-94. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf4t1/14.pdf>
5. Желих В. М. Енергоефективні системи теплозабезпечення виробничих приміщень / В. М. Желих, О. І. Дзерин, Н. А. Сподинюк // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2012. – № 2. – С. 152–157
6. Пат. 49746 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u200911674 ; заявл. 16.11.2009 ; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.
7. Желих В. М. Теплозабезпечення побутового біореактора шляхом використання сонячної енергії / В. М. Желих, Ю. В. Фурдас, В. Б. Шепітчак // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2013. – № 1. – С. 142–149.
8. Ратушняк Г. С. Управління технологічним процесом біоконверсії при перемішуванні субстрату / Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк, К. В. Анохіна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2010. – № 2 – С. 117–122.

9. Пат. 27445 Україна, МПК. С 02F 11/04. Установа для одержання біогазу і біодобрива з органічних відходів / І. О. Аксютов, Я. В. Бабкін, заявник і власник патенту Аксютов І.О. – № у 200708488 ; заявл. 24.07.2007 ; опубл. 25.10.2007
10. Веденев А. Г. Руководство по биогазовым технологиям / А. Г. Веденев, А. Т. Веденева. – Бишкек : ДЭМИ, 2011. – 84 с.
11. Ратушняк Г. С. Энергоефективні технологічні процеси та обладнання біоконверсії : монографія / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 148 с.
12. Скляр О.Г., Скляр Р.В. Аналіз способів та засобів для перемішування субстрату в метантенках біогазових установок. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No 4. 19-26.
13. Кучерук П.П. Технологии утилизации и переработки отходов птицеводства / П.П. Кучерук, Ю.Б. Матвеев // Эффективное птицеводство. – 2007. – №6. – С. 45 – 46.
14. Топілін Г. Е. Принцип одержання біогазу і добрив з органічних відходів з агровиробництва / Г. Е. Топілін, С. М. Умінський, С. В. Інютін // Аграрний вісник Причорномор'я. – 2009. – № 49. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/avpch/Tn/2009_48/Topilin_Uminsky_Injutin.pdf
15. Друкований М. Ф. Вибір технологічного комплексу переробки біомаси в біогаз та органічних біологічних добрив / М. Ф. Друкований, О. С. Яремчик, В. В. Бранський // Збірник наукових праць ВНАУ. – 2011. – № 8. – С. 48–53.
16. Клименко В. Сільськогосподарські біогазові установки: закордонний досвід / В. Клименко // Техніка АПК. – 2006. – № 6 – 7. – С. 20–24.
17. Косенко Д.П. Використання біогазу для виробництва тепла й електроенергії методом когенерації / Д.П. Косенко, В.І. Пінчук // Зелена енергетика. – 2003. – № 2. – 11 с.

18. Крючков Є.М. Аналіз процесів біоконверсії та експериментальне визначення технологічних можливостей спалювання біогазу / Є.М. Крючков, 125 Ю.В. Куріс, А.В. Нестеренко [та ін.] // Енегетика та електрифікація. – 2007. – № 1. – С. 57 – 62
19. Лісничий В.М. Гидродинамический и тепловой режим биореактора биогазовой установки / В.Н. Лесничий, Г.А. Четверик // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 8. – С. 56 – 59.
20. Гунько І.В. Надійність систем та обґрунтування інженерних рішень / І.В. Гунько, А.В. Спирін, О.В. Холодюк. – Вінниця : ВДАУ, 2006. – 76 с.
21. Adani F. Biostabilization of solidus/ Adani F., Tanbone F., Gotti A // Waste Management. – 2004. – V.24. – P. 775 – 783.
22. Скляр О.Г., Скляр Р.В., Григоренко С.М. Програма та методика експериментальних досліджень на лабораторній біогазовій установці. Вісник Харківського національного університету с. г. ім. П. Василенка: наукове фахове видання. Харків, 2019. Вип.199. С. 267- 275.
23. ДСТУ 7588:2014 «Сільськогосподарська техніка. Установки біогазові. Методи випробування».
24. ДСТУ 4516:2006 «Енергоощадність. Поновлювані джерела енергії. Установки біогазові. Загальні технічні вимоги»
25. Наказ МВС України від 05.11.2018 № 879 «Про затвердження Правил техногенної безпеки».