

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Технічної механіки та сільськогосподарських машин
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Підвищення ефективності біогазової установки
з удосконаленням шнекових і лопатевих механізмів
перемішування та транспортування сировини

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи МГс-41
спеціальності 208 Агроінженерія

(шифр і назва спеціальності)

Колтуцький Я.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Чорний Б.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Цьонь Г.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Сташків М.Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Бабій А.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра Технічної механіки та сільськогосподарських машин
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 208 Агроінженерія
(шифр і назва спеціальності)
студенту Чорний Богдан Степанович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності біогазової установки з удосконаленням
шнекових і лопатевих механізмів перемішування та транспортування
сировини (комплексна тема)

Керівник роботи Цьонь Ганна Богданівна, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 22 » січня 2026 року № 4/9-56

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи геометричні, кінематичні та енергетичні розрахунки
гомогенізатора для підготовки відходів з ферми, яка утримує 200 голів ВРХ

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. 1. Аналіз
біогазових установок та механізмів, які забезпечують технологічний процес.

2. Обґрунтування технологічних, конструктивних параметрів біогазової установки

3. Технологічні та конструкторські розрахунки біогазової установки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точних зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Технологічна та функціональна схема біогазової установки – 1А4. 2. Класифікація
лопатевих перемішувачів-1А4. 3. Конструкція робочого органу лопатевої мішалки – 1А4.

4. Конструктивна схема гомогенізатора з шнековим перемішуванням біосировини.

Технологічна схема гомогенізатора -1А4. 5. Технологічна схема біореактора з лопатевим
перемішувачем. Конструктивна схема лопатевої мішалки біогазового реактора – 1А4.

6. Шнек. Складальне креслення – 1А4.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Лазарюк В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання

23 січня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін етапів виконання роботи	Примітка
1	Аналіз біогазових установок та механізмів, які забезпечують технологічний процес	до 12.05.2026	
2	Обґрунтування технологічних, конструктивних параметрів біогазової установки	до 26.05.2026	
3	Технологічні та конструкторські розрахунки біогазової установки	до 08.06.2026	
4	Безпека життєдіяльності. Основи охорони праці	до 10.06.2026	
5	Реферат. Вступ. Загальні висновки	до 13.06.2026	
6	Ілюстративний матеріал	до 15.06.2026	

Студент

(підпис)

Чорний Б.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Цьонь Г.Б.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедра Технічної механіки та сільськогосподарських машин

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 208 Агроінженерія

(шифр і назва спеціальності)

студенту Колтуцький Ярослав Богданович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності біогазової установки з удосконаленням

шнекових і лопатевих механізмів перемішування та транспортування

сировини (комплексна тема)

Керівник роботи Цьонь Ганна Богданвна, к.т.н.

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

Затверджені наказом ректора від « 22 » січня 2026 року № 4/9-56

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи геометричні, кінематичні та енергетичні розрахунки

біогазової установки для ферми, яка утримує 200 голів ВРХ

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. 1. Аналіз

біогазових установок та механізмів, які забезпечують технологічний процес.

2. Обґрунтування технологічних, конструктивних параметрів біогазової установки

3. Технологічні та конструкторські розрахунки біогазової установки.

4. Безпека життєдіяльності. Основи охорони праці. Загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точних зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Складові елементи біогазової установки – 1А4. 2. Класифікація шнекових перемішувачів

біогазової установки – 1А4. 3. Технологічна схема виробництва біогазу біогазовою

установкою – 1А4. 4. Лопатевий перемішувач. Складальне креслення-1А4.

5. Деталювання – 1А4

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Лазарюк В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання

23 січня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін етапів виконання роботи	Примітка
1	Аналіз біогазових установок та механізмів, які забезпечують технологічний процес	до 12.05.2026	
2	Обґрунтування технологічних, конструктивних параметрів біогазової установки	до 26.05.2026	
3	Технологічні та конструкторські розрахунки біогазової установки	до 08.06.2026	
4	Безпека життєдіяльності. Основи охорони праці	до 10.06.2026	
5	Реферат. Вступ. Загальні висновки	до 13.06.2026	
6	Ілюстративний матеріал	до 15.06.2026	

Студент

_____ (підпис)

Колтуцький Я.Б.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Цьонь Г.Б.

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Автори роботи – Колтуцький Ярослав Богданович, Чорний Богдан Степанович.

Тема роботи – «Підвищення ефективності біогазової установки з удосконаленням шнекових і лопатевих механізмів перемішування та транспортування сировини».

Робота виконана на кафедрі технічної механіки та сільськогосподарських машин ТНТУ імені Івана Пулюя.

Керівник роботи – Цьонь Ганна Богданівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, переліку посилань (35 найменувань). Загальний обсяг текстової частини – 98 сторінок на яких є 29 рисунків, додатки розміщені на 2 сторінках. Ілюстративний матеріал розміщений на 15 аркушах формату А4.

Актуальність теми роботи. В умовах зростання вартості традиційних енергоносіїв та посилення екологічних вимог до аграрного виробництва особливої актуальності набуває використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біогазу. Тваринницькі ферми України утворюють значні обсяги органічних відходів, які при нераціональному поводженні стають джерелом забруднення довкілля та втрат потенційної енергії.

Біогазові установки дозволяють одночасно вирішувати енергетичні, екологічні та агротехнічні завдання, проте їх ефективність значною мірою залежить від якості перемішування та транспортування сировини. Недостатня інтенсивність або нерівномірність перемішування призводить до зниження виходу біогазу, утворення «мертвих зон» і підвищення енерговитрат. У зв'язку з цим актуальним є інженерне обґрунтування та удосконалення шнекових і лопатевих механізмів, що забезпечують стабільну роботу біогазових установок в умовах фермерських господарств України.

Мета роботи: Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності біогазової установки шляхом обґрунтування технологічної схеми та вдосконалення шнекових і лопатевих механізмів перемішування і транспортування сировини, а також визначення їх раціональних геометричних, кінематичних та енергетичних параметрів для умов тваринницької ферми.

Об'єкт дослідження. Процес анаеробного зброджування органічної сировини в біогазовій установці тваринницької ферми.

Предмет дослідження. Технологічні, конструктивні та кінематичні параметри шнекових і лопатевих механізмів перемішування та транспортування біосировини у біогазових установках.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати та інженерні розрахунки можуть бути використані: при проєктуванні та модернізації біогазових установок для тваринницьких ферм; для вибору раціональних систем перемішування та транспортування гною і ко-субстратів; у навчальному процесі закладів вищої освіти агроінженерного профілю; як методична основа для подальших досліджень у галузі відновлюваної енергетики та екологізації аграрного виробництва.

Ключові слова: біогазова установка, анаеробне зброджування, шнековий механізм, лопатева мішалка, перемішування, транспортування сировини, гомогенізатор, метантанк, відновлювана енергія.

ЗМІСТ

	стр.
ВСТУП	10
1 АНАЛІЗ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК ТА МЕХАНІЗМІВ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС	12
1.1 Призначення біогазових установок, їх комплектація, технології та механізми	12
1.1.1 Загальна структура біогазової установки як технологічної системи	12
1.1.2 «Мокре» зброджування в реакторах CSTR – базова аграрна схема	16
1.1.3 «Сухе» зброджування: Plug-Flow та Garage-Digester	19
1.1.4 UASB / EGSB – висхіднопотокові схеми	20
1.1.5 Схеми з покритими лагунами та багатоступеневі технологічні схеми	20
1.1.6 Принципи вибору технологічної схеми	21
1.2 Огляд лопатевих перемішувачів у біогазових установках	21
1.2.1 Загальна характеристика лопатевих перемішувачів	21
1.2.2 Класифікація лопатевих перемішувачів для біогазових реакторів	22
1.2.3 Конструкція робочого органу лопатевої мішалки	26
1.2.4 Привід та підшипникові вузли	27
1.2.5 Формування циркуляційних контурів у лопатевому перемішувачі	28
1.2.6 Енергетичні та технологічні показники роботи лопатевих мішалок	29
1.2.7 Перспективи розвитку лопатевих перемішувачів для біогазових установок	30
1.3 Загальна характеристика шнекових перемішувачів	30
1.3.1 Характеристика шнекових перемішувачів	30
1.3.2 Класифікація шнекових перемішувачів у біогазових установках	31
1.3.3 Конструктивні елементи шнекового перемішувача	34
1.3.4 Привод та підшипникові вузли	35
1.3.5 Типи потоків у шнековому перемішувачі	36
1.3.6 Рекомендації по вибору геометричних параметрів шнека та кінематики роботи	36

1.3.7	Переваги та недоліки шнекових перемішувачів	37
1.4.	Загальні рекомендації по вибору схеми БГУ та механізмів, які забезпечують її роботу	38
2	ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ, КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ	40
2.1	Вибір технологічної схеми установки виробництва біогазу	40
2.2	Розрахунок технологічних та геометричних параметрів метантанка	42
2.3	Геометричний та технологічний розрахунки гомогенізатора	45
2.4	Вибір механізму по відкачуванню гною із гомогенізатора до біореактора	48
2.5	Вибір типу мішалки біореактора	50
2.6	Наближений розрахунок отримання біогазу	51
2.7	Енергетичний розрахунок	53
3	ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ	55
3.1	Розрахунки біосировини тваринницької ферми та геометричних параметрів БГУ	55
3.2	Геометричний, кінематичний та енергетичний розрахунок гомогенізатора	56
3.3	Інженерні розрахунки гнучного шнекового насоса для завантаження біореактора	60
3.4	Інженерні розрахунки лопатевої мішалки біогазової установки	65
3.5	Розрахунки, отриманої енергії проектованої установки	72
3.6	Визначення енергетичних затрат на забезпечення роботи БГУ	73
4.	БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	80
4.1	Організація робіт по техніці безпеки та охороні праці	80
4.2	Санітарно-гігієнічні вимоги по догляду за тваринами	82
4.3	Безпека в надзвичайних ситуаціях	87
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	91
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	93
	ДОДАТКИ	98

ВСТУП

Сучасний розвиток енергетики супроводжується постійним зростанням потреб у паливно-енергетичних ресурсах та необхідністю зменшення негативного впливу на довкілля. Використання традиційних джерел енергії призводить до виснаження природних ресурсів і збільшення викидів парникових газів, тому дедалі більшого значення набуває впровадження альтернативних та відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних напрямів у цій сфері є застосування біогазових установок, які забезпечують переробку органічних відходів із одночасним отриманням енергетично цінного продукту – біогазу.

Біогазові технології широко використовуються у сільському господарстві, харчовій промисловості та комунальному господарстві, оскільки дають змогу ефективно утилізувати органічні відходи, знижувати екологічне навантаження та отримувати додаткове джерело енергії. Водночас ефективність роботи біогазових установок значною мірою залежить від умов перебігу процесу анаеробного зброджування, серед яких важливе місце займають якість перемішування та стабільність транспортування сировини. Недостатня інтенсивність перемішування може спричиняти утворення застійних зон, осідання твердих частинок і нерівномірний розподіл температури у ферментаторі, що негативно впливає на активність мікроорганізмів та знижує вихід біогазу.

Особливу роль у забезпеченні стабільної роботи біогазової системи відіграють шнекові та лопатеві механізми. Шнекові пристрої використовуються для подачі та переміщення біомаси, забезпечуючи безперервність технологічного процесу та можливість роботи з в'язкими й неоднорідними матеріалами. Лопатеві механізми виконують функцію інтенсивного перемішування субстрату, сприяючи рівномірному розподілу поживних речовин, температури та мікроорганізмів у реакторі. Проте на практиці існуючі

конструкції не завжди забезпечують необхідний рівень продуктивності та енергоефективності, особливо за умов високої вологості або значної густини сировини. Це зумовлює потребу в удосконаленні конструктивних параметрів і принципів роботи таких механізмів.

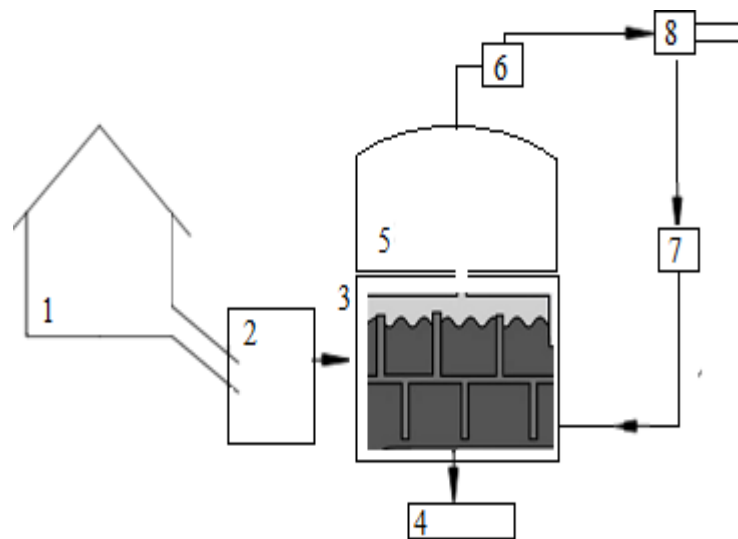
Актуальність даної теми полягає у необхідності підвищення ефективності функціонування біогазових установок за рахунок оптимізації процесів перемішування та транспортування органічної маси. Удосконалення шнекових і лопатевих механізмів дозволить покращити гідродинамічні процеси всередині ферментатора, зменшити енергетичні витрати на обслуговування обладнання та підвищити інтенсивність утворення біогазу. Крім того, модернізація таких систем сприятиме збільшенню надійності та довговічності обладнання, що має важливе значення для промислового використання біогазових технологій.

1 АНАЛІЗ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК ТА МЕХАНІЗМІВ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

1.1 Призначення біогазових установок, їх комплектація, технології та механізми

1.1.1 Загальна структура біогазової установки як технологічної системи

Незалежно від конкретної конфігурації, обраного типу реакторів чи інженерних рішень, будь-яка біогазова установка являє собою комплекс взаємопов'язаних модулів. Їхня функціональність визначає стабільність анаеробного процесу, рівень виходу біогазу, енергоефективність та можливості подальшої утилізації дигестату. У типових агропромислових біогазових комплексах кожен модуль виконує специфічні технологічні функції, рисунок 1.1. і рисунок 1.2 [7, 19, 36, 37].



1 – ферма; 2- збірник гомогенізації; 3 – центрифуга з мішалками; 4 – добрива;
5 – реактор; 6 – газгольдер; 7 – біогаз на власні потреби (підігрівання реактора);
8 – виробництво електроенергії та тепла

Рисунок 1.1 – Блок схема біогазової установки

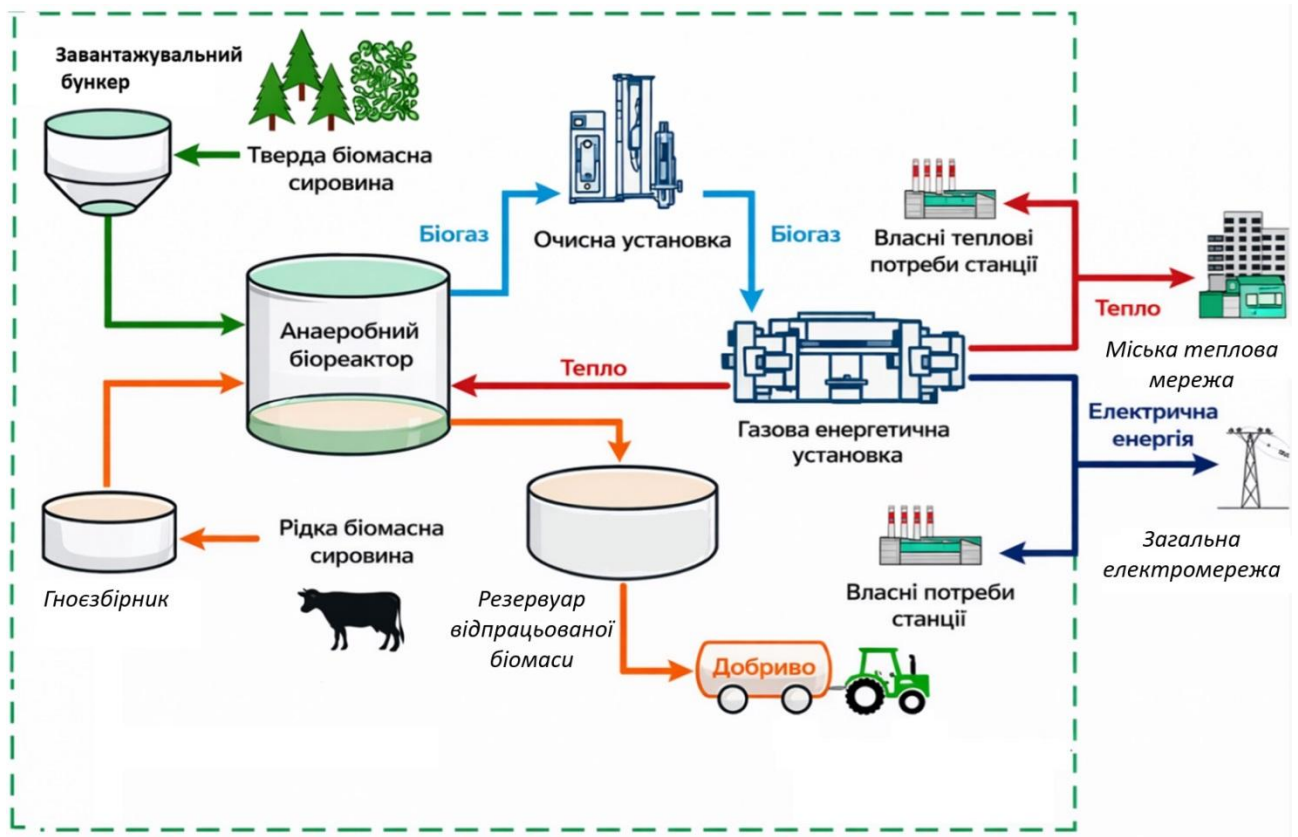


Рисунок 1.2 – Схематизація функцій кожного блоку біогазової установки

Блок приймання та підготовки субстрату

Цей блок забезпечує адаптацію неоднорідних видів сировини до вимог ферментаційного процесу:

- гноєзбірники, приймальні бункери, гідравлічні або завальні ями, які дозволяють вирівнювати добові коливання надходження гною та відходів;
- механічні або роторні подрібнювачі, решітки, магнітні сепаратори, що видаляють сторонні предмети, метал, каміння, та доводять крупність фракцій до допустимого рівня;
- гомогенізатори та змішувальні ємності для ко-субстратів (жом, силос, харчові відходи), що формують однорідну суспензію;
- насосно-транспортне обладнання – шнекові, гвинтові, поршневі, лопатеві або центробіжні насоси, обрані відповідно до в'язкості субстрату та вимог до подачі.

Ферментаційний блок (анаеробні реактори)

Ферментаційний блок (анаеробні реактори) – це центральний елемент установки, де відбувається розкладання органічних речовин. Реактори по відношенню до поверхні землі можуть мати декілька варіантів (рис. 1.3).

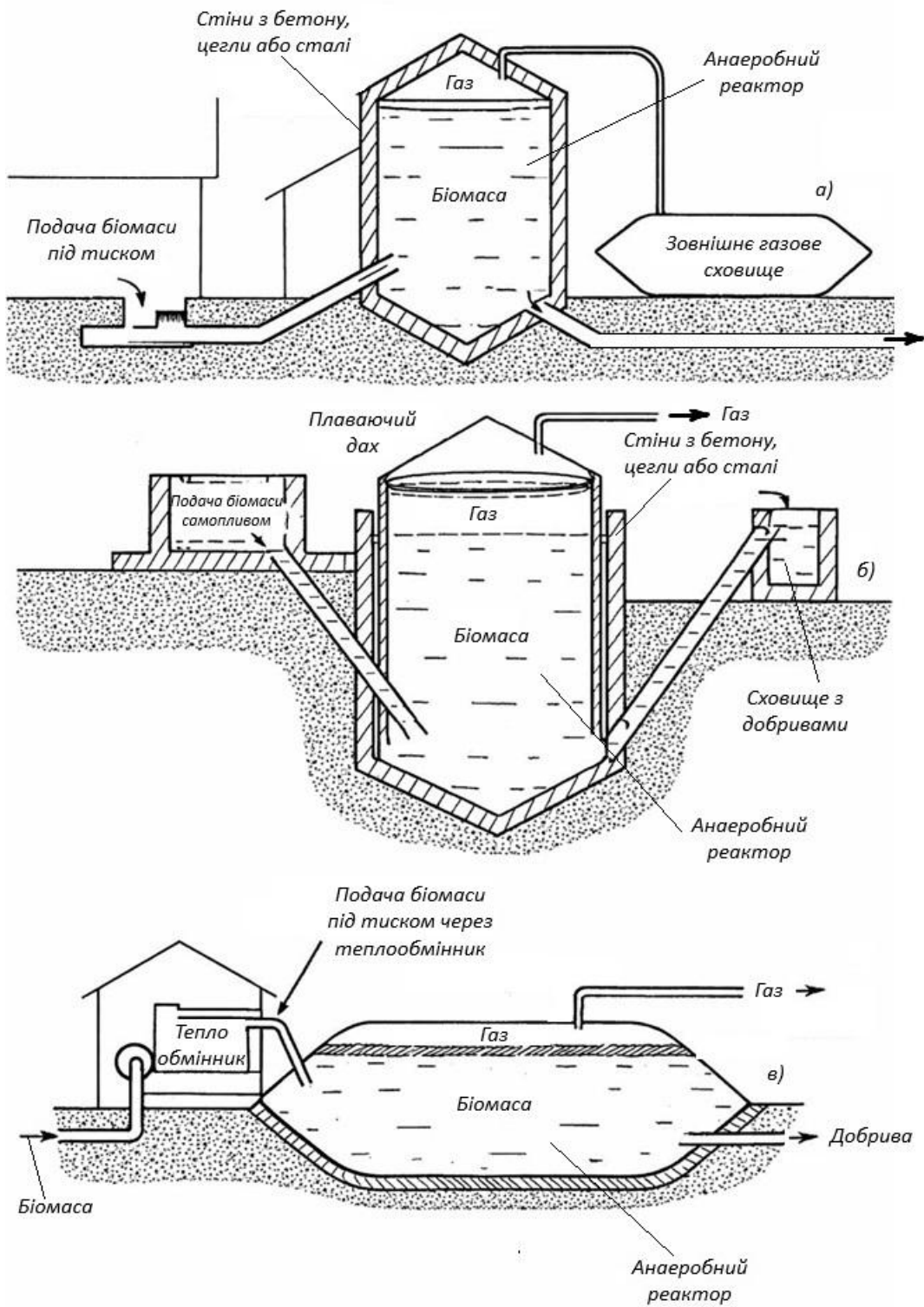
Реактори, які працюють за схемами: CSTR, plug-flow, garage, UASB, EGSB, відрізняються режимом потоку й допустимою концентрацією сухих речовин, але обов'язково включають [9, 21, 36]:

– Теплоізоляцію, зовнішні оболонки, внутрішні теплообмінники для підтримання мезофільного (35...40 °C) або термофільного (50...55 °C) режимів. Мезофільний режим (35...40°C, 10...20 діб) і термофільний (50...55° C, 8...10 діб). У термофільному реакція йде швидше, і відповідно в два рази швидше виділяється біогаз. Термофільний режим має переваги з точки зору екології, оскільки в цьому режимі знищуються майже повністю всі хвороботворні мікроорганізми. Але термофільний режим вимагає великих енерговитрат на підтримання необхідної температури реакції, а також більшої точності підтримки температури. Переважна кількість установок працює в мезофільному режимі. Мезофільний режим становить менш суворі вимоги до точності підтримки температури, але не завжди може підходити з точки зору екології.

– Системи перемішування (валові мішалки, гідравлічні циркулятори, газліфтні системи) для уникнення стратифікації, утворення кірки та локальних зон закиснення.

Газозбірний і газоочисний блок

В даному блоці формується та стабілізується якість біогазу: газгольдери (сталеві, мембранні, подвійно-мембранні купольні); блоки видалення H₂S (біофільтри, активоване вугілля, залізо-оксидні адсорбери); осушувачі (конденсатовідділювачі, адсорбери); блоки очищення від CO₂ (PSA, амінові скрубери, мембранні системи) для виробництва біометану.



а – наземна БГУ з вертикальним розміщенням реактора; б – підземна БГУ з вертикальним розміщенням реактора; в – БГУ з горизонтальним розміщенням реактора, комбінованого виконання

Рисунок 1.3 – Схематизація розміщень біореакторів типових БГУ по відношенню до земної поверхні

Енергетичний блок

Енергетичний блок, блок перетворення енергій, включає: когенераційні установки СНР (газові поршневі двигуни, мікротурбіни), що виробляють електроенергію та корисну теплоту; компримування біометану до стандартів ГТС.

Блок поводження з дигестатом

Комплекс працює із побічним, але надзвичайно цінним продуктом — органічним добривом, який включає такі механізми:

- резервуари для сирого дигестату;
- сепаратори «тверда/рідка фракція» (гвинтові преси, барабанні сита, декантери);
- лінії компостування, сушіння, гранулювання, зберігання та внесення в ґрунт.

1.1.2 «Мокре» зброджування в реакторах CSTR – базова аграрна схема

Реактор CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor (реактор безперервної дії з перемішуванням)) є універсальним рішенням для переробки більшості рідких аграрних відходів. Він працює в режимі безперервного або квазібезперервного завантаження, що забезпечує стабільність технологічного процесу (рис. 1.4). Схема застосовується для: гноївки ВРХ та свиней; зброджування рідкого гною з кукурудзяним силосом, жомом, жирами, харчовими та переробними відходами; відходів із вмістом сухих речовин до 12...14 % [21, 24, 37].

Основна властивість – низька в'язкість субстрату, що дозволяє застосовувати ефективно перемішування та підвищувати ступінь перетворення органіки в метан. Технологічна схема реактора безперервної дії показана на рисунку 1.5.

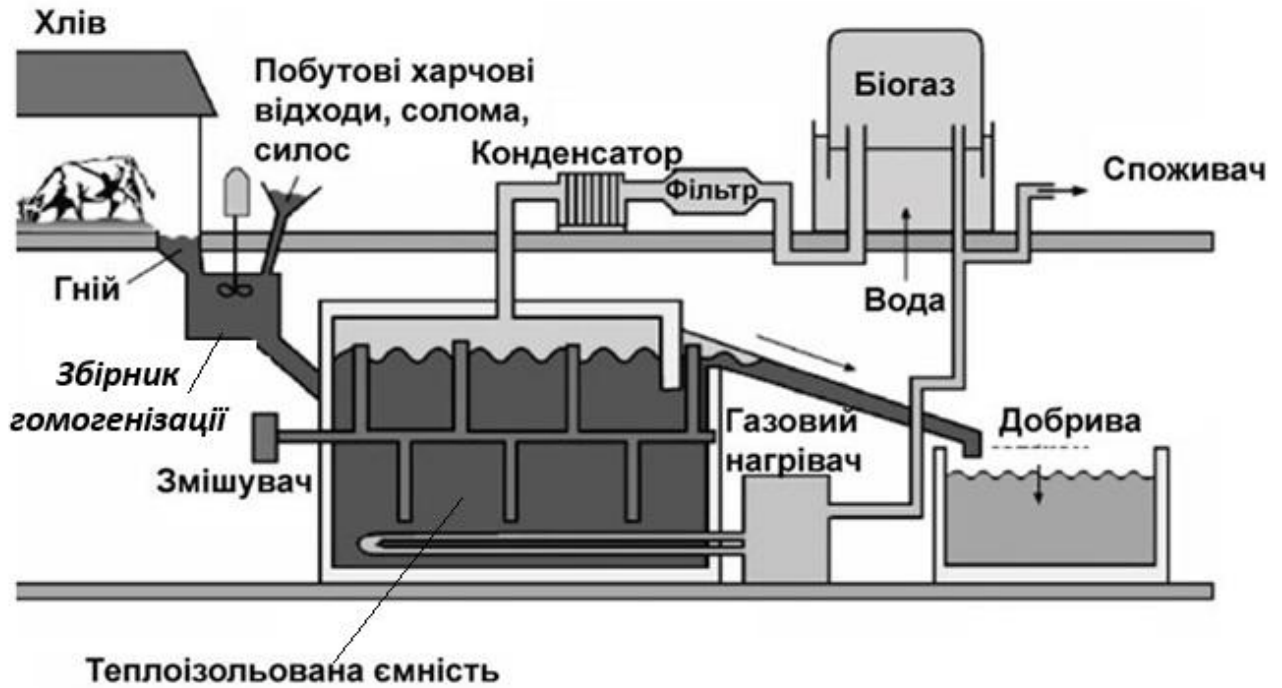
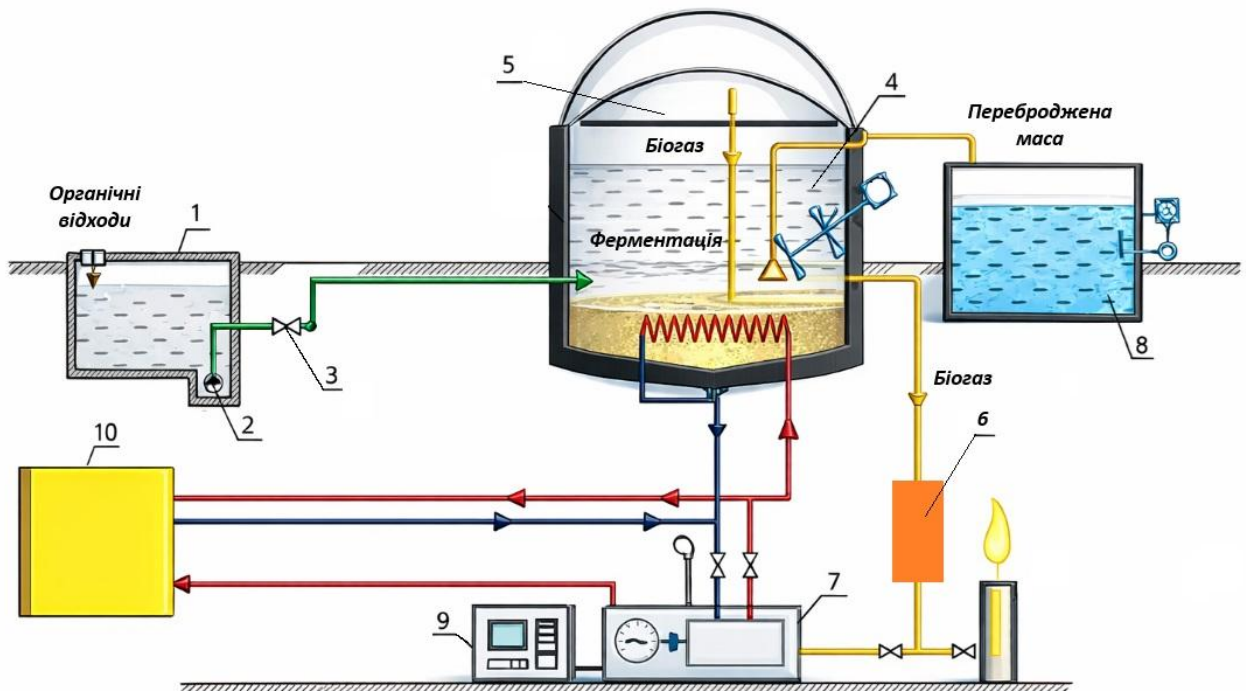


Рисунок 1.4 – Функціональна схема біогазової установки



- 1 – приймальне відділення ; 2 – змішувач-гомогенізатор; 3 – насосна станція;
 4 – ферментер; 5 – газгольдер; 6 – блок очищення газу; 7 – енергетичний блок;
 8 – лінія сепарації дигестату; 9 – блок керування роботою БГУ;
 10 – подача електроенергії в загальну мережу

Рисунок 1.5 – Технологічна схема біогазової установки

Кожний елемент технологічної схеми забезпечує виконання певного етапу отримання газу:

1. Приймальні ємності – це ємності, куди надходять гноєві маси та відходи.

2. Змішувач-гомогенізатор, блок, у якому формують однорідну суміш із стабільним вмістом сухих речовин.

3. Насосна станція – це блок, що подає сировину у ферментер з урахуванням добового завантаження.

4. Блок ферментації, який складається з: теплообміном (сорочка або внутрішні реєстри), однією чи кількома мішалками, можливістю рециркуляції теплоносія.

5. Газгольдер – це блок, зазвичай інтегрований у верхню частину реактора або зовнішній мембранний.

6. Блок очищення газу (H_2S , H_2O , CO_2).

7. Енергетичний блок подачі біометану в ГТС.

8. Лінію сепарації дигестату та зберігання фракцій.

9. Блок керування роботою БГУ.

10. блок подачі електроенергії в загальну мережу.

Переваги та недоліки CSTR

До переваг CSTR слід віднести: працює з широким спектром субстратів; просте масштабування від фермерських до промислових об'єктів; рівномірний та прогнозований вихід газу; можливість ефективного керування температурою та pH .

Недоліки схем CSTR включають: значна електроспоживаність через перемішування; утворення піни за надлишку білкових компонентів; потреба у регулярній перевірці стану мішалок та редукторів; чутливість до різких змін складу сировини.

1.1.3 «Сухе» збродження: Plug-Flow та Garage-Digester

Схема Plug-Flow

Підходить для субстратів із високим вмістом сухих речовин (25...45 %), які неможливо перекачувати насосами. Це:

- гній на солом'яній підстилці,
- фрезерований силос,
- стеблові післяжнивні рештки.

Реактор – довгий горизонтальний канал із повільним, майже ламінарним переміщенням маси [15, 22].

Перевагами даної технологічної схеми є:

- низькі енерговитрати;
- відсутність необхідності інтенсивного перемішування;
- здатність переробляти «важкі» субстрати.

Недоліки:

- гідродинамічна неоднорідність;
- утворення каналів швидкого потоку;
- важче контролювати НРТ.

Схема Garage-Digester

Схема Garage-Digester – це реактори з роздільними камерами з циклічним завантаженням, які:

- забезпечують незалежність роботи камер;
- дають можливість працювати партіями;
- дозволяють обробляти солом'яні та підстилкові субстрати без подрібнення.

1.1.4 UASB / EGSB – висхіднопотокові схеми

Ці технології застосовують переважно для промислових стоків: пивоварень, молокозаводів, цукрових заводів.

UASB формує гранульований мул з високою концентрацією біомаси. Це дозволяє працювати при дуже високому органічному навантаженні. EGSB – покращений варіант даної схеми, який характеризується більшою висотою реактора, збільшеною швидкістю потоку, підвищеною ефективністю контакту стоків із біомасою.

У сільському господарстві застосовують як доповнення до CSTR, особливо при очищенні рідких фракцій дигестату.

1.1.5 Схеми з покритими лагунами та багатоступеневі технологічні схеми

Схеми з покритими лагунами прості, дешеві та маловитратні. Підходять для регіонів із м'яким кліматом; наявністю великих площ для розміщення лагун. Основними їх недоліками є: низька швидкість процесів; сильна залежність від сезонних температур; обмежений контроль параметрів.

Багатоступеневі технологічні схеми процес поділяють на окремі технологічні блоки [24, 36, 37]:

1. Гідроліз – руйнування полімерів.
2. Ацидогенез – утворення летких кислот.
3. Метаногенез – перетворення VFA у метан.

До переваг відносять: контроль рН і температури на кожній стадії; краща переробка клітковини та жирів; вищий вихід метану на одиницю субстрату. Недоліком є те, що вони значно складніші та дорожчі.

1.1.6 Принципи вибору технологічної схеми

При виборі технологічної схеми конфігурацію БГУ слід враховувати [11, 21]:

- структуру субстрату (СР, в'язкість, наявність соломи);
- інвестиційні можливості;
- кліматичні умови;
- вимоги до кінцевого продукту;
- логістику збору та доставки сировини;
- доступність кваліфікованого персоналу.

1.2 Огляд лопатевих перемішувачів у біогазових установках

1.2.1 Загальна характеристика лопатевих перемішувачів

Ефективність анаеробного зброджування значною мірою визначається інтенсивністю та якістю перемішування субстрату в реакторі. Лопатеві перемішувачі (агітатори) належать до групи механічних змішувальних пристроїв із обертовим робочим органом, що формує керований рух потоку по об'єму ферментера. На відміну від пропелерних або гідравлічних систем, лопатеві мішалки забезпечують відносно малі швидкості зрушення при високому крутному моменті, що є критично важливим для густих, волокнистих та неоднорідних субстратів, характерних для біогазових установок [22, 26, 27, 36].

У практиці експлуатації біогазових комплексів ЄС та України лопатеві мішалки застосовуються переважно у високонавантажених ферментерах, які дозволяють:

- запобігати утворенню плаваючих кірок та осаду;
- підтримувати однорідність температурного поля;

- рівномірно розподіляти свіжу порцію субстрату;
- виводити утворені бульбашки біогазу з товщі маси;
- зменшувати градієнти концентрацій летких жирних кислот та амонію.

За правильно підібраних режимів змішування лопатеві перемішувачі дають змогу підвищити вихід біогазу на 5...15 % та скоротити ризик процесних збоїв, пов'язаних із локальною закисленістю та стратифікацією субстрату.

1.2.2 Класифікація лопатевих перемішувачів для біогазових реакторів

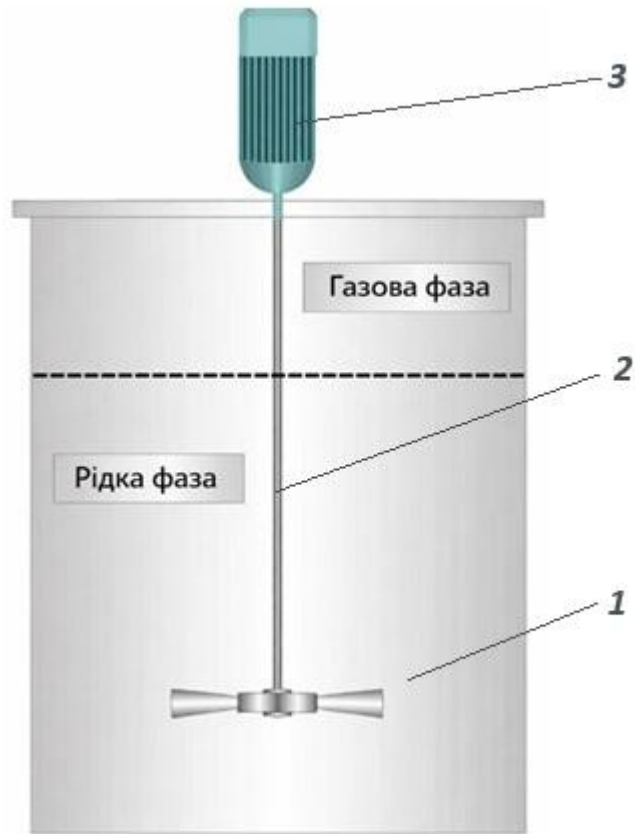
З огляду на конструктивну компоновку та спосіб взаємодії з робочим середовищем, лопатеві мішалки у біогазових установках можна поділити на такі основні групи:

Вертикальні лопатеві перемішувачі з центральним валом

Вал мішалки встановлений по осі циліндричного реактора; лопаті розташовані на різних висотах і під різними кутами атаки. Верхні лопаті спрямовують потік донизу, нижні – вгору, формуючи замкнений циркуляційний контур та ефективно руйнуючи плаваючі шари. Прикладом є промислові вертикальні агітатори для сухих субстратів із високою в'язкістю (рис.1.6) [3, 5, 36, 37].

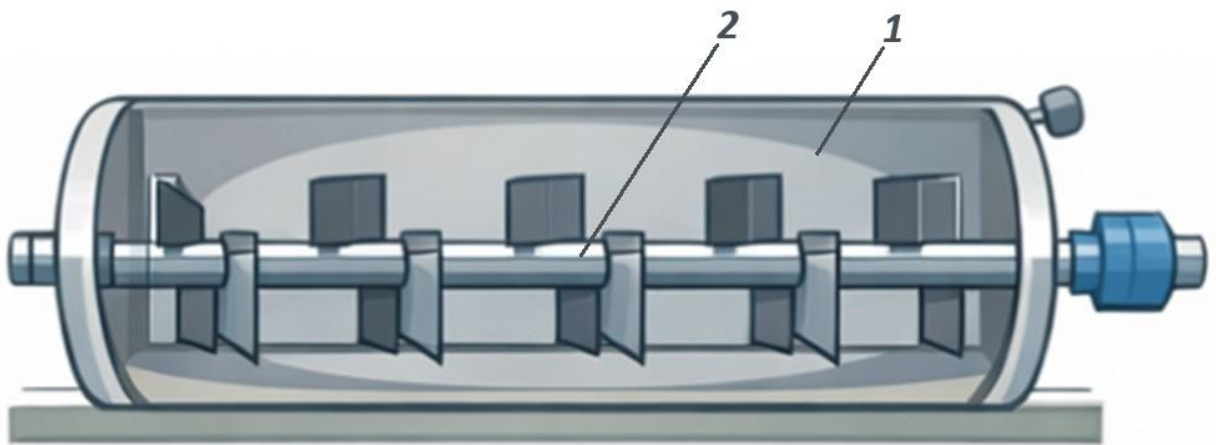
Горизонтальні лопатеві мішалки

Робочий вал кріпиться на стінках ферментера та підтримується опорами ззовні; по довжині вала закріплені консольні лопаті. Така схема дає можливість розташувати мішалку в нижній або середній зоні по висоті реактора й адаптувати кут атаки лопатей для створення спрямованого тангенціального або осьового потоку (рис. 1.7 - 1.8).



1 – біореактор; 2 – лопатева мішалка; 3 – привід мішалки

Рисунок 1.6 – Схема вертикального біогазового реактора з центральною лопатевою мішалкою



1 – біореактор; 2 – лопатева мішалка

Рисунок 1.7 – Схема біогазового реактора з горизонтальною двохопорною лопатевою мішалкою



Рисунок 1.8 – Горизонтальний консольний лопатевий мішалковий агрегат для ферментера циліндричної форми

Лопатеві мішалки карусельного (радіального) типу

Лопатеві мішалки карусельного (радіального) типу встановлюються на вертикальній опорі (колоні) й формують радіальний напірний потік з інтенсивним зрушенням у приповерхневій зоні. Часто застосовуються в поєднанні з переливними перегородками та направляючими щитами, що дозволяє формувати складні циркуляційні схеми в реакторах великого діаметра (рис. 1.9).

Комбіновані лопатево-пропелерні перемішувачі

У цих перемішувачах робочий орган містить лопаті у поєднанні з гвинтовим профілем або шнековим елементом. Такі мішалки поєднують переваги високого крутного моменту лопатевої схеми з підвищеною осьовою подачею, характерною для пропелерних систем.

У табл. 1.1 наведено основні різновиди лопатевих перемішувачів для біогазових установок.

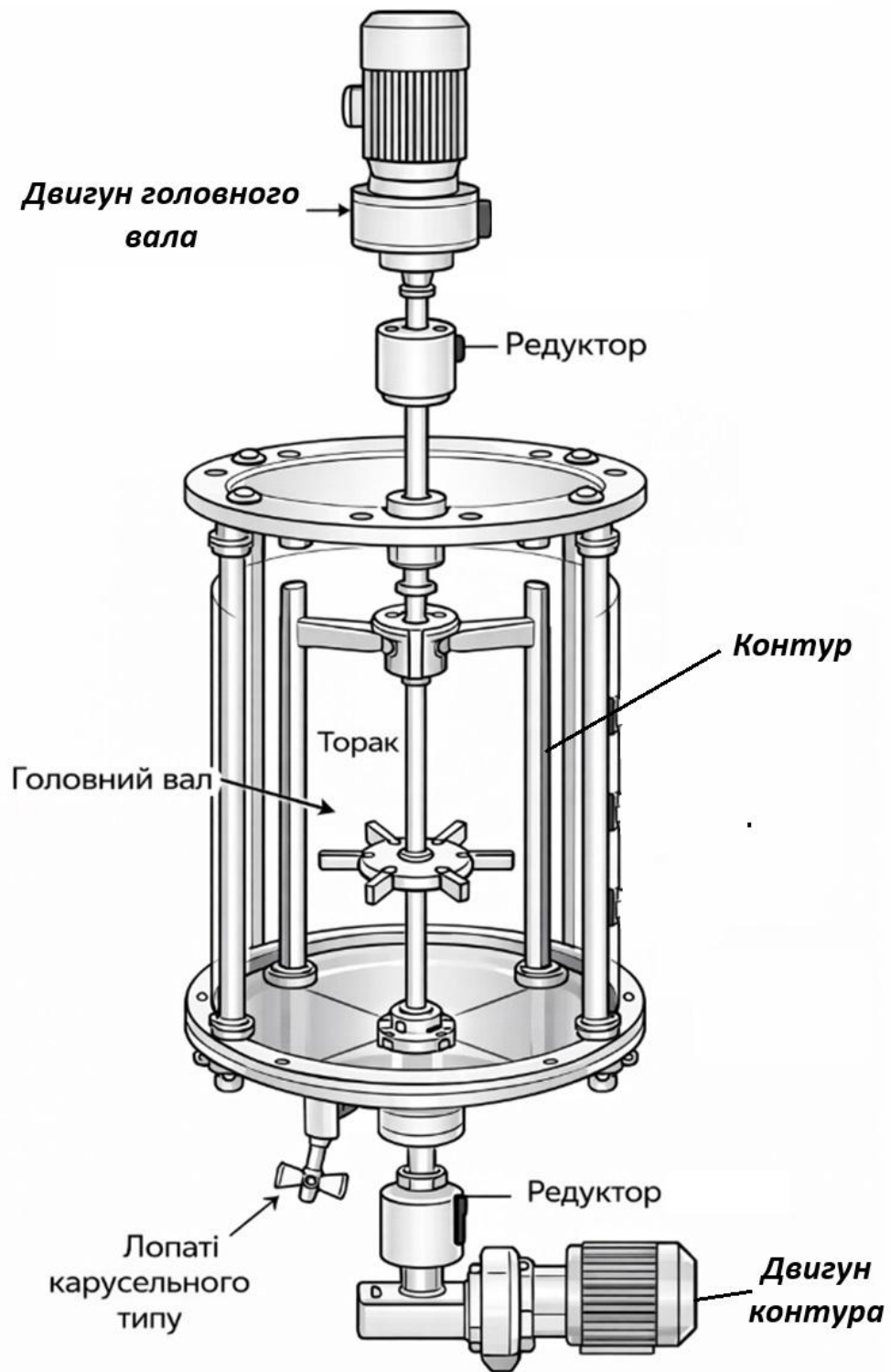


Рисунок 1.9 – Лопатева мішалка карусельного (радіального) типу

Таблиця 1.1 – Основні різновиди лопатевих перемішувачів для біогазових установок

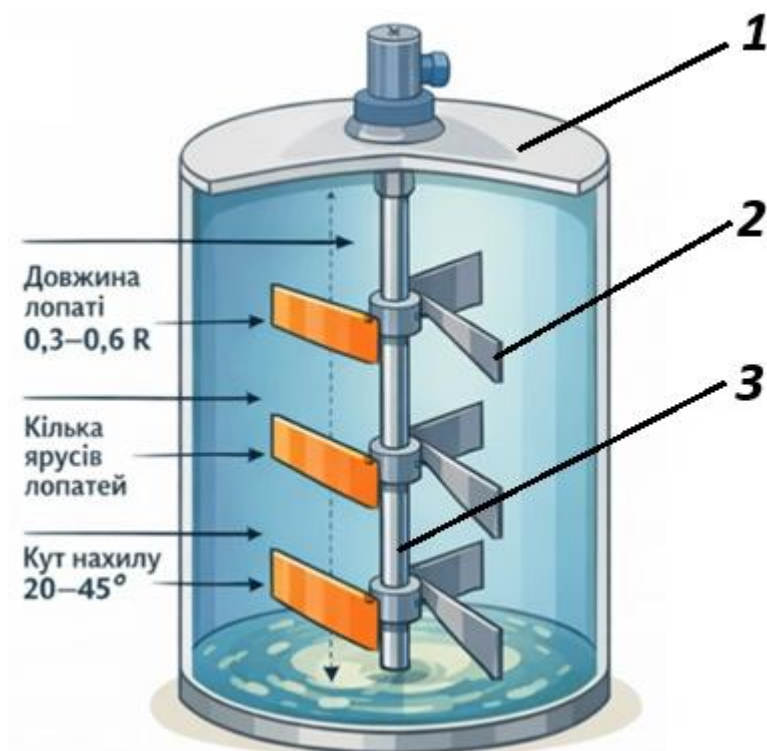
Тип перемішувача	Орієнтація вала	Характер руху потоку	Типові сфери застосування
Вертикальний центральний	Вертикальна	Комбінований осьовий + радіальний	Основні ферментери з високою в'язкістю субстрату
Горизонтальний консольний	Горизонтальна	Тангенціальний з осьовою компонентою	Циліндричні та прямокутні реактори, резервуари зберігання
Радіальний (карусельний)	Вертикальна	Радіальний поверхневий потік	Реактори великого діаметра, пост-ферментери
Комбінований лопатєво-пропелерний	Вертикальна/горизонтальна	Переважно осьовий із локальними зонами зрушення	Реактори з високим вмістом волокон, ферментери plug-flow
Лопатєві мішалки для дигестату	Вертикальна/горизонтальна	Помірна циркуляція по об'єму	Резервуари зберігання та гомогенізатори дигестату

1.2.3 Конструкція робочого органу лопатєвої мішалки

Лопатєві мішалки для біогазових реакторів, як правило, мають прямокутні або трапецієподібні лопаті, встановлені під кутом 20...45° до площини обертання. Такий діапазон забезпечує компроміс між інтенсивністю створюваного потоку та потужністю, що споживається приводом (рис. 1.10).

Ключовими конструктивними параметрами робочого органу лопатєвої мішалки [1, 4]:

- довжина лопаті (0,3...0,6 радіуса реактора);
- ширина лопаті, яка визначає площу активної поверхні;
- кут нахилу (кут атаки) відносно напрямку обертання;
- кількість ярусів лопатей уздовж вала;
- ступінь перекриття ярусів по висоті.



1 – корпус біореактора; 2 – лопатева мішалка; 3 – привідний вал мішалки

Рисунок 1.10 – Конструктивна схема робочого органу лопатевої мішалки

Зміна цих параметрів дозволяє налаштувати структуру потоку: від переважно осевого (забезпечує циркуляцію по висоті) до радіального (активна робота біля стінок, руйнування кірок та осаду).

1.2.4 Привід та підшипникові вузли

Привод лопатевих мішалок, як правило, включає [1, 8]:

- редуктор із великим передаточним числом, що забезпечує низьку швидкість обертання (5...20 об/хв) при високому крутному моменті;
- електродвигун у вибухозахищеному виконанні (ATEX), розрахований на роботу в зоні потенційної концентрації метану;

- зовнішні підшипникові опори, розташовані поза агресивним середовищем;

- системи ущільнення валу (механічні ущільнення, лабіринтові вузли) з мінімізацією витоку газу.

Для вертикальних мішалок верхня опора сприймає як радіальне, так і осьове навантаження, тоді як нижня опора (підп'ятник або напрямна втулка) виконує роль стабілізатора вала в масі субстрату.

1.2.5 Формування циркуляційних контурів у лопатевому перемішувачі

За розташуванням лопатей по висоті формується система макроконтурів:

- нижній контур у зоні підлоги ферментера, що запобігає накопиченню осаду;

- центральний контур для основної маси субстрату;

- верхній контур у приповерхневій зоні, де можливе утворення плаваючої кірки.

Правильно налаштований лопатевий мішалковий комплекс забезпечує взаємодію контурів, що гарантує відсутність «мертвих» зон. У сучасних системах вертикального типу кут атаки верхніх лопатей підбирають таким чином, щоб спрямувати частину потоку донизу, руйнуючи поверхневу кірку, тоді як нижні лопаті подають субстрат нагору [19].

1.2.6 Енергетичні та технологічні показники роботи лопатевих мішалок

Питома потужність мішалки ($\text{Вт}/\text{м}^3$ об'єму ферментера) є одним із ключових параметрів при проектуванні. Для лопатевих мішалок у біогазових реакторах зазвичай рекомендують [20, 30]:

1. 2...6 $\text{Вт}/\text{м}^3$ для низьков'язких субстратів (гній ВРХ, стоки БПК < 20 г/л);

2. 6...12 $\text{Вт}/\text{м}^3$ для середньов'язких субстратів (гній свиней, суміші з силосом);

3. 12...20 $\text{Вт}/\text{м}^3$ для високов'язких субстратів із сухою речовиною понад 12...15 %.

Оптимальне значення визначається експериментально з урахуванням фактичної реології, геометрії реактора та вимог до інтенсивності масообміну.

У практиці експлуатації помітно, що надмірна інтенсивність перемішування може негативно впливати на біологічну активність, особливо на стадії гідролізу та ацидогенезу. Тому сучасні системи лопатевого перемішування часто працюють у режимі:

– інтервального змішування (наприклад, 10...20 хв роботи / 40...60 хв паузи);

– адаптивного керування за температурою, тиском газу чи рівнем наповнення;

– зміни частоти обертання залежно від добової кривої завантаження субстрату.

1.2.7 Перспективи розвитку лопатевих перемішувачів для біогазових установок

Тенденції розвитку технологій перемішування спрямовані на:

1. *Інтелектуалізацію керування.* Використання датчиків крутного моменту, вібрації, струму двигуна для адаптивного регулювання частоти обертання, тривалості циклів змішування та автоматичного виявлення аномалій.

2. *Оптимізацію геометрії лопатей.* Використання методів CFD-моделювання для підбору форми лопатей та їх розташування з метою мінімізації «мертвих зон» та енерговитрат при забезпеченні заданого рівня масообміну.

3. *Комбіновані системи змішування.* Поєднання лопатевих мішалок із гідравлічною рециркуляцією або газовим перемішуванням (GasMix-типу) для великих реакторів, де потрібна гнучкість у роботі з різними типами субстратів.

4. *Матеріалознавчі удосконалення.* Впровадження високолегованих сталей, полімерних накладок та композитів, стійких до корозії й абразивного зношування, що дозволяє збільшити ресурс лопатей і зменшити інтервали сервісу.

1.3 Загальна характеристика шнекових перемішувачів

1.3.1 Характеристика шнекових перемішувачів

Біогазові установки як елементи енергетичної інфраструктури аграрних підприємств є складними технологічними системами, у яких процес анаеробного зброджування органічної сировини критично залежить від однорідності середовища в реакторі. Одним із ключових вузлів, що забезпечує стабільність процесу, є система перемішування субстрату. Для установок, які

працюють з високов'язкими, неоднорідними субстратами (гній ВРХ і свиней, гноївка, жом, силос, жиромістки відходи, рослинні рештки), дедалі більшого поширення набувають шнекові перемішувачі (шнекові мішалки) [5, 20].

Шнекові перемішувачі забезпечують створення спрямованих потоків всередині метантенка, інтенсивну циркуляцію твердих частинок, руйнування плаваючої кірки та запобігання осадженню важких фракцій. На відміну від класичних лопатевих чи пропелерних мішалок, шнекові системи здатні ефективно працювати в умовах високої сухої речовини (10...15 % і більше), підтримуючи однорідність середовища при менших швидкостях обертання й, відповідно, знижених енерговитратах.

1.3.2 Класифікація шнекових перемішувачів у біогазових установках

За розташуванням у реакторі їх класифікують на [26, 27]:

1. Вертикальні шнекові перемішувачі (рис. 1.11): шнек розташований уздовж вертикальної осі біореактора; забезпечує підйом маси з нижньої частини метантенка до верхньої та повторне опускання; доцільні для глибоких ємностей з відносно невеликим діаметром.

2. Горизонтальні шнекові перемішувачі (рис. 1.12): перемішувач розташований уздовж однієї з осей горизонтального циліндричного або прямокутного реактора; часто застосовують у довгих реакторах «plug-flow» та ферментерах типу «ферментер-канал».

3. Похилі (косі) шнекові перемішувачі (рис.1.13): вал шнека встановлений під нахилом до горизонталі; поєднують функції перемішування і часткового транспортування субстрату по висоті; дозволяють створити складний просторовий потік із зоною інтенсивного зсуву.

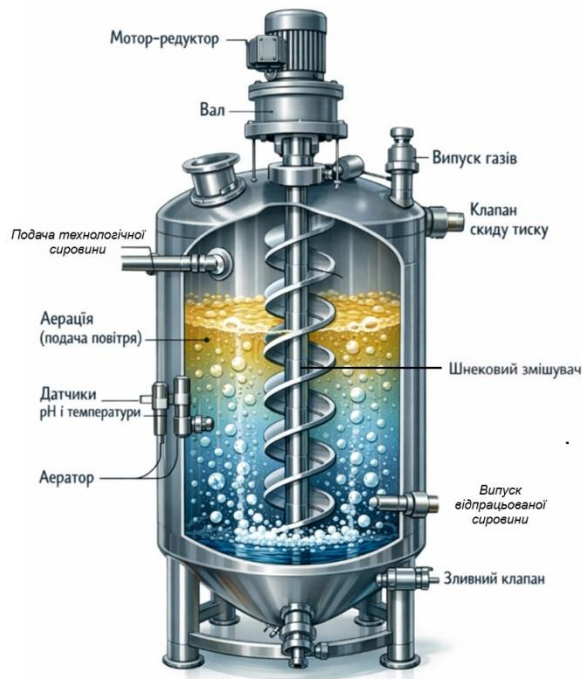


Рисунок 1.11 – Біореактор з вертикальним шнековим перемішувачем

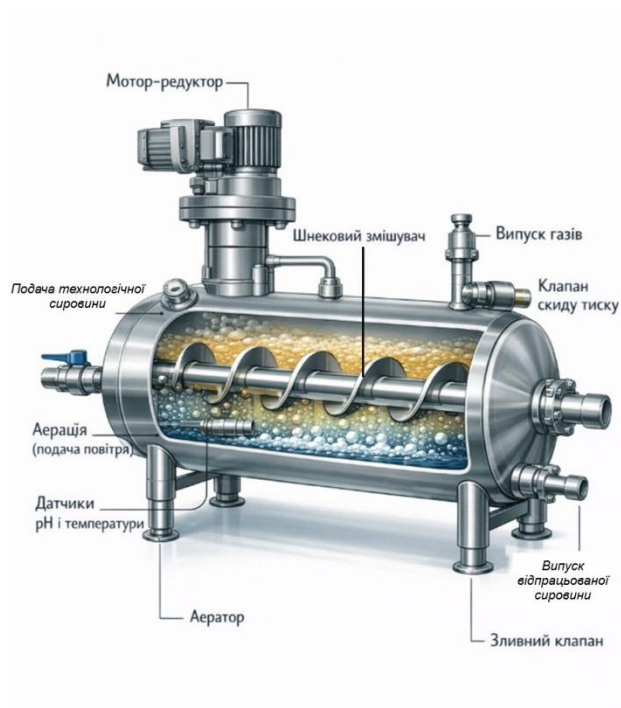


Рисунок 1.12 – Біореактор з горизонтальним шнековим перемішувачем

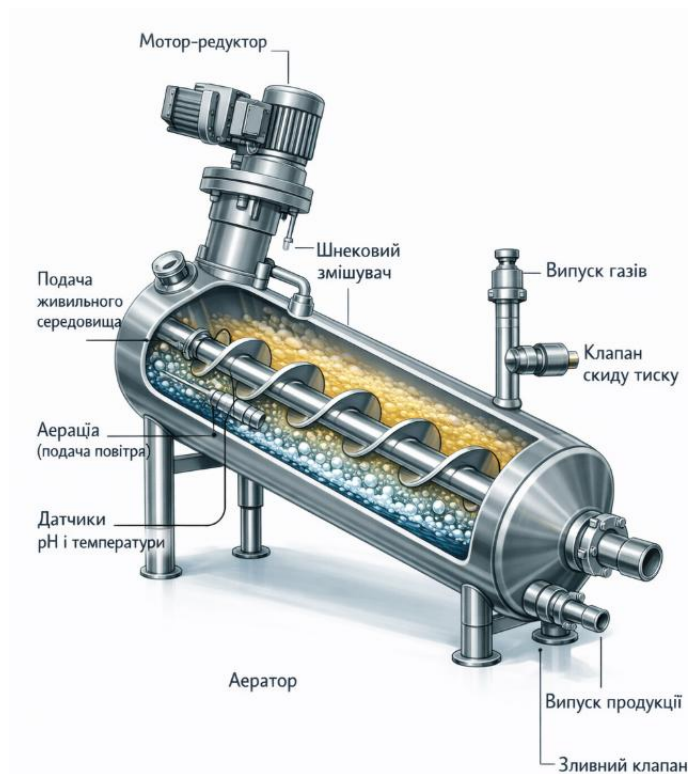


Рисунок 1.13 – Біореактор з похилим (косим) шнековим перемішувачем

За конструкцією робочого органу шнека, їх поділяють [20, 30]:

1. Суцільний (стрічковий) шнек – це нерозривна гвинтова стрічка з постійним або змінним кроком, є доцільним для пастоподібних середовищ з високою в'язкістю.

2. Секційний шнек (з окремих лопатей), конструкція якого становить: гвинтова поверхня сформована зі зварених сегментів; зручний у виробництві та ремонті; дає можливість змінювати крок та кут атаки по довжині вала.

3. Змішаний шнек (комбінована форма) – це поєднання стрічкового шнека із додатковими лопатями, скребками, турбулізаторами та призначений для інтенсифікації перемішування в окремих зонах реактора.

За способом монтажу та обслуговування шнекові перемішувачі поділяють на:

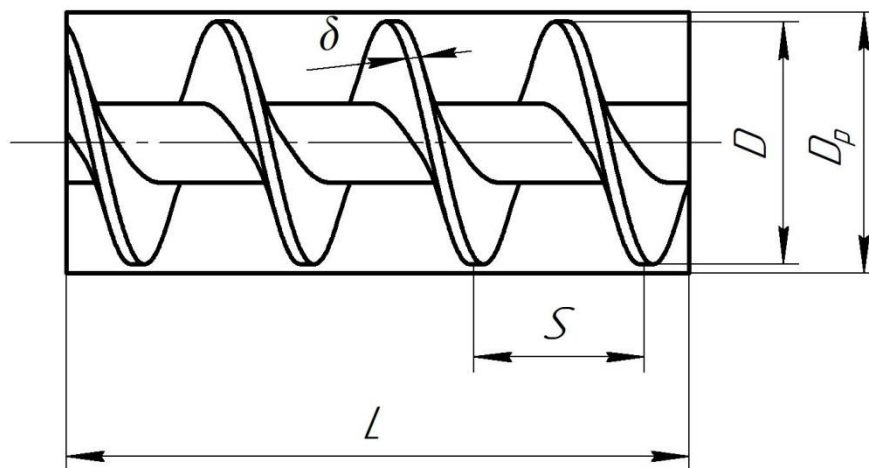
1. Стационарні – вал шнека жорстко закріплений у опорах, обслуговування здійснюють через технологічні люки.

2. Пересувні / регульовані по висоті – мають можливість зміни положення в реакторі (по висоті, куту нахилу), що полегшує обслуговування й адаптацію до різних рівнів заповнення.

3. Зовнішні шнекові змішувачі – розташовані поза основним реактором (у буферних ємностях, приймальних танках), але працюють із тим самим субстратом, забезпечуючи його попередню гомогенізацію.

1.3.3 Конструктивні елементи шнекового перемішувача

Робочий орган перемішувача – шнек, для якого основним робочим органом є гвинт, що складається з валу й гвинтової стрічки. Основні параметри шнека показані на рисунку 1.14 [3, 5].



D – діаметр шнека; D_p – діаметр біореактора; S – крок гвинтової стрічки;

δ – товщина гвинтової лінії; L – довжина робочої частини

Рисунок 1.14 – Конструктивні елементи шнекового механізму

У біогазових реакторах шнеки виконують із корозійностійких сталей (AISI 304, 316L) або чорних сталей із надійним антикорозійним покриттям (епоксидні, поліуретанові системи, гаряче цинкування у сухих зонах).

1.3.4 Привод та підшипникові вузли

Шнекові перемішувачі зазвичай приводяться в рух електродвигунами через редуктори:

- черв'ячні редуктори – компактні, з великим передавальним числом, але з низьким ККД [1, 8];

- циліндричні та конічно-циліндричні редуктори – вищий ККД, можливість реалізації великих моментів при помірних габаритах;

- планетарні редуктори – використовуються для потужних мішалок у великих ферментерах, коли потрібні великі крутні моменти.

Часто застосовують частотні перетворювачі для плавного пуску, регулювання швидкості обертання та організації режиму періодичного перемішування.

Ущільнення виведених валів у зоні стінки реактора працюють у корозійно-активному, абразивному середовищі. Використовують такі ущільнення: манжетні ущільнення з еластомерів, стійких до лугів та органічних кислот; подвійні торцеві ущільнення із проміжною змазкою або промиванням; лабіринтні ущільнення у комбінації зі змазуванням.

Опори вала розташовують у сухих нішах, що дозволяє підвищити довговічність підшипників.

1.3.5 Типи потоків у шнековому перемішувачі

У шнекових мішалках формуються:

1. Осьові потоки – спрямований рух уздовж осі шнека (вгору або вниз залежно від напрямку навивки).
2. Радіальні потоки – витіснення субстрату від шнека до стінок реактора.
3. Тангенціальні потоки – обертальний рух навколо осі, що сприяє руйнуванню агломератів та плаваючої кірки.

Комбінація цих потоків забезпечує псевдоповне змішування навіть у високо концентрованих середовищах.

1.3.6 Рекомендації по вибору геометричних параметрів шнека та кінематики роботи

Основні орієнтовні співвідношення, що застосовують при проектуванні:

- діаметр шнека D залежить від діаметра реактора D_p [26, 27, 30]

$$D \approx (0,3 \dots 0,5) \cdot D_p.$$

- крок гвинтової стрічки S

$$S \approx (0,8 \dots 1,2) \cdot D.$$

- довжина шнека L обирається відповідно до висоти робочого шару або довжини каналу.

У реакторах із високою сухою речовиною доцільно застосовувати змінний крок: у зоні завантаження – менший (інтенсивніше захоплення), у зоні вивантаження – більший.

Для більшості промислових біогазових установок застосовують:

- періодичне перемішування – 5...15 хв роботи через 30...120 хв простою;

– комбіноване перемішування – чергування різних швидкостей: низька для підтримання однорідності, підвищена – для руйнування кірки;

– безперервне – у спеціалізованих реакторах (plug-flow), де шнек виконує також функцію транспортування.

В таблиці 1.2 надано рекомендації по вибору геометричних параметрів шнекового механізму; кінематичних та енергетичних параметрів.

Таблиця 1.2 – Орієнтовні діапазони параметрів для шнекових мішалок

Параметр	Типове значення/діапазон
Діаметр шнека, м	0,3...1,2
Довжина робочої частини, м	2...10
Швидкість обертання, об/хв	5...30
Потужність приводу, кВт	5...45
Рекомендований вміст СР, %	до 15...18
Режим роботи	періодичний або безперервний

1.3.7 Переваги та недоліки шнекових перемішувачів

Переваги та недоліки шнекових перемішувачів наведені в табл. 1.3 та 1.4.

Таблиця 1.3 – Переваги шнекових перемішувачів

Перевага	Пояснення
Робота з густими та неоднорідними субстратами	Забезпечують змішування при високому вмісті сухих речовин
Руйнування плаваючої кірки	Механічний зсув і подрібнення кірки по всій площі
Зменшення «мертвих зон»	Формують осьові й радіальні потоки, які охоплюють весь об'єм
Можливість транспортної функції	У горизонтальних ферментерах шнек може перемішувати субстрат уздовж осі
Гнучкість налаштувань	Зміна кроку, кута атаки, довжини, швидкості, режимів роботи

Таблиця 1.4 – Недоліки шнекових перемішувачів

Недолік	Наслідки та обмеження
Складніша конструкція	Вища вартість виготовлення та монтажу
Підвищені вимоги до якості матеріалів	Потрібні корозійностійкі сталі, які є дорогими
Схильність до заклинювання сторонніми предметами	Необхідність попереднього очищення субстрату від крупних включень
Складність обслуговування в закритих реакторах	Потрібне продумане розташування люків та сервісних ніш

1.4 Загальні рекомендації по вибору схеми БГУ та механізмів, які забезпечують її роботу

CSTR є основною технологією для аграрного сектору завдяки універсальності й стабільності процесів, установки забезпечують потужності 100...1000 кВт, працюють на гної та силосі. Схеми сухого зброджування стають незамінними при роботі з підстилковими субстратами. Технологічні схеми UASB/EGSB – основний вибір для висококонцентрованих стоків. Багатоступеневі установки забезпечують максимальну ефективність, генерують потужності 5...30 МВт, потребують десятків постачальників сировини, але потребують значних капіталовкладень і високого рівня інженерної підтримки та складної логістики [36, 37].

Оптимальна схема визначається сукупністю технологічних, економічних та кліматичних факторів.

Лопатеві перемішувачі посідають важливе місце в системах змішування біогазових установок, особливо при роботі з густими, неоднорідними субстратами, характерними для сільськогосподарських відходів. Їхні ключові переваги: здатність забезпечувати інтенсивне, але біологічно «делікатне» перемішування; можливість роботи при високій сухій речовині та наявності волокнистих домішок; гнучкість щодо геометричної компоновки ферментера; прийнятний рівень енергоспоживання при правильно підібраних параметрах.

За рахунок розвитку конструкцій, застосування CFD-аналізу та інтелектуальних систем керування лопатеві мішалки залишаються перспективним напрямом удосконалення біогазових технологій, забезпечуючи стабільний вихід біогазу та довговічність обладнання.

Шнекові перемішувачі є ефективним рішенням для біогазових установок, що працюють із високо в'язкими та неоднорідними субстратами, забезпечуючи повнооб'ємне перемішування, руйнування кірки та зменшення «мертвих» зон.

Конструктивна гнучкість (можливість змінювати геометрію, крок, довжину, кут нахилу) дозволяє адаптувати шнекові мішалки до різних типів реакторів – вертикальних, горизонтальних та комбінованих.

Попри відносну конструктивну складність та підвищені вимоги до матеріалів, шнекові системи забезпечують стабільну роботу процесу зброджування, підвищують вихід біогазу та знижують ризики аварійних ситуацій, пов'язаних із закисанням субстрату або утворенням плаваючих кірок.

При проектуванні й виборі шнекових перемішувачів слід враховувати реологічні властивості сировини, геометрію реактора, вимоги до енергоефективності та можливості обслуговування обладнання.

Таблиця 1.5 – Порівняльні характеристики систем перемішування в біогазових установках

Показник	Лопатеві	Шнекові перемішувачі
Робота при високій сухій речовині	Обмежена	Висока ефективність
Схильність до утворення «мертвих» зон	Значна	Мінімальна
Можливість руйнування кірки	Середня	Висока
Енерговитрати при однаковому об'ємі	Середні	Середні/нижче середніх
Складність конструкції	Невелика	Вища, але технологічно реалізована
Придатність до густих субстратів	Обмежена	Дуже добра

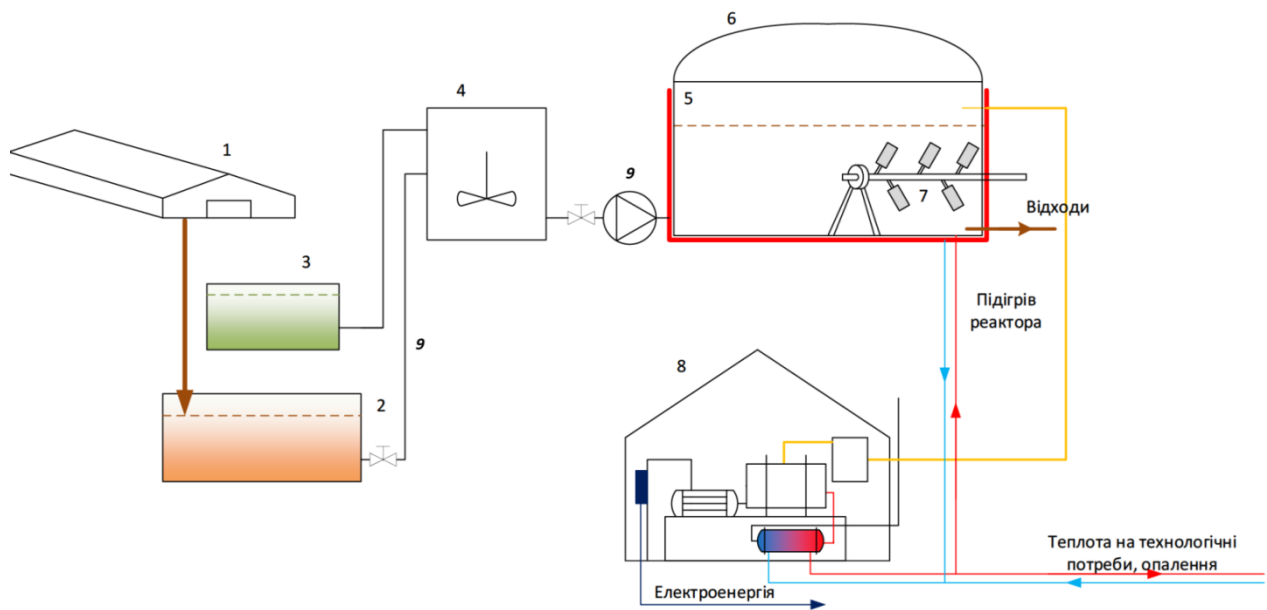
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ, КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Вибір технологічної схеми установки виробництва біогазу

Для виробництва біогазу необхідне створення комплексу інженерно-технічних споруд, до складу якого входять: ємності та агрегати, призначені для накопичення й підготовки вихідної сировини; біогазовий реактор, у якому безпосередньо здійснюється процес біогазоутворення; система збирання та очищення біогазу, а також обладнання для відокремлення побічних продуктів переробки, що можуть бути використані для одержання високоякісних мінеральних добрив. Виробництво електричної енергії на біогазовій установці може поєднуватися з використанням газотурбінного генератора або шляхом встановлення когенераційної установки, яка додатково забезпечує отримання теплової енергії. Для подальших розрахунків прийнято технологічну схему виробництва біогазу, наведено на рис. 2.1 [21, 36, 37].

До основних структурних складових цієї технологічної схеми біогазової установки належать:

- система збору та попередньої підготовки сировини;
- система транспортування сировини в межах установки;
- біореактор (метантанк), оснащений системою перемішування;
- система підігріву біореактора;
- система відведення та очищення біогазу;
- накопичувальні ємності для зброженої маси та біогазу;
- енергетичні установки для виробництва електричної і теплової енергії;
- система програмного керування та автоматизації технологічних процесів.



- 1 – фермерське господарство; 2 – приймальна ємність для гною;
 3 – приймальний резервуар коферменту; 4 – резервуар гомогенізації, обладнаний мішалкою;
 5 – біореактор; 6 – газгольдер; 7 – пристрій перемішування біореактора;
 8 – когенераційний модуль; 9 – шнековий насос подачі гною

Рисунок 2.1 – Схематичне зображення типового процесу виробництва біогазу

Технологічні схеми біогазових установок можуть суттєво відрізнятися залежно від виду й кількості перероблюваних субстратів, характеристик кінцевих продуктів та інших факторів. У даній роботі обрано найбільш розповсюджену технологію з одноступеневим зброджуванням різних типів субстратів, одним із яких є гній.

Інтенсифікація процесу анаеробного зброджування в одноступеневому метантанку досягається завдяки:

- впровадженню систем безперервного перемішування;
- організації постійного завантаження органічних відходів;
- підтриманню стабільного температурного режиму та підігріванню субстрату.

2.2 Розрахунок технологічних та геометричних параметрів метантанка

Для зручності обслуговування метантанки (реактори) конструюють циліндричної форми, використовуючи рекомендації [1, 4, 36]

$$K = \frac{H}{D} = 0,9 \dots 1,3, \quad (2.1)$$

де H – висота метантанку;

D – внутрішній діаметр метантанка.

Відповідно об'єм реактора дорівнює

$$V_{MT} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot k \cdot D = \frac{\pi \cdot k \cdot D^3}{4}, \quad (2.2)$$

звідки

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{MT}}{k \cdot \pi}} \quad (2.3)$$

Будуємо графік залежності внутрішнього діаметра метантанка від прийнятого об'єму, якщо $k = 1,2$ (рис.2.2).

Отриманий графік дозволяє вибрати геометрію метантанка залежно від об'єму технологічної сировини.

Тривалість зброджування відходів (гною) сільськогосподарських тварин залежить від їх виду (табл. 2.1). В більшості випадків технологічною сировиною БГУ для малих і середніх фермерських господарств є гній ВРХ та свиней, їх активний час бродіння t_B (виділення біогазу) складає 10...15 днів.

Це означає, що кожного дня (добы) частка об'єму метантанку $\frac{V_{MT}}{t_B}$, буде відпрацьована, випаде в осадок, і цей об'єм необхідно поповнити свіжою сировиною.

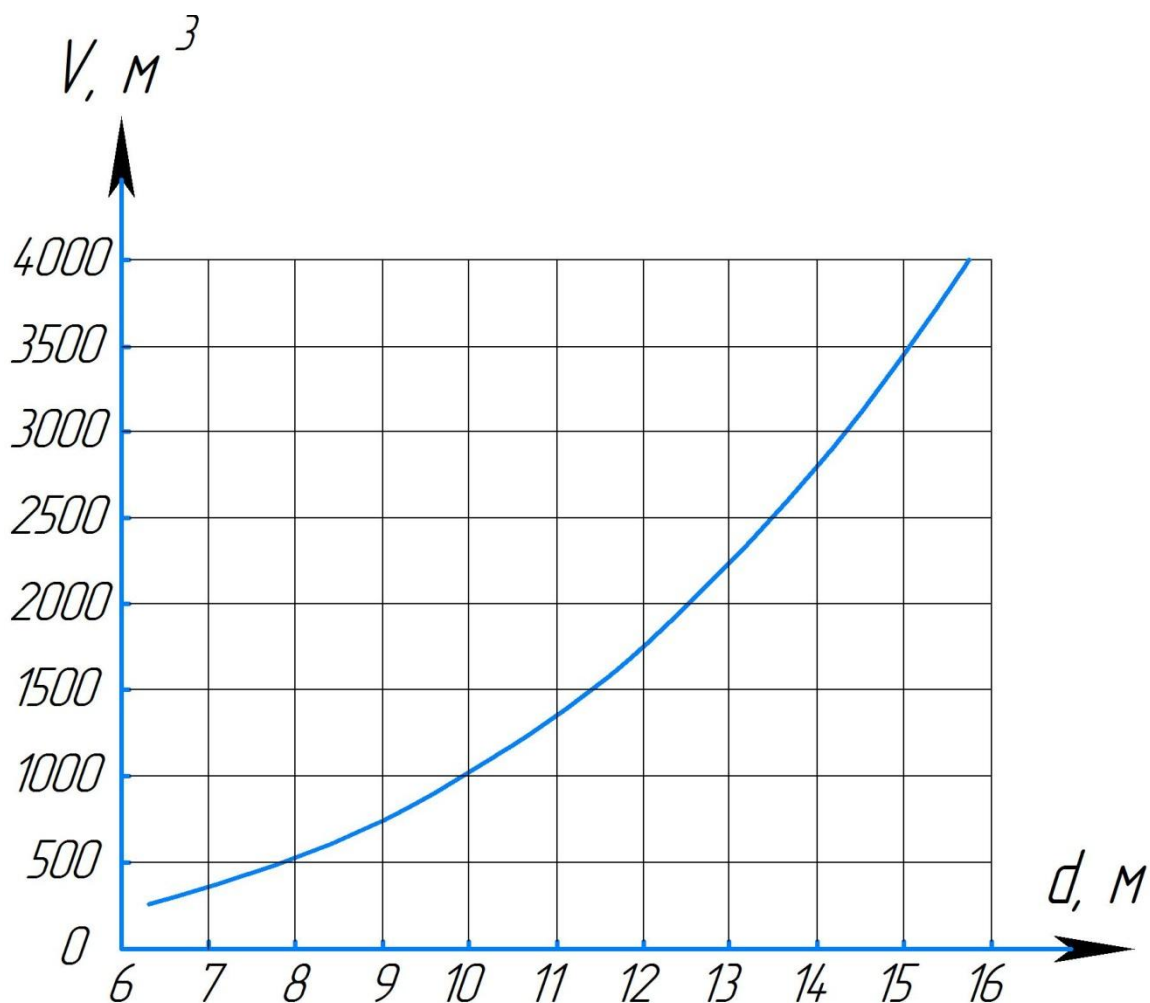


Рисунок 2.2 – Залежність внутрішнього діаметра метантанка від прийнятого об'єму

Таблиця 2.1 – Залежність ступеня розкладання біомаси від завантаження реактора та тривалості зброджування

Відходи	Тривалість зброджування τ_B , діб	Ступінь розкладання, n_t , %
Велика рогата худоба	15	40
Свині	10	50
Кури	50	55

Таким чином в метантанку постійно повинна знаходитися технологічна сировина, біомаса, об'ємом

$$V_{MT} = 1,1 \dots 1,3 (V_K + V_C) \cdot t_B, \quad (2.4)$$

де V_K – об'єм гною біомаси ВРХ, м³;

V_C – об’єм свинячого гною біомаси, м³.

Об’єм гною біомаси ВРХ та свинячого гною біомаси, м³, знаходять за формулами [9, 11, 21]:

$$V_K = \frac{m_{БМ.К} \cdot n_K}{\rho_{БМ}}; \quad V_C = \frac{m_{БМ.С} \cdot n_C}{\rho_{БМ}}; \quad (2.5)$$

де n_K – кількість голів ВРХ, шт.;

n_C – кількість свиней, шт.;

$m_{БМ.К}$ – добовий вихід екскрементів від однієї ВРХ, кг (див. табл. 2.1);

$m_{БМ.С}$ – добовий вихід екскрементів від однієї свині, кг (див. табл. 2.1);

$\rho_{БМ}$ – густина біомаси, $\rho_{БМ} \approx 1020$ кг/м³.

Таким чином

$$V_{MT} = (1,1 \dots 1,3) \cdot \frac{m_{БМ.К} \cdot n_K + m_{БМ.С} \cdot n_C}{\rho_{БМ}} \cdot t_B. \quad (2.6)$$

Для раціонального використання вибраної за об’ємом БГУ, необхідно визначити поголів’я тварин, які забезпечують метантанк сировиною. Для цього необхідно забезпечити рівність

$$m_{БМ.К} \cdot n_K + m_{БМ.С} \cdot n_C = \frac{V_{MT} \cdot \rho_{БМ}}{(1,1 \dots 1,3) \cdot t_B}. \quad (2.7)$$

Якщо поголів’я ВРХ регламентоване, то поголів’я свиней рекомендовано утримувати в кількості

$$n_C = \left(\frac{V_{MT} \cdot \rho_{БМ}}{(1,1 \dots 1,3) \cdot t_B} - m_{БМ.К} \cdot n_K \right) \div m_{БМ.С}. \quad (2.8)$$

У випадках, коли фермерське господарство утримує тільки один вид тварин то у формулах 2.4-2.8 це необхідно врахувати (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Добовий вихід гною (посліду)
сільськогосподарських тварин і птахів

Тварини, птахи	Маса, кг
Корови	35...55
Молодняк ВРХ	
до 6 міс.	7,5...15
6...12 міс.	14...26
12...18 міс.	27
більше 18 міс.	35
Свині масою, кг:	
до 40	3...3,5
40...80	4,5...5
більше 80	6...6,5
Кури:	
яєчного напрямку	0,17...0,2
м'ясного напрямку	0,27...0,3

2.3 Геометричний та технологічний розрахунки гомогенізатора

Для забезпечення інтенсивного перебігу анаеробного зброджування в об'ємі біореактора, окрім дотримання оптимального температурного режиму, необхідно сформувати однорідне середовище, у якому метаноутворюючі мікроорганізми можуть вільно поширюватися в усіх напрямках. Таким чином, на ефективність метанового бродіння органічної маси істотно впливає наявність перемішування та ступінь його інтенсивності. Застосування гомогенізаторів, в яких проходить підготовка біосировини перед подачею у реактор, дає змогу [8]:

- підтримувати рівномірний розподіл завантаженого субстрату та постійний контакт його з мікроорганізмами, що забезпечує максимально повне використання свіжих поживних речовин;

- утримувати концентрацію продуктів розкладу на низькому рівні завдяки їх рівномірному розподілу по всьому об'єму;

– забезпечувати однорідність середовища як за температурою, так і за вмістом поживних компонентів, створюючи оптимальні умови для життєдіяльності бактерій;

– зменшувати локальні зони з підвищеною концентрацією інгібуючих речовин, обмежуючи їх негативний вплив на процес метаногенезу;

– запобігати утворенню поверхневої кірки або сприяти її руйнуванню, а також не допускати накопичення щільного нерухомого осаду на дні біореактора;

– скорочувати кількість зон у реакторі, в яких можуть затримуватися нерухомі нерозкладені частинки та відпрацьована рідина.

Основне призначення попереднього перемішування в гомогенізаторі полягає у забезпеченні гомогенізації субстрату в біореакторі та інтенсифікації десорбції біогазу.

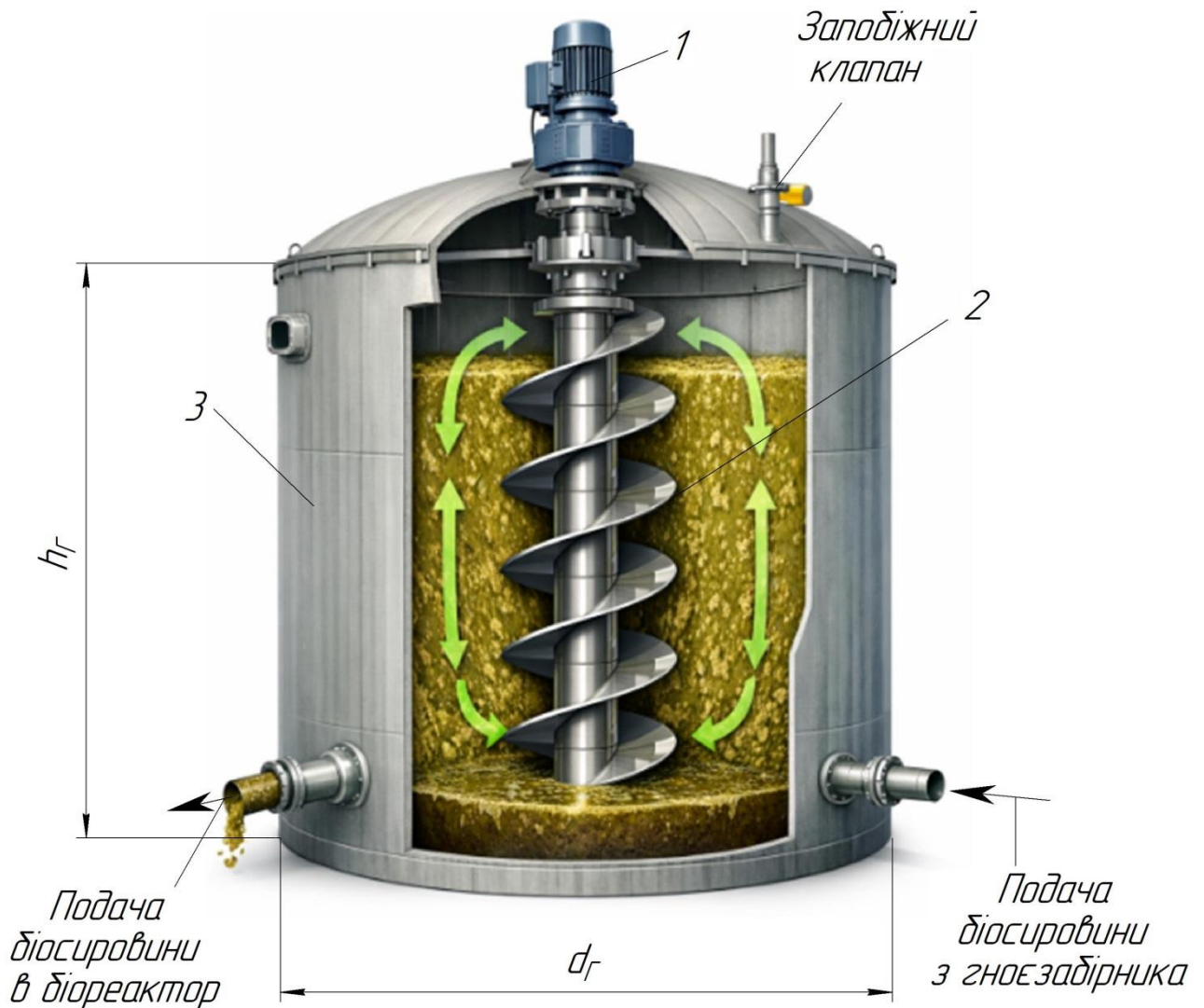
Мікроорганізми, що беруть участь у метановому зброджуванні, чутливі до короткочасних змін тиску середовища, які виникають у процесі перемішування субстрату. За надмірної швидкості відносного руху шарів біомаси можливе руйнування клітинних оболонок мікроорганізмів, тому перемішувальні пристрої повинні забезпечувати швидкість руху субстрату не більше 0,5 м/с. За вмісту сухої речовини у рідкому гної на рівні 5...10 % механічні мішалки доцільно застосовувати лише в реакторах об'ємом до 100 м³. За більших об'ємів зростає питома енергоємність приводу та знижується ефективність процесу перемішування.

Отже, для запропонованого гомогенізатора об'ємом біля 20 м³ приймаємо шнекову мішалку механічного типу. Враховуючи, що гранична швидкість перемішування становить 0,5 м/с, задаємо робочу частоту обертання мішального органа, виходячи з допустимого режиму перемішування. За відомого діаметра резервуара, та з урахуванням технологічного зазору між зовнішнім діаметром шнека мішалки і стінкою ємності, визначаємо його зовнішній діаметр.

Двічі на добу біореактор поповнюється гноєм. Необхідний об'єм ємності гомогенізатора становить [1, 4]

$$V_{\Gamma} = 1,3 \cdot \frac{V_K + V_C}{2}, \quad (2.9)$$

Приймаємо циліндричний гомогенізатор з шнековим змішувачем рис 2.3.



1 – привід механізму мішалки; 2 – шнек; 3 – корпус гомогенізатора

Рисунок 2.3 – Технологічна схема гомогенізатора

Визначаємо геометричні параметри гомогенізатора

$$V_{\Gamma} = \frac{4d_r^2}{4} \cdot h_{\Gamma} = \frac{1,5 \cdot \pi \cdot d_{\Gamma}^3}{4}, \quad (2.10)$$

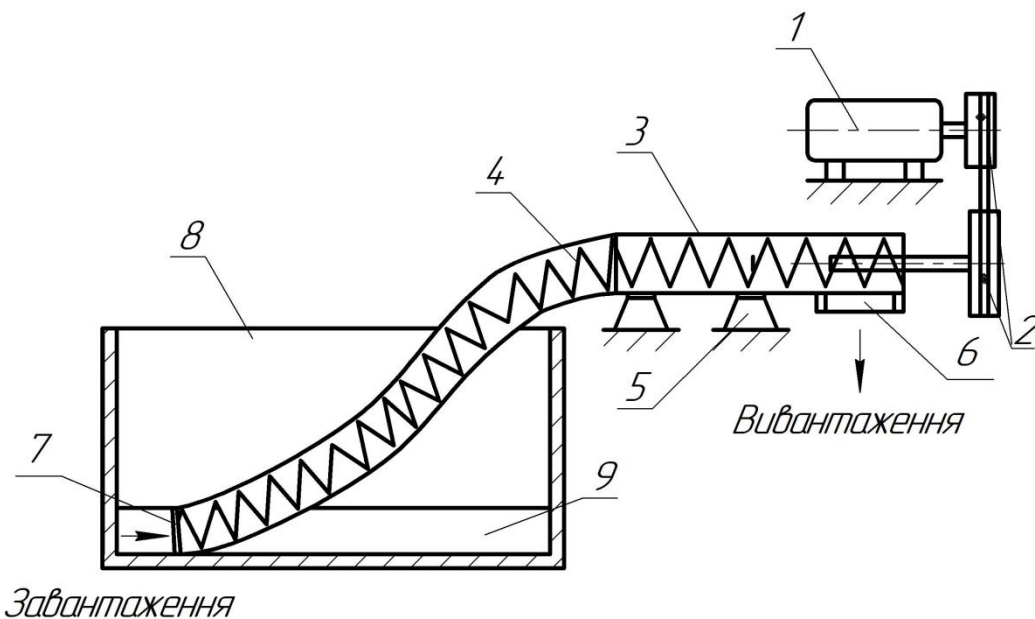
Звідки

$$d_{\Gamma} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\Gamma}}{1,5 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{1,3 \cdot (V_K + V_C)}{3 \cdot \pi}},$$

де $h_{\Gamma} = k \cdot d_{\Gamma}$, приймаємо $k = 1,5$.

2.4 Вибір механізму по відкачуванню гною із гомогенізатора до біореактора

Для подачі екскрементів від гомогенізатора до біореактора використовується гнучкий шнековий транспортер (рис. 2.4) [3, 5].



- 1 – електродвигун; 2 – пасова передача; 3 – кожух шнека; 4 – гнучкий шнек;
5 – опора; 6 – вивантажувальний патрубок; 7 – завантажувальний патрубок;
8 – гноєзбірник; 9 – траншея гноєзбірника.

Рисунок 2.4 – Схематичне зображення процесу транспортування біомаси до біореактора

Геометричний параметр кожуха гнучкого шнека приймаємо з конструктивних міркувань рівним $D=100$ мм. На основі цього будемо графік залежності продуктивності механізму від частоти його обертання (рис. 2.5).

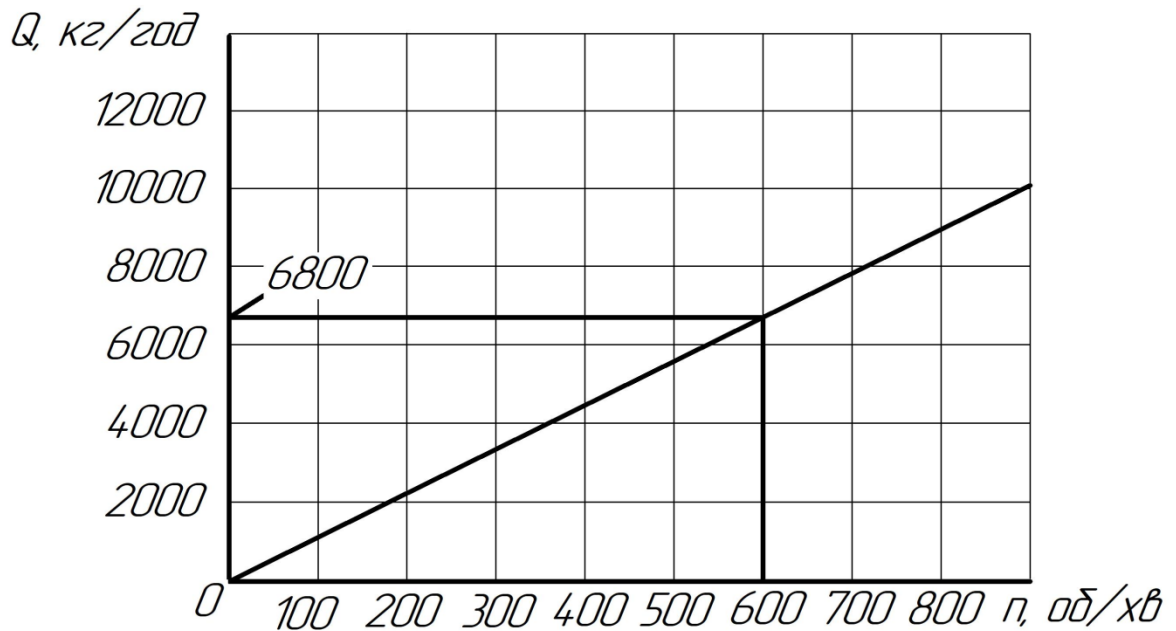


Рисунок 2.5 – Залежність продуктивності гнучкого шнекового транспортера від частоти обертання гвинта

За даними графіка 2.5 приймаємо частоту обертання вала шнека $n=600$ об/хв, що забезпечує продуктивність транспортного механізму $Q_T=6,8$ т/год Далі визначаємо тривалість роботи шнекового транспортера, необхідну для переміщення гноєсуміші з гноєзбірника

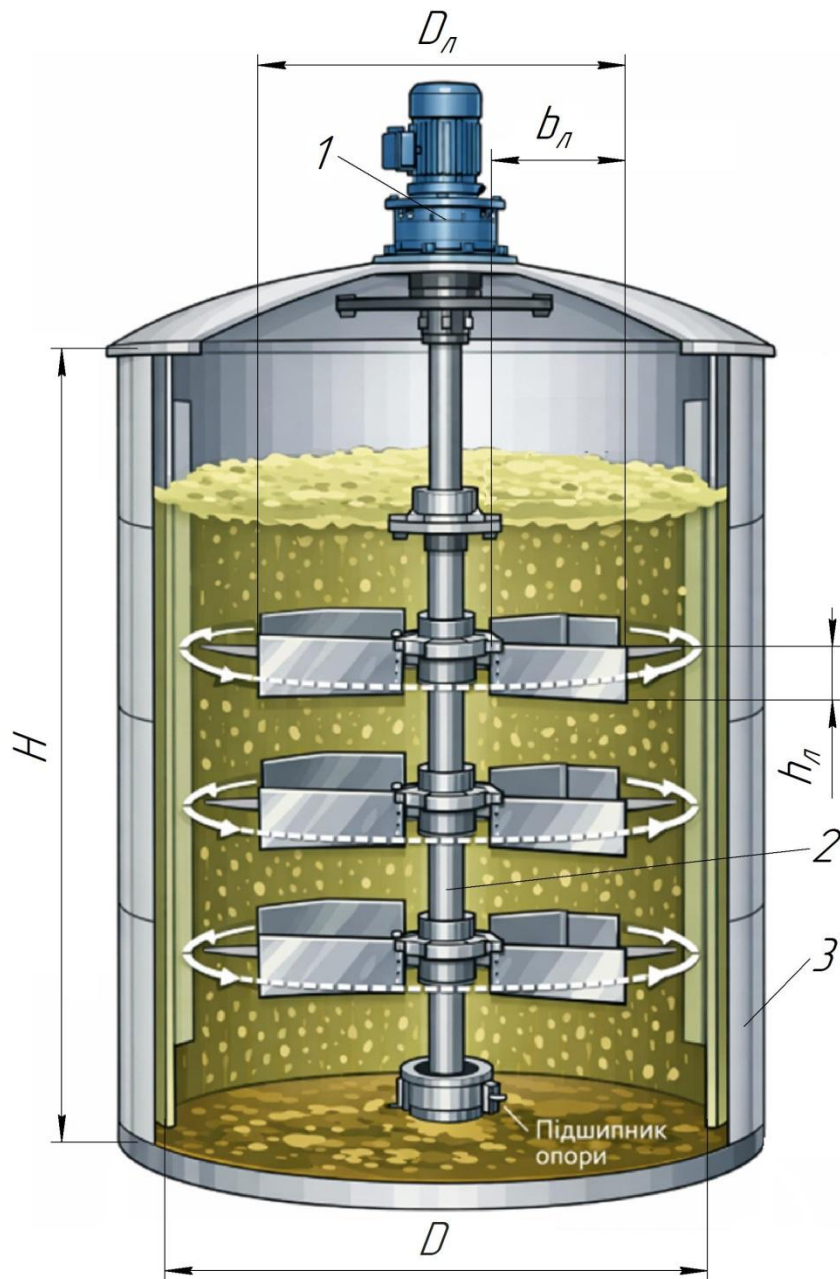
$$t_{III} = \frac{G_T}{Q_T}. \quad (2.11)$$

Підставивши дані, одержимо

$$t_{III} = \frac{19,552}{6,8} = 2,87 \text{ год.}$$

2.5 Вибір типу мішалки біореактора

Для оптимального процесу бродіння для проєктованого біореактора приймаємо лопатевий перемішувач (рис 2.6).



1 – двигун-редуктор; 2 – лопатева мішалка; 3 – біореактор

Рисунок 2.6 – Технологічна схема біореактора з лопатевим перемішувачем

Запропонована лопатева мішалка передбачає центральний вал, три яруса лопатей. На кожному ярусі розміщені 2-і протилежні лопаті (разом 6 лопатей). Така конфігурація дозволяє рівномірне перемішування біоматеріалу по об'єму реактора. Основні геометричні співвідношення [8, 36, 37].

Діаметр лопатей мішалок, визначають за формулою

$$d_{л} = (0,6...0,8)D. \quad (2.12)$$

Радіальний зазор до стінок реактора знаходять

$$\delta = \frac{D - d_{л}}{2}. \quad (2.13)$$

Ширина та висота лопаті становить

$$b_{л} = 0,15...0,25d_{л}; \quad (2.14)$$

$$h_{л} = 0,10...0,20d_{л}. \quad (2.15)$$

Типово нижній ярус лопатей розміщують на висоті 0,6...1,0 м від днища реактора. Крок по висоті становить 2,0...2,8 м.

2.6 Наближений розрахунок отримання біогазу

Екскременти, які надходять з тваринницьких ферм мають високу вологість, $\varphi_{БМ} = 50...90$ %. Визначаємо масу сухої речовини, що входить до складу гною за добу [9, 11, 21, 24]

$$m_{CP} = m_{БМ.К} \cdot \left(1 - \frac{\varphi_{БМ.К}}{100}\right) + m_{БМ.С} \cdot \left(1 - \frac{\varphi_{БМ.С}}{100}\right), \quad (2.16)$$

де $\varphi_{БМ.К}$, $\varphi_{БМ.С}$ – вологість біомаси, приймаємо $\varphi_{БМ.К} = 65$ %, $\varphi_{БМ.С} = 85$ %.

Отже,

$$m_{CP} = m_{БМ.К} \cdot \left(1 - \frac{65}{100}\right) + m_{БМ.С} \cdot \left(1 - \frac{85}{100}\right) = 0,35 \cdot m_{БМ.К} + 0,15 \cdot m_{БМ.С}.$$

Частка органічної речовини в сухій речовині, яка генерує метанове виділення становить $\rho_{COP} = 0,75 \dots 0,85$. Таким чином, маса сухої органічної речовини придатна до виділення метану дорівнює

$$m_{COP} = m_{CP} \cdot \rho_{COP} = (0,35 \cdot m_{БМ.К} + 0,15 \cdot m_{БМ.С}) \cdot \rho_{COP}, \quad (2.17)$$

де ρ_{COP} – частка органічної речовини в сухій речовині, приймаємо $\rho_{COP} = 0,80$.

За добу отримуємо масу сухої органічної речовини, яка становить

$$m_{COP} = (0,35 \cdot m_{БМ.К} + 0,15 \cdot m_{БМ.С}) \cdot 0,80 = 0,28 \cdot m_{БМ.К} + 0,12 \cdot m_{БМ.С}$$

Об'єм біогазу при остаточному розкладі сухої речовини за добу складає

$$V_{ПОВ} = m_{COP.К} \cdot n_K + m_{COP.С} \cdot n_C, \quad (2.18)$$

де n_K – вихід біогазу з 1 кг сухої органічної речовини для корів, $n_K = 0,2$ м³/кг;

n_C – вихід біогазу з 1 кг сухої органічної речовини для свиней,

$$n_C = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

За повний цикл розкладу технологічної сировини за добу отримуємо об'єм газу

$$V_{ПОВ} = 0,28 \cdot m_{БМ.К} \cdot n_K + 0,12 \cdot m_{БМ.С} \cdot n_C = 0,28 \cdot 0,2 \cdot m_{БМ.К} + 0,12 \cdot 0,3 \cdot m_{БМ.С} = 0,056 \cdot m_{БМ.К} + 0,045 \cdot m_{БМ.С}.$$

Визначаємо об'єм біогазу, який реально отримуємо при рекомендованому періоді бродіння сировини за добу

$$V_B = V_{ПОВ.К} \cdot \frac{n_{тК}}{100} + V_{ПОВ.С} \cdot \frac{n_{тС}}{100}, \quad (2.19)$$

де $V_{ПОВ.К}$, $V_{ПОВ.С}$ – об'єм біогазу при повному розкладі гною корів та свиней;

$n_{тК}$ – частка виходу біогазу при розкладі гною корів за вибраним періодом, $n_{тК} = 40\%$ (див. табл. 2.1);

$n_{тС}$ – частка виходу біогазу при розкладі гною свиней за вибраним періодом, $n_{тС} = 50\%$ (див. табл. 2.1);

Отже, за добу, м³/добу, отримаємо

$$V_B = 0,056 \cdot m_{БМ.К} \cdot \frac{40}{100} + 0,045 \cdot m_{БМ.С} \cdot \frac{50}{100} = (22,4 \cdot m_{БМ.К} + 22,5 \cdot m_{БМ.С}) \cdot 10^3.$$

Біогазова установка за місяць, м³/місяць, і за рік згенерує таку кількість газу

$$\begin{aligned} V_{Б.М} &= 30 \cdot V_B = 30 \cdot (22,4 \cdot m_{БМ.К} + 22,5 \cdot m_{БМ.С}) \cdot 10^3 = \\ &= (67,2 \cdot m_{БМ.К} + 67,5 \cdot m_{БМ.С}) \cdot 10^2; \end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned} V_{Б.Р} &= 12 \cdot V_{Б.М} = 12 \cdot (67,2 \cdot m_{БМ.К} + 67,5 \cdot m_{БМ.С}) \cdot 10^2 = \\ &= 8,064 \cdot m_{БМ.К} + 8,10 \cdot m_{БМ.С}. \end{aligned}$$

2.7 Енергетичний розрахунок

За добу при згорянні біогазу, отримаємо енергію [1, 8]

$$E_D = H_M \cdot f_M \cdot V_B, \tag{2.21}$$

де H_M – питома енергія, яка виділяє метан при згорянні, $H_M = 28$ МДж/м³;

f_M – частка метану в газі, отриманого в результаті бродіння гною ВРХ і свиней, $f_M = 0,6$.

Отримана енергія за добу, МДж/добу, складає

$$\begin{aligned} E_D &= (22,4 \cdot m_{БМ.К} + 22,5 \cdot m_{БМ.С}) \cdot 10^3 \cdot 28 \cdot 0,6 = \\ &= 0,376 \cdot m_{БМ.К} + 0,378 \cdot m_{БМ.С} \end{aligned}$$

За рік БГУ, МДж/рік, згенерує обладнання

$$E_P = 365 \cdot E_D, \quad (2.22)$$

Підставивши дані, одержимо

$$E_P = 365 \cdot (0,376 \cdot m_{БМ.К} + 0,378 \cdot m_{БМ.С}) = 137,2 \cdot m_{БМ.К} + 138,0 \cdot m_{БМ.С}.$$

3 ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Розрахунки біосировини тваринницької ферми та геометричних параметрів БГУ

Біогазову установку проектуємо на базі тваринницької ферми, на якій утримується 200 голів ВРХ. Використовуючи залежності 2.5-2.6 визначаємо об'єм біомаси, якщо $m_{БМ.К} = 55$ кг (див. табл. 2.2), $t_B = 15$ діб (див. табл. 2.1) [1, 21]

$$V_K = \frac{55 \cdot 200}{1020} = 10,8 \text{ м}^2.$$

Об'єм метантанку

$$V_{МК} = 1,2 \cdot 10,8 \cdot 15 = 194,4 \text{ м}^3,$$

приймаємо $V_{МК} = 200 \text{ м}^3$.

Діаметр та висота біореактора (ф-ла 2.3) становить

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 200}{1,2 \cdot \pi}} = 5,96 \text{ м},$$

приймаємо $D = 6,0$ м, тоді

$$H = 1,2 \cdot 6 = 7,2 \text{ м}.$$

3.2 Геометричний, кінематичний та енергетичний розрахунок гомогенізатора

Призначення гомогенізації субстрату – це вирівнювання концентрації руйнування «згустків» підтримка суспензії, підготовка до подачі до реактора насосом. Прийнята схема гомогенізатора показана на рисунку 3.1 Об'єм ємності гомогенізатора (рис. 2.9) становить (ф-ла 2.9) [8, 29, 31]

$$V_r = \frac{1,3 \cdot 10,8}{2} = 7,02 \text{ м}^3.$$

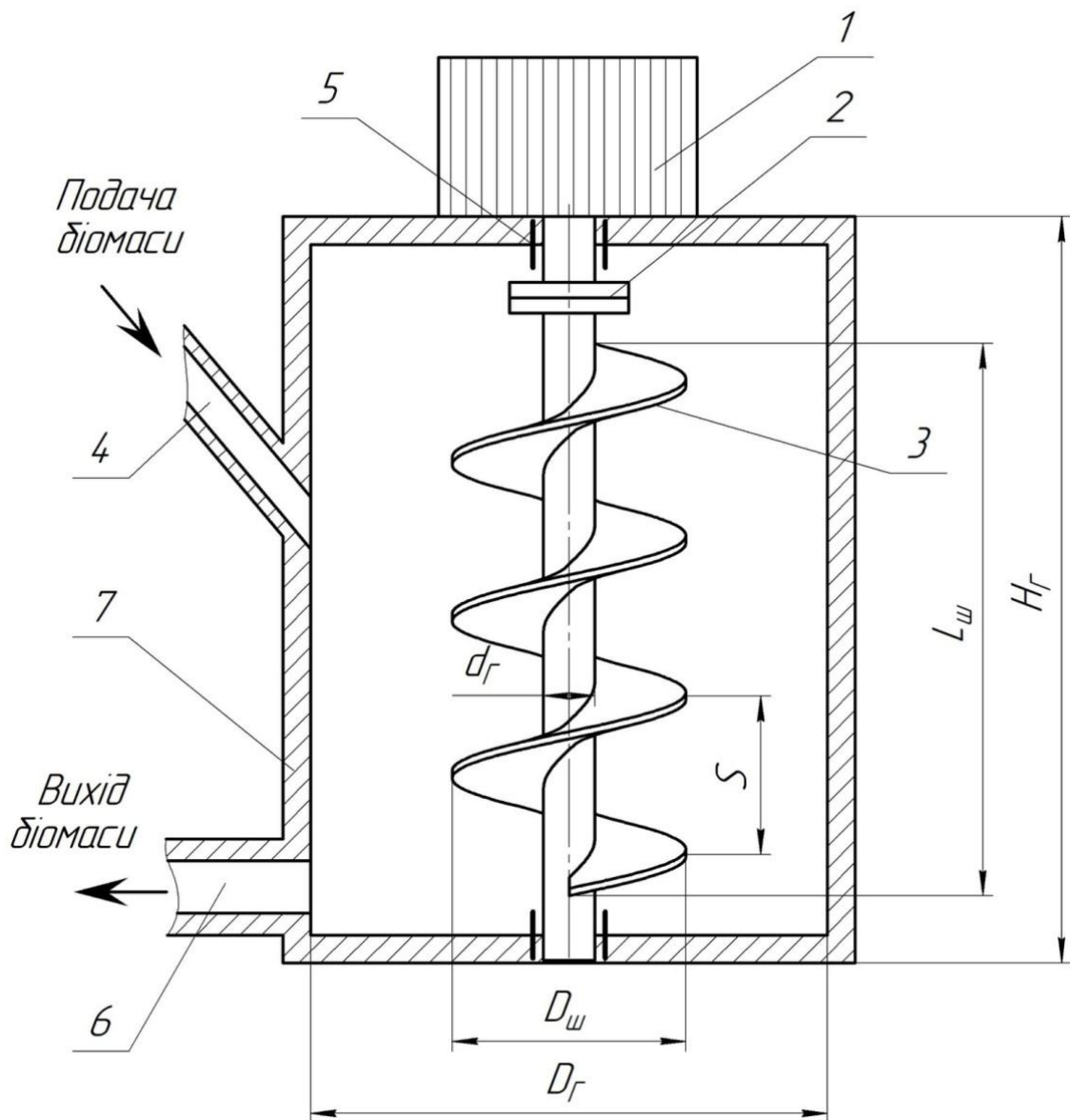


Рисунок 3.1 – Схема гомогенізатора

Приймаємо мішалку циліндричної ємності з внутрішнім вертикальним коротким шнеком. Для малої ємності зручніша така конструкція, оскільки краще «підбирає» осад знизу. Визначаємо геометрію бака гомогенізації

$$V_{\Gamma} = \frac{\pi \cdot D_{\Gamma}^2}{4} \cdot H_{\Gamma}, \quad (3.1)$$

де H_{Γ} – висота гомогенізатора, $H_{\Gamma} = (1,5 \dots 2) \cdot D_{\Gamma}$.

Приймаємо $H_{\Gamma} = 2 \cdot D_{\Gamma}$.

Тоді

$$V_{\Gamma} = \frac{\pi \cdot D_{\Gamma}^3}{2},$$

звідки

$$D_{\Gamma} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 7,02}{\pi}} = 1,65 \text{ м},$$

$$H_{\Gamma} = 2 \cdot 1,65 = 3,3 \text{ м}.$$

Геометричний розрахунок шнека

Діаметр шнека для перемішування біомаси в гомогенізаторі становить [20, 26, 30]

$$D_{\text{ш}} = (0,3 \dots 0,45) \cdot D_{\Gamma}, \quad (3.2)$$

приймаємо $D_{\text{ш}} = 0,40 \cdot 1,65 = 0,66 \text{ м}$.

Для ефективної гомогенізації, а саме: стабільного осьового переносу плюс перемішування рекомендують крок шнека із залежності

$$S = (0,6 \dots 1,0) \cdot D_{\text{ш}}. \quad (3.3)$$

Приймаємо, $S = 0,8 \cdot D_{\text{ш}} = 0,8 \cdot 1,66 = 0,528 \text{ м}$.

Довжину робочої частини шнека приймаємо $L_{\text{ш}} = 3,0 \text{ м}$.

Енергетичний розрахунок

Для гомогенізації у малих об'ємах питома потужність зазвичай вища, ніж у великих реакторах, бо треба швидше досягати рівномірності та боротися з осадам, тому рекомендована питома потужність для малооб'ємних гомогенізаторів становить $P_{\Gamma} = 30 \dots 80 \text{ Вт/м}^3$.

Приймаємо розрахункове значення потужності рівне $P_{\Gamma} = 70 \text{ Вт/м}^3$.

Таким чином потужність на валу шнекової мішалки, без запасу визначають за формулою [1, 8, 34]

$$P_{Ш} = \frac{P_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}}, \quad (3.4)$$

де η_{Γ} – коефіцієнт корисної дії приводу, приймаємо $\eta_{\Gamma} = 0,85$.

Підставивши дані, отримаємо

$$P_{Ш} = \frac{70 \cdot 7,02}{0,85} = 578 \text{ Вт.}$$

Приймаємо потужність з запасом за формулою

$$P_{\Gamma} = k_{Ш} \cdot P_{Ш}, \quad (3.5)$$

де $k_{Ш}$ – коефіцієнт запасу, який враховує пікові навантаження, $k_{Ш} = 1,5 \dots 2,0$,
приймаємо $k_{Ш} = 1,8$.

Таким чином

$$P_{\Gamma} = 1,8 \cdot 578 = 1040 \text{ Вт.}$$

Вибираємо двигун зі стандартного ряду – раціонально прийняти двигун потужності 1,1 кВт [1].

Для гомогенізації, без надмірного піноутворення, рекомендовану частоту обертання вала мішалки приймають в межах $n = 60 \dots 120 \text{ об/хв.}$, прийmemo $n = 90 \text{ об/хв.}$

Кутову швидкість, визначають за формулою

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}. \quad (3.6)$$

Підставивши дані, одержимо

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{90}{60} = 9,42 \text{ рад/с.}$$

Момент на валу шнекової мішалки визначають за формулою

$$M_{\Gamma} = \frac{P_{\Gamma}}{\omega}. \quad (3.7)$$

Одержимо

$$M_{\Gamma} = \frac{1040}{9,42} = 110 \text{ Нм.}$$

Розрахунок вала на кручення

Діаметр вала визначають за формулою [4]

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_{\Gamma}}{[\tau]}}, \quad (3.8)$$

де $[\tau]$ – допустимі дотичні напруження матеріалу вала, враховуючи агресивне середовище, приймаємо $[\tau] = 30 \text{ МПа}$.

Підставивши дані, одержимо

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 110}{\pi \cdot 35 \cdot 10^6}} = 0,0265 \text{ м} = 26,5 \text{ мм.}$$

Враховуючи можливе згинання, намотування, конструктивно приймаємо $d_{\Gamma} = 35 \text{ мм}$.

Для малого змішувача товщина витка стрічки шнека визначається зносом і жорсткістю, рекомендують $t = 5 \dots 8 \text{ мм}$, приймаємо $t = 6 \text{ мм}$.

Ширину полиці визначають за формулою

$$b = \frac{D_{ш} - d_{Г}}{2}. \quad (3.9)$$

Підставивши дані, одержимо

$$b = \frac{660 - 35}{2} = 312,5 \text{ мм.}$$

Рекомендовано такі матеріали для вала та витків: нержавіюча сталь (краще) або конструкційна з покриттям; у зоні абразиву можливе наплавлення.

Підбір передаточного числа редуктора, узгодження швидкості

Для асинхронного двигуна з $n_{\partial}=1500$ об/хв., необхідно отримати $n=90$ об/хв. .

Якщо вибраний асинхронний двигун має частоту обертання валу – $n_{\partial}=1500$ об/хв., а частота обертання вала шнека – $n=90$ об/хв., тоді передаточне число редуктора становить

$$u = \frac{n_{\partial}}{n} = \frac{1500}{90} = 16,7.$$

Це передаточне число узгоджуємо з стандартним значенням редукторів вибраного типу.

3.3 Інженерні розрахунки гнучкого шнекового насоса для завантаження біореактора

Завантаження біореактора відбувається двічі на добу. Біосировина, яка проходить попередню обробку в гомогенізаторі, подається в реактор протягом

однієї години. Необхідно прорахувати кінематичні та геометричні параметри шнекового насоса для забезпечення даної продуктивності.

Відповідно до аналітичних досліджень в п. 2.3 визначаємо об'єм гомогенізатора

$$V_{\Gamma} = 1,3 \cdot \frac{10,8}{2} = 7,02 \text{ м}^3,$$

що становить вагу

$$Q_{\Gamma} = V_{\Gamma} \cdot \rho_{\text{БМ}}. \quad (3.10)$$

Підставивши дані, одержимо

$$Q_{\Gamma} = 7,02 \cdot 1020 = 7160 \text{ кг}.$$

Зміни продуктивності із зміною частоти обертання, залежать від фізико-механічних властивостей транспортуючої сировини та геометричних характеристик шнекового транспортера та визначається за формулою [20, 26, 29, 30, 34]

$$Q_0 = \frac{\psi \cdot \varphi_0 (1 + \sqrt{1 - \varphi_0}) \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \omega (T^2 + 0,5\pi \cdot \mu \cdot D \cdot T (1 + \sqrt{1 - \varphi_0}))}{16(T^2 + 0,25\pi^2 D^2 (2 + \varphi_0 - 2\sqrt{1 - \varphi_0}))}, \quad (3.11)$$

де D – зовнішній діаметр шнека, $D = D_J - z$;

D_J – діаметр труби (жолоба), в якому розміщений шнек;

z – зазор між зовнішньою кромкою шнека і трубою, $z = 0,02 D_J$;

μ – коефіцієнт тертя сировини з поверхнею шнека;

T – крок спіралі шнека, $T = 0,7 D_J$;

φ_0 – коефіцієнт заповнення об'єму транспортуючого механізму, $\varphi_0 = 0,8$;

ψ – коефіцієнт, залежить від ширини спіралі шнека,

k_{ψ} – коефіцієнт, залежить від характеру сировини, $k_{\psi} = 0,7$ – для в'язких матеріалів;

B – ширина спіралі шнека, $B = 0,3D_J$;

ω – кутова швидкість шнека, $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$,

n – частота обертання шнека.

Коефіцієнт, залежить від ширини спіралі шнека, визначають за формулою

$$\psi = \frac{4k_{\psi} \cdot B(D_J - B - 2z)}{D_J^2}; \quad (3.12)$$

За отриманою формулою знайдено об'єм матеріалу Q_0 у м³, який транспортується протягом 1-ої секунди. Для отримання кількості сировини Q , яка передається за годину, необхідно провести перетворення за формулою:

$$Q = 3600 \cdot Q_0 \cdot \rho_{БМ}, \quad (3.13)$$

де $\rho_{БМ}$ – питома вага матеріалу (сировини), який транспортується.

Будуємо графіки залежності продуктивності шнекових транспортерів від їх енергетичних та кінетичних параметрів (рис. 3.2).

За результатами графоаналітичних досліджень приймаємо шнековий механізм із діаметром $D=225$ мм, частотою обертання вала шнека $n=60$ об/хв., який забезпечить необхідну продуктивність $Q=8000$ кг/м³.

Силовий розрахунок шнекового механізму

Розрахункова потужність шнекового транспортера при одночасному заповненні об'єму шнека екскрементами визначаємо за формулою

$$N = v_K \cdot G \cdot (\sin \beta + f \cos \beta) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_0 + \varphi_T), \quad (3.14)$$

де v_K – колова швидкість точки поверхні в якій прикладена рівнодійна сила тиску технологічної сировини, м/с;

G – вага екскрементів які знаходяться у жолобі шнека, Н;

β – кут нахилу транспортера, $\beta=0$;

f – коефіцієнт тертя екскрементів по матеріалу поверхні шнека,

$$f = 0,2;$$

α_0 – кут підйому гвинта шнека;

φ_T – кут тертя сировини по поверхні шнека.

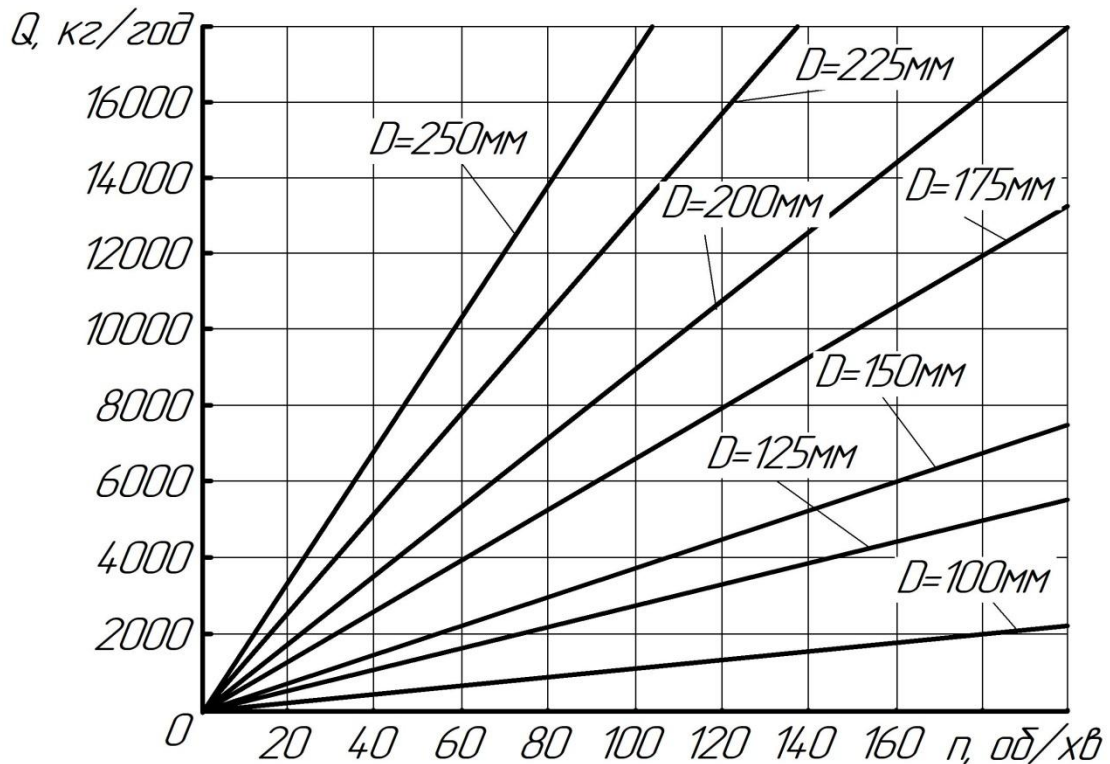


Рисунок 3.2 – Графік залежності продуктивності шнекового транспортера від його кінематичних та конструктивних параметрів

Колову швидкість точки поверхні, в якій прикладена рівнодійна сила тиску технологічної сировини, визначають за формулою

$$v_K = \frac{\pi \cdot D_0 \cdot n}{2}, \quad (3.15)$$

де D_0 – діаметр траєкторії кола поверхні шнека в якій прикладена рівнодійна сили тиску технологічної сировини;

Одержимо

$$D_0 = 0,8 \cdot D_{ш} = 0,8 \cdot 0,225 = 0,16 \text{ м};$$

$$v_K = \frac{\pi \cdot 0,16 \cdot 60}{2} = 15,05 \text{ м/с.}$$

Вагу екскрементів, які знаходяться у жолобі шнека, визначають за формулою

$$G = \frac{Q \cdot L \cdot g}{v_{oc}}, \quad (3.16)$$

де Q – продуктивність шнекового транспортера, $Q=1,59$ кг/с;

L – загальна довжина вітки транспортера, $L=40$ м;

v_{oc} – швидкість переміщення сировини по осі шнека.

$$v_{oc} = \frac{T \cdot n}{60} = \frac{0,7 \cdot 0,2 \cdot 60}{60} = 0,14 \text{ м/с}; \quad (3.17)$$

$$G = \frac{1,59 \cdot 40 \cdot 9,81}{0,14} = 4456 \text{ Н};$$

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{T}{\pi \cdot D_0} = \frac{0,7 \cdot 0,2}{\pi \cdot 0,16} = 0,279, \quad \alpha = 15,6^\circ; \quad (3.18)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_T = f_T = 0,2; \quad \varphi_T = 11,3^\circ.$$

Таким чином потужність механізму для транспортування екскрементів із ферми

$$P = 15,05 \cdot 4456 \cdot 0,2 \cdot \operatorname{tg}(15,6^\circ + 11,3^\circ) = 6805 \text{ Вт.}$$

Загальна потужність приводу [1]

$$P_\partial = \frac{P \cdot k}{\eta_n}, \quad (3.19)$$

де k – коефіцієнт який враховує затрати на переміщення компонентів сумішей,

$$k = 1,3;$$

η_n – коефіцієнт корисної дії підшипників кочення, $\eta_n = 0,8$.

$$P_{\partial} = \frac{6805 \cdot 1,3}{0,8} = 11060 \text{ Вт.}$$

Момент на валу двигуна

$$M = \frac{P_{\partial}}{\omega} = \frac{11060}{6,28} = 1760 \text{ Нм.} \quad (3.20)$$

3.4 Інженерні розрахунки лопатевої мішалки біогазової установки

Проводимо розрахунок геометричних параметрів метантанка. За формулою 2.3 отримаємо

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 200}{1,2 \cdot \pi}} = 5,96 \text{ м,}$$

приймаємо $D = 6,0$ м, тоді висота становить $H = 1,2 \cdot 6,0 = 7,2$ м.

Використовуючи залежності з 2 розділу, визначаємо геометричні параметри лопатевої мішалки:

– діаметр лопатей

$$d_{\text{л}} = 0,8 \cdot D = 0,8 \cdot 6 = 4,8 \text{ м;}$$

– радіальний зазор до стінок реактора

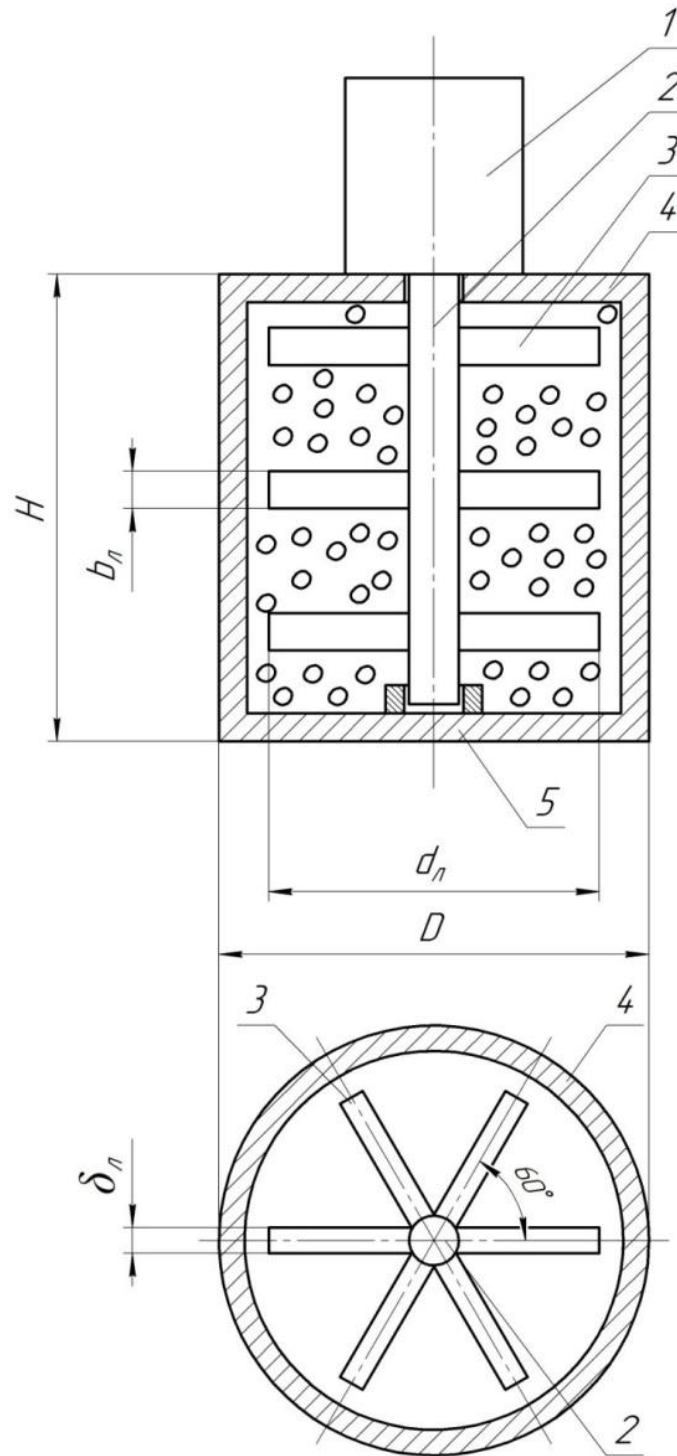
$$\delta = \frac{6 - 4,8}{2} = 0,6 \text{ м;}$$

– ширину та висоту лопатей

$$b_{\text{л}} = 0,2 \cdot 4,8 = 0,96 \text{ м};$$

$$h_{\text{л}} = 0,15 \cdot 4,8 = 0,72 \text{ м}.$$

На рисунку 3.3 показана схема лопатевої мішалки біогазового реактора



1 – привід; 2 – вал мішалки; 3 – лопаті; 4 – корпус реактора; 5 – опора вала

Рисунок 3.3 – Схема лопатевої мішалки біогазового реактора

Визначаємо питому потужність мішалки для густих неоднорідних субстрактів, таких як; гній ВРХ, свиней, силос тощо. Питому потужність рекомендовано приймати $P=8...12$ Вт/м³, прийmemo $P=10$ Вт/м³. Визначаємо орієнтовно питому потужність лопатевої мішалки

$$P_0 = P \cdot V_{MT} = 10 \cdot 200 = 2000 \text{ Вт}. \quad (3.21)$$

Для мішалок такого типу частота обертання вала становить $n = 5...20$ об/хв., прийmemo $n = 10$ об/хв. Тоді кутова швидкість дорівнює

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 10}{30} = 1,05 \text{ с}^{-1}.$$

Відповідно момент на валу мішалки становить

$$M_0 = \frac{P_0}{\omega} = \frac{2000}{1,05} = 1904 \text{ Нм}. \quad (3.22)$$

Проводимо оцінку гідродинамічного коефіцієнту потужності P_p , який повинен знаходитись в межах $P_p = 0,1...0,5$ (бажано $P_p = 0,2...0,3$). Гідродинамічний коефіцієнт визначаємо за формулою

$$P_p = \frac{P_0}{\rho_{БМ} \cdot \left(\frac{\omega}{2}\right)^2 \cdot D^2}. \quad (3.23)$$

Підставивши дані, одержимо

$$P_p = \frac{2000}{1020 \cdot \left(\frac{1,05}{2}\right)^2 \cdot 6^2} = 0,218.$$

Таким чином вибрані геометричні, кінематичні та енергетичні параметри біореактора відповідають рекомендаціям для повільної лопатевої мішалки.

Визначаємо гідродинамічне навантаження на одну лопать за наближеною формулою

$$F_{ГДР} = C_{ОП} \cdot \frac{\rho_{БМ} \cdot \rho^2}{2} \cdot A_{ЛОП}, \quad (3.24)$$

де $C_{ОП}$ – коефіцієнт опору, для пластин, похилої до потоку, $C_{ОП} = 1 \dots 1,2$,

приймаємо $C_{ОП} = 1,1$;

ρ – максимальна лінійна швидкість на лопаті пластини;

$A_{ЛОП}$ – площа лопаті, перпендикулярна до потоку біоматеріалу.

Максимальну лінійну швидкість на лопаті пластини та площу лопаті, визначаємо за формулами:

$$\rho = \omega \cdot \frac{d_L}{2}; \quad (3.25)$$

$$A_{ЛОП} = b_L \cdot h_L \cdot \cos \alpha. \quad (3.26)$$

Таким чином:

$$\rho = 1,05 \cdot \frac{4,8}{2} = 2,52 \text{ м/с};$$

$$A_{ЛОП} = 0,96 \cdot 0,72 \cdot \cos 30^\circ = 0,599 \text{ м}^2.$$

Підставивши дані, одержимо

$$F_{ГДР} = 1,1 \cdot \frac{1020 \cdot 2,52^2}{2} \cdot 0,599 = 2132 \text{ Н}.$$

Гідравлічна сила, яка чинить опір на одну лопатку мішалки, створює відносно осі момент, який становить

$$M_{Г1} = F_{ГДР} \cdot \frac{d_L}{4}. \quad (3.27)$$

Таким чином, гідравлічна сила на одну та на шість лопаток становить:

$$M_{Г1} = 2132 \cdot \frac{4,8}{4} = 2555 \text{ Нм}.$$

$$M_{\Gamma} = 6 \cdot M_{\Gamma 1} = 6 \cdot 2555 = 15330 \text{ Нм.}$$

Для подальших розрахунків приймаємо момент на валу лопатевої мішалки $M_{\Gamma} = 15330 \text{ Нм}$, що відповідає потужності

$$P_M = \frac{M_{\Gamma}}{\omega} = \frac{15330}{1,05} = 14600 \text{ Вт} = 14,6 \text{ кВт.} \quad (3.28)$$

Приймаємо двигун приводу лопатевої мішалки $P_D = 15 \text{ кВт}$.

Визначаємо розміри вала лопатевої мішалки. Приймаємо пустотілий вал (рис. 3.4), для якого $\alpha = \frac{d}{D} = 0,6$ [4].

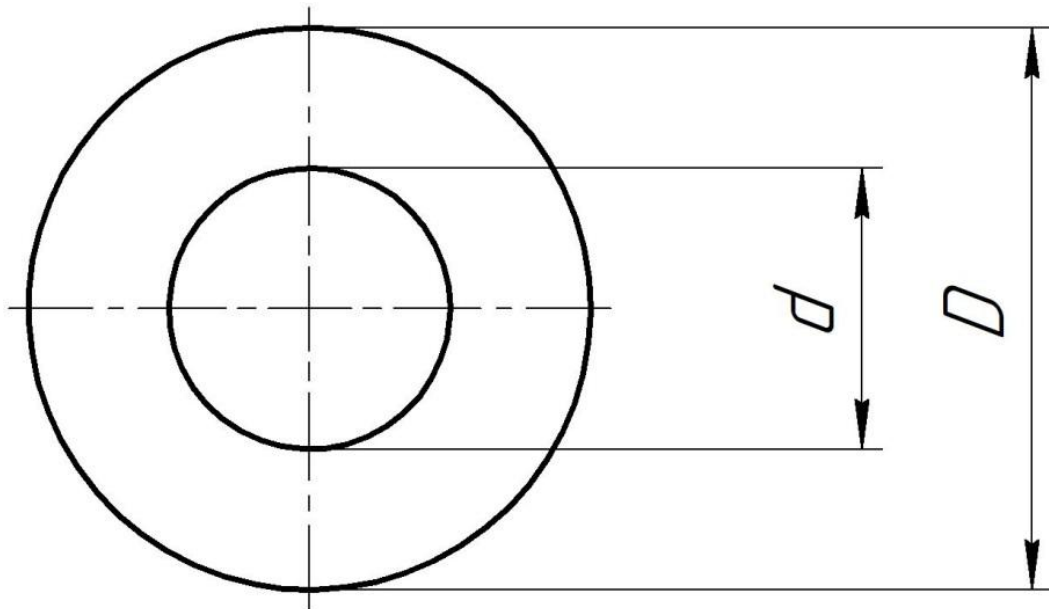


Рисунок 3.4 – Схема поперечного перетину вала лопатевої мішалки

Запишемо умову міцності на кручення

$$\tau = \frac{M_{\Gamma}}{W_P} \leq [\tau], \quad (3.29)$$

де $[\tau]$ – допустимі дотичні напруження матеріалу вала, $[\tau] = 40 \text{ Н/мм}^2$;

$$W_P \text{ – полярний момент опору поперечного перетину, } W_P = \frac{\pi \cdot D^3}{16} \cdot (1 - \alpha^4).$$

Отже,

$$\tau_{max} = \frac{16 \cdot M_{\Gamma}}{\pi \cdot D^3 \cdot (1 - \alpha^4)} \leq [\tau],$$

звідки

$$D = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_{\Gamma}}{\pi \cdot D^3 \cdot [\tau] \cdot (1 - \alpha^4)}}.$$

Підставивши дані, одержимо

$$D = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 15330 \cdot 10^3}{\pi \cdot 40 \cdot (1 - 0,6^4)}} = 130 \text{ мм},$$

тоді $d = 0,6 \cdot 130 = 78$ мм.

Визначаємо товщину лопатевої мішалки δ_{Γ} (див. рис. 3.3). Розрахункова схема показана на рис. 3.5.

Будуємо епюри згинальних моментів у вертикальній та горизонтальній площинах. Горизонтальна площина (див. рис. 3.5 а):

$$F_{\Gamma_{\text{ДР}}.Z} = F_{\Gamma_{\text{ДР}}} \cdot \cos \alpha = 2132 \cdot \cos 30^\circ = 1846 \text{ Н};$$

$$M_{Y_{max}} = 1846 \cdot 1,2 = 2215 \text{ Нм}.$$

Вертикальна площина, (див. рис. 3.5 б):

$$F_{\Gamma_{\text{ДР}}.Y} = F_{\Gamma_{\text{ДР}}} \cdot \sin \alpha = 2132 \cdot \sin 30^\circ = 1066 \text{ Нм};$$

$$M_{Z_{max}} = 1066 \cdot 1,2 = 1279 \text{ Нм}.$$

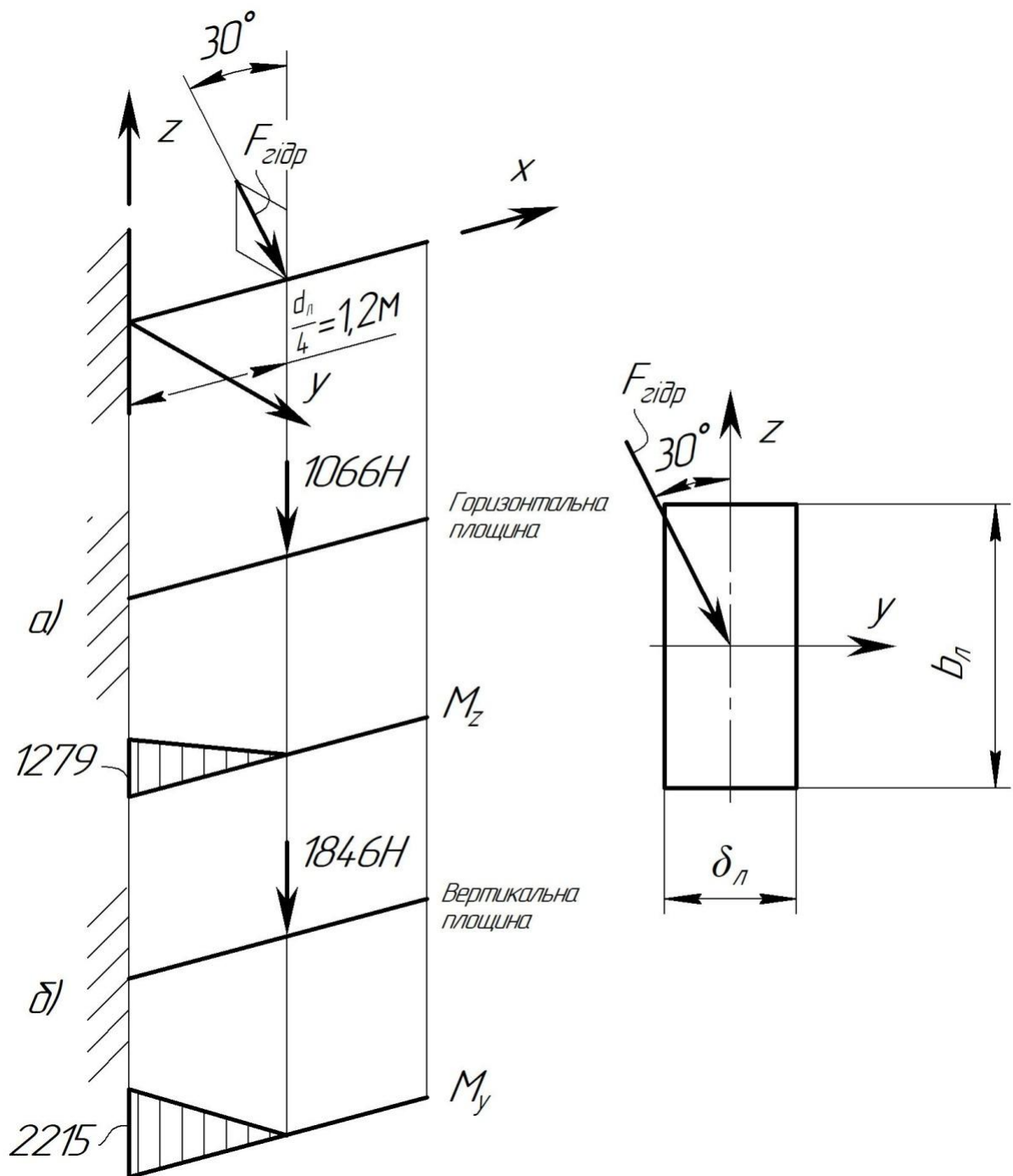


Рисунок 3.5 – Розрахункова схема лопаті мішалки, епюри внутрішніх силових факторів

Записуємо умову міцності при косому згині в небезпечному перетині лопаті мішалки

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{Y \max}}{W_Y} + \frac{M_{Z \max}}{W_Z} \leq [\sigma], \quad (3.30)$$

де $[\sigma]$ – допустимі нормальні напруження матеріалу лопаті, $[\sigma]=100$ Н/мм²;

W_Y, W_Z – осьові моменти опору поперечного перетину лопаті.

Осьові моменти опору визначають за формулами:

$$W_Z = \frac{b_L \cdot \delta_L^2}{6} = \frac{960 \cdot \delta_L^2}{6} = 160 \cdot \delta_L^2;$$

$$W_Y = \frac{\sigma_L \cdot b_L^2}{6} = \frac{960^2 \cdot \delta_L}{6} = 153,6 \cdot 10^3 \cdot \delta_L.$$

Отже,

$$\sigma_{max} = \frac{1279 \cdot 10^3}{153,6 \cdot 10^3 \cdot \delta_L} + \frac{2215 \cdot 10^3}{160 \cdot \delta_L^2} \leq [\sigma] = 100.$$

Розв'язуючи рівняння

$$100 \cdot \delta_L^2 - 8,33 \cdot \delta_L - 13843 = 0,$$

отримаємо

$$\delta_L \geq \frac{8,33 + \sqrt{8,33^2 + 4 \cdot 100 \cdot 13843}}{2 \cdot 100} = 11,8 \text{ мм},$$

Приймаємо $\delta_L = 12,0$ мм.

3.5 Розрахунки, отриманої енергії проєктованої установки

Маса сухої речовини, що знаходиться в біореакторі становить []

$$m_{CP} = m_{БМ.К} \cdot \left(1 - \frac{\varphi_{БМК}}{100}\right) = 55 \cdot 200 \cdot 15 \cdot \left(1 - \frac{65}{100}\right) = 57750 \text{ кг}.$$

Частка органічної речовини в сухій масі становить

$$m_{COP} = m_{CP} \cdot \rho_{COP} = 57750 \cdot 0,8 = 46200 \text{ кг.}$$

Визначаємо об'єм біогазу за повний цикл розкладу біомаси

$$V_{ПОВ} = m_{COP} \cdot n_K = 46200 \cdot 0,2 = 9240 \text{ м}^3.$$

Реальний об'єм газу, який надходить в газосховище за повний цикл розкладу сировини, тобто 15 діб, становить

$$V_B = V_{ПОВ} \cdot \frac{n_{тК}}{100} = 9240 \cdot \frac{40}{100} = 3696 \text{ м}^3.$$

Вихід біогазу для обраної технології біогазової установки за місяць, складає

$$V_M = 2 \cdot V_B = 3696 \cdot 2 = 7392 \text{ м}^3.$$

Враховуючи теплову енергію отриману від згорання біогазу за місяць становить

$$E_M = 28 \cdot 0,6 \cdot 7392 = 124,2 \cdot 10^3 \text{ МДж.}$$

3.6 Визначення енергетичних затрат на забезпечення роботи БГУ

Кількість тепла, $Q_{ПД}$, МДж, необхідного для підігріву сировини до температури процесу зброджування визначають за формулою [11, 21]

$$Q_{ПД} = m_{БМ} \cdot c_{БМ} \cdot (t_{ПР} - t_{ЗАВ}) \cdot 10^{-3}, \quad (3.31)$$

де $c_{БМ}$ – середня теплоємність біомаси, $c_{БМ} = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;

$t_{ПР}$ – температура процесу зброджування, $t_{ПР} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$;

$t_{ЗАВ}$ – температура завантаженої біомаси, $^\circ\text{C}$. Приймається

рівною середньомісячній температурі навколишнього середовища, $t_{3AB} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Підставивши дані, одержимо

$$Q_{\text{ПД}} = 11000 \cdot 4,18 \cdot (30 - 10) \cdot 10^{-3} = 920 \text{ МДж.}$$

Середньомісячну кількість тепла визначають за формулою

$$Q_{\text{ПД}}^M = Q_{\text{ПД}} \cdot t_{\text{ДБ}}, \quad (3.32)$$

де $t_{\text{ДБ}}$ – кількість днів в місяці, $t_{\text{ДБ}} = 30$ діб.

Підставивши дані, одержимо

$$Q_{\text{ПД}}^M = 920 \cdot 30 = 27600 \text{ МДж.}$$

Кількість тепла $Q_{\text{ТЕП}}$, Вт, що втрачається в процесі тепловіддачі через теплоізоляційні шари метантанку в навколишнє середовище, визначають за формулою

$$Q_{\text{ТЕП}} = k \cdot A \cdot (t_{\text{ПР}} - t_{\text{СР}}), \quad (3.33)$$

де k – коефіцієнт тепловіддачі $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;

A – площа поверхні метантанка, м^2 ;

$t_{\text{СР}}$ – середня місячна температура повітря, приймаємо $t_{\text{СР}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Коефіцієнт тепловіддачі k , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, визначаємо за формулою [36, 37]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3.34)$$

де $\frac{1}{\alpha_1}$ – опір тепловіддачі внутрішньої поверхні, $\frac{1}{\alpha_1} = 0,05 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$;

$\frac{1}{\alpha_2}$ – опір тепловіддачі зовнішньої поверхні, $\frac{1}{\alpha_2} = 0,05 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$;

δ_i – товщина i -го шару теплоізоляції, м;

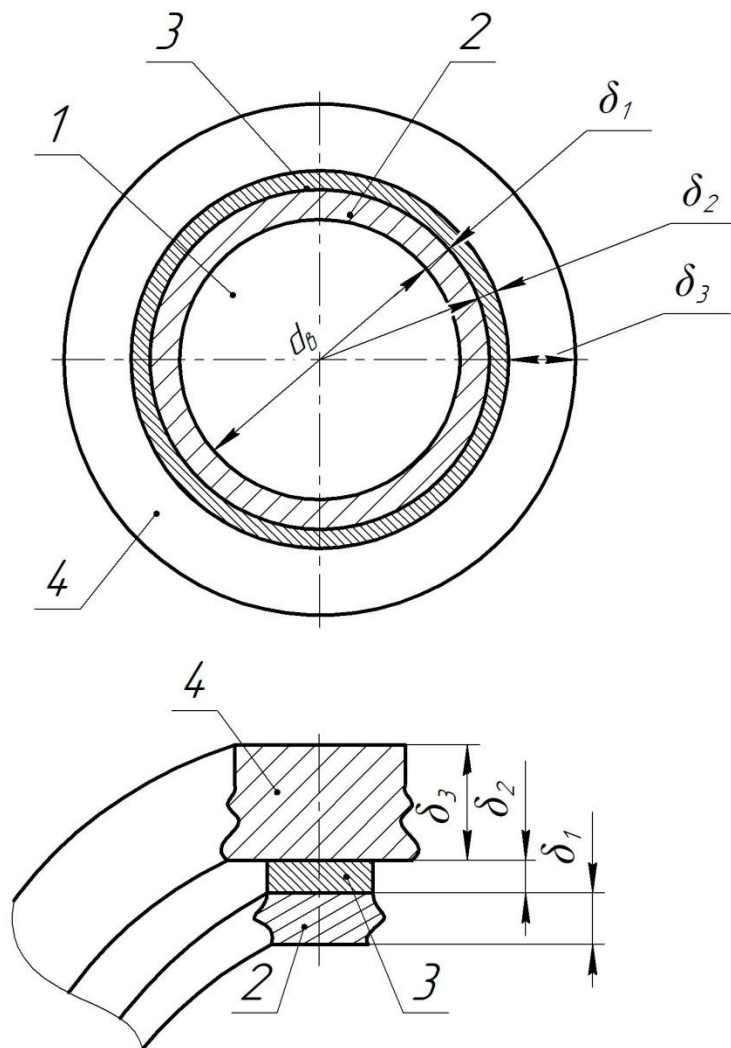
λ_1 – коефіцієнт теплопровідності i -го шару елемента захисної теплоізоляції, Вт/м⁰С.

Площу поверхні метантанка A , м², визначасмо за формулою

$$A = A_{\text{БІЧ}} + 2 \cdot A_{\text{ОСН}}, \quad (3.35)$$

де $A_{\text{БІЧ}}$ – площа бічної поверхні метантанка, м²;

$A_{\text{ОСН}}$ – площа основи метантанка, м².



1 – метантанк; 2 – корпус метантанку; 3 – шлакобетон 4 – земляний вал

Рисунок 3.6 – Схематизація теплоізоляції БГУ

Площу основи $A_{\text{ОСН}}$, м², та площу бічної поверхні метантанка, $A_{\text{БІЧ}}$, м²,

визначають за формулами:

$$A_{OCH} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}; \quad (3.36)$$

$$A_{БГЧ} = \pi \cdot D \cdot H. \quad (3.37)$$

Підставивши дані, одержимо

$$A_{OCH} = \frac{3,14 \cdot 6^2}{4} = 28,3 \text{ м}^2;$$

$$A_{БГЧ} = \pi \cdot 6 \cdot 7,2^2 = 135,7 \text{ м}^2;$$

$$A = 135,7 + 2 \cdot 28,3 = 192,3 \text{ м}^2.$$

Приймаємо бетонний метантанк товщиною $\delta_1 = 0,3\text{ м}$; теплоізоляція виконана в вигляді шлакобетону $\delta_2 = 0,1\text{ м}$; земляний вал $\delta_3 = 1\text{ м}$; $\lambda_1 = 1,83$; $\lambda_2 = 0,06$; $\lambda_3 = 1,75$.

Тоді коефіцієнт тепловіддачі буде рівний

$$k = \frac{1}{0,05 + \frac{0,3}{1,83} + \frac{0,1}{0,06} + \frac{1}{1,75} + 0,05} = 0,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C});$$

А також

$$Q_{ТЕП} = 0,4 \cdot 192,3 \cdot (30 - 15) = 1154 \text{ Вт}.$$

Переведемо кількість теплоти, що втрачається в навколишнє середовище в МДж/міс за формулою

$$Q_{ТЕП}^M = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{ТЕП} \cdot t_{ЧМ}, \quad (3.38)$$

де $t_{ЧМ}$ – кількість годин в місяці, $t_{ЧМ} = 720$ год.

Підставивши дані, одержимо

$$Q_{ТЕП}^M = 3,6 \cdot 10^{-3} 1154 \cdot 720 = 2990 \text{ МДж/міс.}$$

Загальні витрати електроенергії на обслуговування технологічного процесу роботи біогазової установки за добу становить

$$Q_{MEX} = Q_{MEX.G} + Q_{MEX.H} + Q_{MEX.M}, \quad (3.39)$$

де $Q_{MEX.G}$ – добові витрати електроенергії на роботу шнекової мішалки гомогенізатора;

$Q_{MEX.H}$ – добові витрати електроенергії на роботу шнекового насоса для перекачування біомаси з гомогенізатора до реактора;

$Q_{MEX.M}$ – добові витрати електроенергії на роботу лопатевої мішалки на Механічне перемішування субстрату в реакторі.

Визначаємо енергетичні затрати за добу:

– гомогенізатора

$$Q_{MEX.G} = P_G \cdot t_G, \quad (3.40)$$

де t_G – час роботи мішалки гомогенізатора за добу, $t_G = 3$ год.

$$Q_{MEX.G} = 1,04 \cdot 3 = 3,12 \text{ кВт год.}$$

– шнекового насоса

$$Q_{MEX.H} = P_H \cdot t_H, \quad (3.41)$$

де t_H – час роботи мішалки за добу, $t_H = 3$ год.

$$Q_{MEX.H} = 11,06 \cdot 3 = 33,18 \text{ кВт год.}$$

– лопатева мішалка

$$Q_{MEX.M} = P_M \cdot t_M, \quad (3.42)$$

де t_M – час роботи мішалки за добу, $t_M = 3$ год.

$$Q_{MEX.M} = 14,6 \cdot 8 = 116,8 \text{ кВт год.}$$

Отже, за добу БГУ споживає електроенергію

$$Q_{MEX} = 3,12 + 33,18 + 116,8 = 153,1 \text{ кВт год.}$$

Споживання за місяць складає

$$Q_{MEX}^M = 30 \cdot Q_{MEX.M} = 30 \cdot 153,1 = 4593 \text{ кВт год.}$$

Проводимо отримане значення в МДж/міс за формулою

$$Q_{MEX}^M = 3,6 \cdot 4593 = 16535 \text{ МДж / міс. кВт год.}$$

Загальні затрати енергії на підтримання процесу на місяць визначають за формулою

$$Q_{ЗАГ}^M = Q_{ПД}^M + Q_{ТЕП}^M + Q_{MEX}^M. \quad (3.43)$$

Підставивши дані, одержимо

$$Q_{ЗАГ}^M = 27600 + 2990 + 16535 = 47125 \text{ МДж/міс.}$$

Для отримання такої енергії необхідно затратити такий об'єм біогазу

$$V_{MEX}^M = \frac{Q_{ЗАГ}^M}{H_M \cdot f_M} = \frac{47125}{28 \cdot 0,6} = 2805 \text{ м}^3.$$

Кількість товарного біогазу становить

$$V_T = V_M - V_{MEX}^M = 7392 - 2805 = 4587 \text{ м}^3.$$

Частка від загального складає

$$\frac{V_T}{V_M} \cdot 100 \% = \frac{4587}{7392} \cdot 100 \% = 62 \%.$$

Загальну витрату електроенергії на механічне перемішування субстрату в метантанку Q_{MEX} визначаємо за формулою

$$Q_{MEX} = q_{НОРМ} \cdot V_{MT} \cdot z, \quad (3.44)$$

де $q_{НОРМ}$ – відносне навантаження на мішалку $q_{НОРМ} = 50 \text{ Вт год/м}^3$;

V_{MT} – об'єм метантенка, $V_{MT} = 272 \text{ м}^3$;

z – тривалість роботи мішалки, $z = 8$ годин на добу.

Підставивши дані, одержимо

$$Q_{MEX} = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 272 \cdot 8 = 109 \text{ кВт/год.}$$

Переводимо отримане значення в МДж/міс за формулою

$$Q_{MEX} = 3,6 \cdot Q_{MEX}^M \cdot t_{ДІБ}. \quad (3.45)$$

$$Q_{MEX}^M = 3,6 \cdot 109 \cdot 30 = 11772 \text{ МДж/міс.}$$

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Організація робіт по техніці безпеки та охорони праці

Одним з найважливіших питань в організації роботи з охорони праці є своєчасне проведення інструктажу та навчання робітників вимогам безпеки праці. При цьому слід зазначити, що в господарстві своєчасно проводяться всі види інструктажу – вступний, на робочому місці і повторний (періодичний). Про проведення інструктажу робиться відповідний запис у журналі реєстрації (особистій картці інструктажу) з підписом осіб, які проходили інструктаж, і тих, що його проводили [2].

Заходи, що залежать безпосередньо від керівника підприємства та головного спеціаліста з охорони праці:

- своєчасно проводити вступні та позапланові інструктажі з охорони праці;
- на належному рівні знаходити забезпечення працівників засобами індивідуального захисту;
- регулярно проводити навчання з охорони праці та приймати відповідні іспити;
- на задовільному рівні знаходити забезпечення всіх виробничих процесів приладдям та засобами, що забезпечують належні умови праці;
- деяке обладнання для забезпечення належного мікроклімату у виробничих приміщеннях потребує модернізації чи заміни.

Заходи, що залежать від керівників виробничих підрозділів:

- своєчасно проводити первинні та інструктажі на робочому місці;
- регулярно здійснювати ознайомлення робітників зі змінами в законодавстві з питань охорони праці;
- доводити інформацію про нещасні випадки у сусідніх підрозділах та причини їх виникнення;

- всі робочі місця забезпечувати інструкціями з охорони праці;
- в кожному виробничому та побутовому пожежонебезпечному приміщенні наявність відповідних засобів пожежогасіння;
- керівники підрозділів слідкують за тим, щоб працівники мали відповідний спецодяг, користувалися засобами індивідуального захисту;
- вчасно надавати інформацію про вихід з ладу того чи іншого обладнання;
- всі необхідні небезпечні елементи обладнання мають мати огороження, відповідні маркування чи колір фарбування;
- здійснювати постійний контроль за станом поверхонь будівельних конструкцій виробничих приміщень.

Вихідну сировину слід завантажувати в приймальні бункери до рівня, що не перевищує встановлений, а в робочу камеру на переробку подавати рівномірно, відповідно до продуктивності машини або за показами контрольних приладів. Неприпустиме проштовхування матеріалу руками до робочої камери. У разі завалу потрібно увімкнути зворотній хід того чи іншого механізму або зупинити машину, вимкнути рубильник і лише після цього очистити робочі органи чи камеру. Заборонено стояти у зоні розвантаження продукту. Зупиняти машину можна тільки після повного видалення продуктів обробки, завантажених у робочу камеру. На робочих місцях з машинами для подрібнення сухих кормів неприпустиме нагромадження пилу, оскільки це створює вибухонебезпечну ситуацію.

Кормоприготувальні машини в цеху потрібно встановлювати так, щоб технологічні проходи відповідали нормам.

У кормоцехах, де розташовані коренебульбомийки, мийки-подрібнювачі, влаштовувати загальну і місцеву каналізацію; бетонують підлоги з нахилом до відстійників; біля машин розміщують гумові килими або дерев'яні настили.

При обслуговуванні кормозапарників необхідно дотримуватися таких вимог: чани щільно закривати накривками; обладнувати пристроєм для легкого їх відкривання; знімати кришку з чана наповненого готовим продуктом, можна

після того, як буде закритий паровий кран чана; перед навантаженням запареного продукту конденсат з чана слід зливати через стічний отвір.

4.2 Санітарно-гігієнічні вимоги по догляду за тваринами

До роботи по обслуговуванню тварин допускаються працівники старші за 16-ти років і тільки з дозволу медичної комісії. При інструктажі працівників необхідно, передусім, розказати про звички тварин, показати, де розміщуються неспокійні тварини, вивішувати написи з попередженням про обережність при обслуговуванні цих тварин. До обслуговування хворих тварин допускаються спеціально навчені працівники старші 17-ти років, які періодично (раз в квартал) проходять медичний огляд. Вхід в ізолятор стороннім особам заборонений. Обслуговуючому персоналу, які доглядають хворих тварини, крім спецодягу і взуття видається санітарний одяг та взуття, який щодня дезінфікується.

У побутовому приміщенні передбачена душова. Також в свинарнику є службові приміщення і споруди. У приміщенні кормоцеху є вентиляторна, амбулаторія і свої побутові приміщення. Для працівників ферми в блоці службових приміщень запроектована кімната для їди і відпочинку.

У приміщенні контори обладнана кімната для першої медичної допомоги. У кімнаті знаходиться аптечка і обладнання для першої медичної допомоги.

З огляду на впровадження нового цеху з виробництва концентрованих кормів робимо проектний розрахунок однієї з найважливіших систем забезпечення нормованого мікроклімату у виробничих приміщеннях – вентиляції.

Вентиляція служить для покращення санітарно - гігієнічного стану повітряного середовища виробничих приміщень і має значний вплив на загальний стан і самопочуття робітників.

Оснащення кормоцеху великою кількістю тепловиділяючих машин і апаратів призводить до збільшення температури та відносної вологості повітря у цеху. Крім того, люди, що працюють в цих приміщеннях виділяють вуглекислий газ та тепло. Все це призводить до погіршення самопочуття робітників і, як наслідок, до зниження продуктивності праці. Для забезпечення нормальних умов праці необхідно постійно видаляти з приміщення забруднене повітря і замінити його свіжим, а в зимовий період, повітрям, підігрітим в калориферах.

В цехах підготовки кормів проектують механічну припливно - витяжну вентиляцію, де нагнітання та видалення повітря здійснюється за допомогою вентиляторів. Також можна застосовувати комбіновану систему вентиляції, коли свіже повітря нагнітається за допомогою вентиляторів, а видаляється з приміщення за допомогою дефлекторів, використовуючи природні збудники руху повітря – вітер та перепад температур.

В нашому випадку приймаємо комбіновану систему вентиляції, що дозволить знизити витрати енергії та зменшити швидкість повітря в середині приміщень.

Розрахунок вентиляції зводиться до визначення необхідного повітрообміну, підбору вентиляторів та калориферів. Необхідний повітрообмін визначаємо за формулою

$$z = i \cdot V , \quad (4.1)$$

де i – кратність повітрообміну, обмінів/год;

V – об'єм приміщення, $V = 18 \cdot 12 \cdot 3 = 648 \text{ м}^3$.

Кратність повітрообміну i для виробничих приміщень не повинна перевищувати 3...4 обміни/год, що забезпечує видалення забрудненого повітря

та нормативну швидкість руху повітря в приміщенні, яка для робіт II категорії становить 0,2 м/сек.

Тоді необхідний повітрообмін для приймального відділення становитиме

$$z_{np} = 3,5 \cdot 648 = 2268 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Вибираємо вентилятори для забезпечення розрахункового повітрообміну. При цьому необхідно мати на увазі, що повний тиск вентилятора не повинен бути меншим ніж 600 Па – тиск необхідний для подолання опору фільтрів та калориферів.

Виходячи з компоновання виробничого приміщення в будівлі, доцільно змонтувати один припливний вентиляційний повітропровід та один вентилятор, продуктивність якого дорівнювала б повітрообміну приміщення.

В нашому випадку для нагнітання свіжого повітря у виробничі приміщення використовуємо відцентровий вентилятор серії В.Ц5 (рис. 4.1, 4.2).

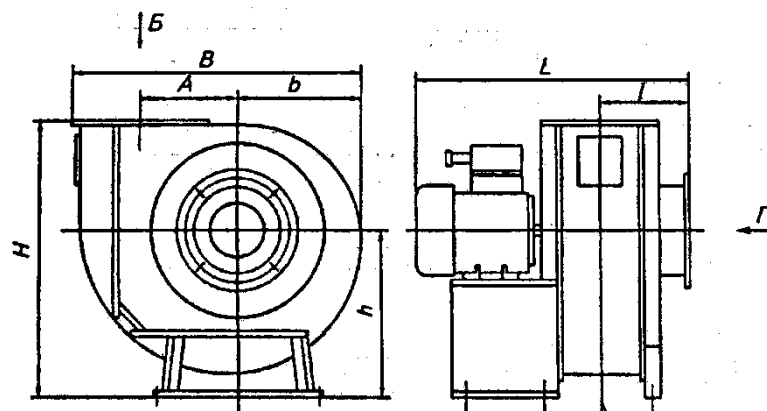


Рисунок 4.1 – Відцентровий вентилятор серії В.Ц5

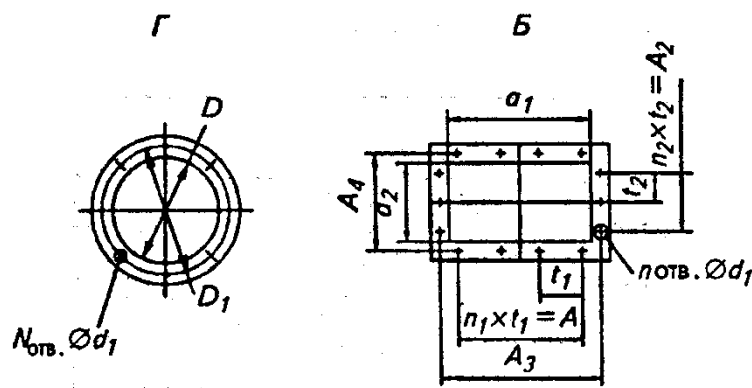


Рисунок 4.2 – Конфігурація патрубків вентиляторів серії В.Ц5

Тоді для повітрообміну в приймальному та апаратному відділеннях приймаємо вентилятор типу В.Ц5-45-4,25В1-01, який забезпечує продуктивність 1,7...4,5 тис. м³/год.

Кількість дефлекторів, що служать для відсмоктування повітря з приміщень (рис. 4.3) визначаємо з їх продуктивності

$$z_{диф} = 3600 \cdot S \cdot 0,5v, \quad (4.2)$$

де S – площа перерізу повітропроводу, до якого приєднується дефлектор, м²;
 v – швидкість вітру, м/с.

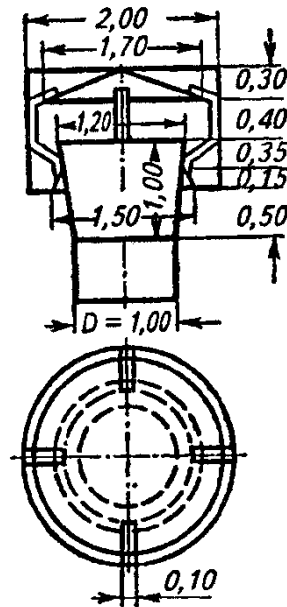


Рисунок 4.3 – Дефлектор для відсмоктування повітря з приміщення

Прийнявши діаметр витяжного повітропроводу 0,4 м та швидкість вітру 5 м/с отримаємо продуктивність дефлектора

$$z_{диф} = 3600 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} \cdot 0,5 \cdot 5 = 1170 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Кількість дефлекторів кормоцеху визначаємо за формулою

$$n_{def} = \frac{z_{np}}{z_{def}}; \quad (4.3)$$

$$n_{def} = \frac{2268}{1170} = 1,94;$$

приймаємо 2 дефлектори.

Відповідно для апаратного і фасувального відділень кількість дефлекторів визначаємо за формулами:

$$n_{def} = \frac{z_{an}}{z_{def}}; \quad (4.4)$$

$$n_{def} = \frac{z_{фас}}{z_{def}}. \quad (4.5)$$

Підставивши дані, одержимо:

$$n_{def} = \frac{1134}{1170} = 0,97;$$

$$n_{def} = \frac{1134}{1170} = 0,97.$$

Приймаємо по одному дефлектору для кожного приміщення.

Таким чином для видалення повітря з виробничих приміщень із розрахованим повітрообміном застосовуємо чотири дефлектори типу ЦАГИ круглий [2].

В роботі запропоновано лише частину заходів, направлених на поліпшення умов праці, але ця частина є досить важливою для збереження здоров'я працівників. Особливо слід відмітити, що обладнання запропонованої системи вентиляції підібране таким чином, щоб зменшити монтажні та

експлуатаційні витрати без зміни загальної продуктивності системи та якості виконання своїх функцій.

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

У більшості випадків техногенні аварії пов'язані з неконтрольованим, мимовільним виходом у навколишнє простір речовини чи енергії. Мимовільне вивільнення енергії приводить до промислових вибухів, а речовини – до вибухів, пожежам і хімічному забрудненню навколишнього середовища [2].

У виробничих умовах можливі наступні основні види вибухів: вільний повітряний, наземний, вибух у безпосередній близькості від об'єкта, а також вибух усередині об'єкта (виробничого спорудження).

Суттєву небезпеку становлять пожежі.

Під пожежею розуміють неконтрольований процес горіння, що супроводжується знищенням матеріальних цінностей і створює небезпеку для життя людей. Причиною виникнення пожеж на промислових об'єктах можна розділити на двох груп. Перша – це порушення протипожежного режиму чи необережне поводження з вогнем, друга – порушення пожежної безпеки при проектуванні і будівництві будинків. Пожежі можуть виникнути при вибуху в чи приміщеннях виробничих апаратах при вибоках і аварійних викидах пожежовибухонебезпечних середовищ в обсяги виробничих приміщень.

Пожежа є хімічною реакцією між горючими речовинами і киснем повітря (чи іншим видом окисного середовища). Для того, щоб виникла пожежа необхідно три компоненти: пальне, кисень і первісне джерело теплоти з енергією, достатньої для початку реакції горіння.

Утворення полум'я пов'язано з газоподібним станом речовини, тому горіння рідких і твердих речовин, що супроводжується виникненням полум'я, припускає їхній попередній перехід у газоподібну фазу.

При пожежах існує кілька різних небезпечних факторів. Перший з них – це підвищені температури в зоні горіння. Вони можуть привести до теплових опіків поверхні шкіри і внутрішніх органів людей, а також викликати втрату несучої здатності будівельних конструкцій будинків і споруджень. Другим фактором є надходження в повітря робочої зони значної кількості шкідливих продуктів згоряння, у більшості випадків, що приводить до гострих отруєнь людей.

На багатьох підприємствах для технологічних цілей застосовують шкідливі, у тому числі сильнодіючі отруйні речовини (СДОР). Так, наприклад, часто застосовуються хлор і аміак. Широко застосовуються також луги, кислоти й інші агресивні і сильнодіючі речовини. При аварійних розгерметизаціях ємкостей, устаткування, зі змістом токсичних чи речовин їхнім перевезенням, пов'язані з підвищеним ризиком небезпек, тому що при виході на рудію цих речовин приводить до перевищення гранично припустимої концентрації, що може викликати людські жертви.

У залежності від термодинамічного стану рідини при збереженні в ємності, можливо три варіанти протікання процесу при розгерметизації ємності:

- при великих перегрівах рідина може цілком переходити в рідкий і пароподібний стан з утворенням токсичних, шкідливих і пожежовибухонебезпечних сумішей;

- при низьких енергетичних параметрах рідини відбувається спокійний її пролив на тверду поверхню, а випар здійснюється шляхом тепловіддачі від твердої поверхні;

- проміжний режим, коли в початковий момент відбувається різке скипання рідини з утворенням мілкодисперсної фракції, а потім настає режим вільного випару з відносно низькими швидкостями.

Ряд речовин у промислових умовах зберігається і використовується при низьких температурах (криогенних температурах) у рідкому стані. Найбільше

часто зустрічаються: рідкий кисень і азот, рідкий водень, гелій і т.д. Ці речовини в загальноприйнятому розумінні не можна назвати отруйними чи токсичними, але надходження їхній в атмосферу у великій кількості може викликати витиснення з її кисню, що також створить визначених розмірів небезпечну зону. Крім того деякі з цих речовин є чи окислювачами пожежовибухонебезпечними речовинами, низькі температури цих речовин можуть привести до додаткових небезпечних факторів, таким як потенційна небезпека опіків поверхні тіла і внутрішніх органів у людей, а також до втрати несучої здатності силових елементів будинків, машин і механізмів за рахунок холодоломкості.

Автоматична пожежна сигналізація є важливою мірою запобігання великих пожеж, тому що час між виникнення пожежі і приїзду пожежної бригади проходить значно багато, що в більшості випадків приводить до повного охоплення полум'ям приміщення. Основна задача автоматичної пожежної сигналізації - виявлення початкової стадії пожежі, передача повідомлення про місце і час його виникнення і при необхідності включення автоматичних систем пожежогасіння і димовидалення.

Функціонально автоматична пожежна сигналізація складається з приймально-контрольної станції, що через сигнальні лінії з'єднана з пожежними сигналами. Задача пожежних сигналів є перетворення різних проявів пожежі в електричні сигнали.

Швидкість спрацьовування автоматичної пожежної сигналізації в основному визначається швидкістю спрацьовування первинних сигналів. В даний час найбільш часто використовуються теплові, димові, світлові і звукові пожежні сигнали.

Запобігання розвитку пожежі залежить не тільки від швидкості його виявлення, але і від вибору засобів і способів пожежогасіння.

Вибір засобів і способів пожежогасіння. Для придушення процесу горіння можна знижувати вміст пального компонента, окислювача (кисню повітря),

знижувати температуру чи процесу збільшити енергію активації реакції горіння. Відповідно до цього в даний час при гасінні пожеж використовують один з наступних основних способів:

- ізоляцію вогнища горіння від чи повітря зниження шляхом розведення повітря непальними газами, концентрації кисню в повітрі до значення, при якому не може відбуватися процес горіння;

- охолодження вогнища горіння нижче визначених температур (температур самозапалювання, запалення і спалахи пальних речовин і матеріалів);

- інтенсивне інгібування швидкість хімічної реакції окислювання;

- механічний зрив полум'я в результаті впливу на нього сильного струменя чи газу рідини;

- створення умов вогнезагородження, при яких полум'я змушене поширюватися через вузькі канали.

Для реалізації перерахованих способів гасіння пожеж використовують різні вогнегасні речовини. До них відносять в першу чергу воду, як найдешевший і доступний матеріал, пісок, пожежні щити з устаткуванням, вогнегасники є одним з найбільш ефективних первинних засобів пожежогасіння, інертні розріджувачі застосовуються для об'ємного гасіння, останнім часом для гасіння пожеж широко застосовують вогнегасні порошки.

Багато які вогнегасні речовини, застосовувані в автоматичних системах пожежогасіння, ушкоджують технологічні установки. Тому вибір типу вогнегасної речовини повинний визначатися не тільки швидкістю і якістю гасіння пожежі, але і необхідністю забезпечити мінімальне сумарне ушкодження, що може бути заподіяно будинку й устаткуванню.

Для уникнення і мінімізації важких наслідків надзвичайних ситуацій надзвичайно важливим є забезпечення заходів з інженерного захисту від можливих негативних чинників фактором – надходження в повітря робочої зони значної кількості шкідливих продуктів згорання, у більшості випадків, що приводить до гострих отруєнь людей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи проведено комплексний аналіз сучасних біогазових установок та технологічних схем анаеробного збродження органічної сировини, що застосовуються в аграрному секторі. Встановлено, що найбільш універсальними для умов тваринницьких ферм України є установки з одноступеневим збродженням типу CSTR, які забезпечують стабільний вихід біогазу за різних складів субстрату.

Обґрунтовано доцільність використання комбінованої системи перемішування, що поєднує шнекові та лопатеві механізми. Такий підхід дозволяє забезпечити рівномірний розподіл твердих частинок, запобігти утворенню плаваючої кірки та осаду, зменшити кількість «мертвих зон» у біореакторі й підвищити інтенсивність масообмінних процесів.

Виконано розрахунок технологічних і геометричних параметрів біогазової установки, зокрема метантанка та гомогенізатора, з урахуванням обсягів біосировини тваринницької ферми. Визначено раціональні співвідношення між діаметром і висотою реактора, що забезпечують ефективне використання робочого об'єму та зручність експлуатації.

Проведено інженерні розрахунки шнекового механізму транспортування та перемішування біомаси, на основі яких встановлено допустимі діапазони геометричних і кінематичних параметрів. Показано, що застосування шнекових механізмів є ефективним для роботи з високов'язкими та неоднорідними субстратами при помірних енерговитратах.

Обґрунтовано вибір лопатевої мішалки для перемішування субстрату в біореакторі. Визначено основні конструктивні параметри лопатей та їх розташування по висоті реактора, що забезпечує формування замкнених циркуляційних контурів і стабільний перебіг процесу анаеробного збродження.

Виконано наближений розрахунок виходу біогазу та енергетичний розрахунок біогазової установки. Встановлено, що проєктована установка здатна забезпечити отримання значної кількості теплової та електричної енергії, достатньої для часткового або повного покриття енергетичних потреб тваринницької ферми.

Показано, що впровадження запропонованих технічних рішень сприяє підвищенню енергоефективності біогазової установки, зниженню негативного впливу на довкілля та раціональному використанню відходів тваринництва з отриманням цінного органічного добрива.

Отримані результати та запропоновані інженерні рішення можуть бути використані при проєктуванні, реконструкції та експлуатації біогазових установок різної потужності, а також у навчальному процесі та подальших науково-практичних дослідженнях у галузі відновлюваної енергетики.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гевко Р. Б., Хомик Н. І., Жаровський О. С., Довбуш Т. А. Деталі машин та основи автоматизованого конструювання : навч. посіб. до лабораторних робіт. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 256 с.
2. Гогіташвілі Г. Г., Лапін В. М. Основи охорони праці. Львів : Новий світ, 2000. 230 с.
3. Довбуш Т. А., Хомик Н. І., Цьонь Г. Б. Зниження металоємності гнучких транспортуючих механізмів // Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., Тернопіль, 14–15 травня 2020 р. Тернопіль : ТНТУ, 2020. С. 20–21.
4. Довбуш Т. А., Хомик Н. І., Бабій А. В., Цьонь Г. Б., Довбуш А. Д. Опір матеріалів : навч. посіб. до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. 220 с.
5. Довбуш Т. А., Хомик Н. І., Довбуш А. Д., Цьонь Г. Б. Шляхи зменшення металомісткості гнучких шнекових механізмів // Проблеми теорії проектування та виготовлення транспортно-технологічних машин : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., Тернопіль, 23–24 вересня 2021 р. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. С. 67–68.
6. Олексюк В. П., Бабій А. В., Сташків М. Я., Хомик Н. І., Довбуш Т. А., Цьонь Г. Б., Мартинюк В. В. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія». Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. 93 с.
7. Хомик Н. І., Цьонь Г. Б., Довбуш Т. А., Блозва І. Й., Довбуш А. Д. Вступ до фаху : навч. посіб. для студентів спеціальності 208 «Агроінженерія». Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. 348 с.

8. Хомик Н. І., Довбуш А. Д., Цьонь О. П. Деталі машин : курс лекцій для студентів заочної форми навчання. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2016. 160 с.
9. Хомик Н. І., Довбуш А. Д., Олексюк В. П. Машини та обладнання для тваринництва : навч. посіб. (курс лекцій). Ч. 1. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 240 с.
10. Хомик Н. І., Мартинюк В. В., Бабій А. В., Цьонь Г. Б., Довбуш Т. А., Довбуш А. Д. Агрозахист : навч. посіб. / за заг. ред. Н. І. Хомик. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. 520 с.
11. Хомик Н. І., Ткаченко І. Г., Довбуш А. Д. Машини та обладнання для тваринництва : навч. посіб. до курсового проєктування для студентів спеціальності 208 «Агроінженерія». Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. 100 с.
12. Хомик Н. І., Олексюк В. П., Сташків М. Я., Бабій А. В., Довбуш Т. А. Методичний посібник до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності «Агроінженерія». Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. 180 с.
13. Хомик Н. І., Цьонь Г. Б., Довбуш Т. А., Олексюк В. П. Основи агрономії : навч. посіб. (курс лекцій). Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 232 с.
14. Хомик Н. І., Цьонь Г. Б., Довбуш Т. А., Антончак Н. А. Основи агрономії : навч. посіб. до практичних занять та самостійної роботи. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 320 с.
15. Хомик Н. І., Цьонь Г. Б., Довбуш Т. А. Навчальна практика : метод. посіб. для студентів спеціальності 208 «Агроінженерія». Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. 140 с.
16. Babii A., Dovbush T., Khomyk N., Dovbush A., Tson H., Oleksyuk V. Mathematical model of a loaded supporting frame of a solid fertilizers distributor. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.025>

17. Dovbush T., Khomyk N., Dovbush A., Palyukh A. Estimation of the load capacity and the strain-stress state of rod transporters. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2022. Vol. 108, No. 4. P. 5–15.
18. Dovbush T., Dovbush A., Khomyk N., Tson H. Substantiation of flexible screw conveyor metal consumption under productivity maintenance conditions. *Scientific Journal of TNTU*. 2021. Vol. 103, No. 3. P. 33–42.
19. Хомик Н. І., Цьонь Г. Б., Довбуш Т. А. Ознайомча практика : метод. посіб. для студентів спеціальності 208 «Агроінженерія». Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. 80 с.
20. Гевко І. Б., Довбуш Т. А., Цьонь О. П., Довбуш А. Д., Станько А. І. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями та результати їх дослідження. *Сільськогосподарські машини*. 2021. Вип. 47. С. 63–72.
21. Хомик Н. І., Довбуш Т. А., Цьонь Г. Б., Довбуш А. Д. Машини та обладнання для тваринництва : навч. посіб. до практичних занять та самостійної роботи. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. 360 с.
22. Nevko R., Lyashuk O., Dzyura V., Dovbush T., Trokhaniak O., Liashko A. Experimental studies of the process of loose material transportation by a pneumatic-screw conveyor. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2021. P. 479–487.
23. Rybak T., Popovych P., Khomyk N., Dovbush T., Tson H. Simulation calculations on quasistatic strength of structural elements of heavily loaded agricultural machines. *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka*. 2013. P. 321–326.
24. Хомик Н. І., Довбуш Т. А., Цьонь Г. Б. Машини та обладнання для тваринництва : навч.-метод. посіб. до виконання курсового проєкту. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2017. 84 с.
25. Dovbush T., Khomyk N., Dovbush A. Research of the mathematical model of the tribosystem head rod-bushing of the traction organ of rod transporters. *Scientific Journal of TNTU*. 2024. Vol. 115, No. 3. P. 112–121.

26. Гевко Р. Б., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Дячун А. Є., Залуцький С. З., Станько А. І., Довбуш Т. А. Гвинтові конвеєри з еластичними поверхнями. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2024. 239 с.
27. Дячун А. Є., Довбуш Т. А., Брикса А. О., Никитюк А. Г. Шнеки для змішування із спеціальними елементами // Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., Тернопіль, 28–29 травня 2025 р. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. С. 128–129.
28. Tson H., Dovbush T., Martyniuk V., Khomyk N., Stashkiv M., Dovbush A. Development of highly productive technological schemes for the use of agrodrones for plant protection. Scientific Journal of TNTU. 2025. Vol. 118, No. 2. P. 66–78.
29. Хомик Н. І., Довбуш Т. А. Обґрунтування силових факторів навантаженості пруткових транспортерів // Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., Тернопіль, 29–30 вересня 2022 р. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 140–141.
30. Nevko I., Liashuk O., Tson O., Dovbush T., Zalutskyi S., Stanko A. Installation for the investigation of screw working bodies with elastic surfaces and the results of their experimental tests. Scientific Journal of TNTU. 2021. Vol. 103, No. 3. P. 98–109.
31. Хомик Н. І., Довбуш Т. А., Дунець Б. Розрахунок ресурсу роботи конструктивної системи розкидача добрив // Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. Тернопіль : ТНТУ, 2018. С. 102–103.
32. Tson H., Baranovskyi V., Lyashuk O., Dovbush T. Experimental researches of parameters of the technological process of the improved beet tops purifier. Scientific Journal of TNTU. 2018. Vol. 92, No. 4. P. 60–67. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2018.04.060

33. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Довбуш Т. А., Хорошун Р. В., Гевко І. Б. Проектування трансформаційних причепів для оптимізації площ зберігання в автотранспортних підприємствах. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2025. Вип. 12(43), ч. 2. С. 236–243.
34. Олексюк А. В., Довбуш Т. А., Олексюк В. П. Пошук оптимальних конструкцій сепаруючих пристроїв картоплезбиральних машин // Актуальні задачі сучасних технологій : матеріали XIV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. С. 110–112.
35. Довбуш Т. А., Гевко Р. Б., Хомик Н. І. Спосіб авіаційної хімічної обробки рослин з використанням дронів-обприскувачів // Сучасні технології промислового комплексу-2020 : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., Херсон, 2019. Херсон : ХНТУ, 2019. С. 40–41.
36. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України / [В.О. Дубровін, Л.Д. Романчук, С.М. Кухарець, І.Г. Грабар, Л. В. Лось, Г.А. Голуб, С.В. Драгнев, В.М. Поліщук, В.В. Кухарець, І.В. Нездвецька, В.О. Шубенко, А.А. Голубенко, Н.М. Цивенкова]. – К.: Центр учбової літератури, 2014. – 335 с.
37. Інноваційні засоби розвитку нетрадиційних джерел енергії та організація ресурсовикористання. Федорейко В. С., Андрушків Б. М., Бойко О. Б., та ін. Монографія. Тернопіль: Терно-граф, 2016. 804 с. *ISBN 978-966-457-280-1*.

ДОДАТКИ

			Позначення	Найменування	кіл.	Прим.
				<i>Документація</i>		
			<i>КРБ 23-406.14.00</i>	<i>Складальне креслення</i>		
				<i>Деталі</i>		
	1	<i>КРБ 23-406.14.01</i>		<i>Штифт</i>	2	
	2	<i>КРБ 23-406.14.02</i>		<i>Барабан</i>	1	
	3	<i>КРБ 23-406.14.03</i>		<i>Корпус</i>	1	
	4	<i>КРБ 23-406.14.04</i>		<i>Колодка</i>	4	
				<i>Стандартні деталі</i>		
	5			<i>Штифт М8 8х30</i> <i>ГОСТ 5915-70</i>	1	
	6			<i>Гайка М8 - 6Н.5</i> <i>ГОСТ 5915-70</i>	2	
	7			<i>Шайба М8</i> <i>ГОСТ 5915-70</i>	2	
	8			<i>Шпонка 8х10х40</i> <i>ГОСТ 23360-78</i>	2	
КРБ 23-406.14.00 СК						
<i>Ізм</i>	<i>Лист</i>	<i>№докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		
<i>Розробив</i>	<i>Калтуцький Я.Б.</i>				<i>Лім</i>	<i>Лист</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цьонь Г.Б.</i>					<i>Листів</i>
<i>Консульт.</i>	<i>Цьонь Я.Б.</i>				<i>Муфта</i> <i>Складальне креслення</i> <i>ФМТ, гр. МГс-41</i>	
<i>Н.контр.</i>	<i>Сташків М.Я.</i>					
<i>Затв.</i>	<i>Бабій А.В.</i>					

№ поз.	Формат	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим
			<u>Документація</u>		
			<u>Складальний креслення</u>	1	
	A1	КРБ 23-419.12.00 СК	Шнек лопатевий	1	
			<u>Складальні одиниці</u>		
	A2	КРБ 23-419.12.01	Корпус РШ 110 ДСТУ EN 12516	1	
			<u>Детали</u>		
2	A4	КРБ 23-419.12.01.01	Втулка упорна	1	
3	A4	КРБ 23-419.12.01.02	Фланець наскрізний	1	
1	A3	КРБ 23-419.12.01.03	Вал	1	
8	A3	КРБ 23-419.12.01.04	Вал кінцевий	1	
10	A4	КРБ 23-419.12.01.05	Фланець глухий	1	
6	A4	КРБ 23-419.12.01.06	Лопать	1	
			<u>Стандартні вироби</u>		
5			Підшипник 2007112A	1	
7			Труба 7043,541250 ДСТУ EN 10216-1 / ДСТУ EN 10217-1	1	
9			Підшипник 2212	2	
11			Гайка M54Ч15-6H ДСТУ ISO 8673	1	
12			Шайба H.56.0105 ДСТУ ISO 7089 / ISO 7090	1	
13			Болт M8Ч60-6g ДСТУ ISO 4014	1	
			КРБ 23-419.12.00 СК		
Изм	Лист	№ докум	Підпис	Дата	
Разраб		Чорний Б.С.			Шнек лопатевий. Складальне креслення
Пров.		Цьонь Г.Б.			
Реценз.		Гевко І.Б.			
Н. Конт.		Сташків М.Я.			
Затв.		Бадій А.В.			
			Літер		
			У Д П 1 2		
			ФМТ, гр. МГс-41		