МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Семчук Дмитро Леонідович

УДК 631.22:631.3:662.767.2

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Механізація молочно-товарної ферми з модернізацією біогазової установки

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Семчук Д.Л.

Керівник роботи
Борак К.В.
доктор технічних наук, професор

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Семчук Дмитро Леонідович. Механізація молочно-товарної ферми з модернізацією біогазової установки. *– Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці проєкту механізації молочно-товарної ферми з удосконаленням технологічного процесу отримання біогазу. У роботі розглянуто сучасний стан механізації молочно-товарних ферм в Україні та країнах Європейського Союзу, а також визначено основні напрями підвищення ефективності виробничих процесів. Обґрунтовано доцільність застосування сучасного обладнання, автоматизованих систем керування, роботизованих засобів доїння, годівлі, видалення гною та цифрового моніторингу стану тварин. Особливу увагу приділено проблемі утилізації органічних відходів тваринництва, які можуть бути використані як сировина для виробництва біогазу. У конструктивній частині запропоновано удосконалення біогазової установки, що забезпечує ефективніше перемішування субстрату, покращення умов анаеробного бродіння та раціональне використання збродженої маси як органічного добрива. Виконано інженерні розрахунки основних елементів установки, зокрема резервуара, лопатевої мішалки та привода, що підтвердило працездатність запропонованого технічного рішення. У розділі з охорони праці визначено основні небезпечні фактори під час експлуатації молочно-товарної ферми та біогазової установки і запропоновано заходи для їх зменшення. Проведене техніко-економічне обґрунтування підтвердило доцільність упровадження проєктних рішень завдяки зменшенню енерговитрат, скороченню ручної праці та отриманню додаткового енергетичного ресурсу. Результати роботи можуть бути використані для модернізації молочно-товарних ферм, підвищення їх енергоефективності, екологічної безпеки та економічної результативності.

Ключові слова: молочно-товарна ферма, механізація, автоматизація, біогаз, біогазова установка, органічні відходи.

ANNOTATION

Dmytro Leonidovych Semchuk. Mechanisation of a dairy farm with modernisation of the biogas plant. *– Qualification work on the rights of the manuscript*.

Qualification work for obtaining a bachelor's degree in the specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

This thesis is devoted to the development of a mechanisation project for a commercial dairy farm, including the optimisation of the biogas production process. The thesis examines the current state of mechanisation on commercial dairy farms in Ukraine and the countries of the European Union, and identifies the main areas for improving the efficiency of production processes. The feasibility of using modern equipment, automated control systems, robotic milking, feeding and manure removal systems, and digital monitoring of animal health is justified. Particular attention is paid to the issue of utilising organic livestock waste, which can be used as raw material for biogas production. The design section proposes improvements to the biogas plant, ensuring more efficient mixing of the substrate, improved conditions for anaerobic digestion and the rational use of the digested mass as organic fertiliser. Engineering calculations were carried out for the main components of the plant, in particular the tank, the paddle mixer and the drive, confirming the feasibility of the proposed technical solution. The section on health and safety identifies the main hazards during the operation of a commercial dairy farm and a biogas plant and proposes measures to mitigate them. The technical and economic feasibility study confirmed the viability of implementing the proposed design solutions due to reduced energy consumption, a reduction in manual labour and the generation of an additional energy resource. The results of this work can be used to modernise dairy farms, improving their energy efficiency, environmental safety and economic performance.

Keywords: dairy farm, mechanisation, automation, biogas, biogas plant, organic waste.

ЗМІСТ

ВСТУП……6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ МЕХАНІЗАЦІЇ МОЛОЧНО-ТОВАРНИХ ФЕРМ В УКРАЇНІ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ І ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ТВАРИННИЦТВА……10
1.1. Значення механізації молочно-товарної ферми……10
1.2. Стан механізації молочно-товарних ферм в Україні……10
1.3. Стан механізації молочно-товарних ферм у Європейському Союзі……..12
1.4. Відходи тваринництва як сировина для отримання біогазу…….....…..14
1.5. Виробництво біогазу в Європі при утилізації відходів тваринництва…..15
1.6. Виробництво біогазу і біометану в Україні при утилізації відходів тваринництва……16
Висновки по розділу……18
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З МЕХАНІЗАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ МОЛОЧНО-ТОВАРНОЇ ФЕРМИ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНОГО ОБЛАДНАННЯ……..20
2.1. Загальна концепція механізації та автоматизації молочно-товарної ферми……..20
2.2. Модернізація технологічної лінії доїння та первинної обробки молока……21
2.3. Автоматизація годівлі, водопостачання та управління кормовим столом……22
2.4. Механізація видалення гною та підготовка сировини для біогазової установки……23
2.5. Автоматизація мікроклімату, освітлення та санітарного стану……24
2.6. Використання цифрового моніторингу та штучного інтелекту…….....24
2.7. Організація впровадження запропонованих заходів……25
2.8. Очікувані результати від упровадження заходів……27
Висновки по розділу……28

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МОБІЛЬНОЇ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ……...…….29
3.1 Конструктивні особливості резервуарів біогазових установок……..…29
3.2 Оптимізація роботи біогазових установок……...…….40
3.3 Розробка конструкції нової біогазової установки……..……..41
3.4 Розрахунок лопатевої мішалки……...……45
3.5 Розрахунок продуктивності біогазової установки……..…....47
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ……...……50
4.1 Загальні положення……...……..……50
4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів…….…...……51
4.3 Організаційні заходи охорони праці……...…….……..52
4.4 Технічні заходи безпеки під час експлуатації обладнання……..…53
4.5 Безпека експлуатації біогазової установки та дії в аварійних ситуаціях…….……54
Висновок до розділу……..55
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ……..56
5.1. Завдання та методика техніко-економічної оцінки……...……...…56
5.2. Вихідні дані для економічного розрахунку…….……57
5.3. Визначення капітальних вкладень у проєктне рішення……...…….……..59
5.4. Розрахунок експлуатаційних витрат……60
5.5. Визначення річного економічного ефекту……...….62
5.6. Розрахунок строку окупності та рентабельності……...……63
5.7. Економічна оцінка заходів механізації та автоматизації ферми……...….64
5.8. Чутливість економічного результату та умови ефективного впровадження……66
5.9. Узагальнення результатів техніко-економічного обґрунтування……...…69
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……...……70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..……73

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток аграрного виробництва потребує впровадження енергоощадних, екологічно безпечних та економічно ефективних технологій. Особливо актуальним це питання є для молочно-товарних ферм, де щоденно виконується значна кількість трудомістких операцій, пов’язаних з утриманням тварин, доїнням, годівлею, видаленням гною, забезпеченням мікроклімату, контролем стану поголів’я та утилізацією органічних відходів. Від рівня механізації та автоматизації цих процесів безпосередньо залежать продуктивність праці, собівартість молока, якість продукції, санітарний стан ферми та загальна ефективність господарювання.

Молочне скотарство є однією з важливих галузей тваринництва, яка забезпечує населення цінною харчовою продукцією та створює сировинну базу для переробної промисловості. Проте ефективність роботи молочно-товарних ферм в Україні часто обмежується недостатнім рівнем технічного оснащення, значною часткою ручної праці, високими витратами енергії та проблемами, пов’язаними з накопиченням і зберіганням гнойових відходів. За таких умов виникає необхідність комплексного підходу до модернізації ферм, який передбачає не лише оновлення машин і обладнання, а й упровадження автоматизованих систем керування технологічними процесами.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності молочно-товарних ферм є використання сучасних технічних засобів механізації та автоматизації. До них належать роботизовані доїльні установки, автоматизовані системи роздавання кормів, механізовані засоби видалення гною, системи моніторингу фізіологічного стану тварин, цифрові платформи управління стадом, датчики контролю продуктивності, а також елементи штучного інтелекту для аналізу виробничих показників.

З астосування таких рішень дозволяє зменшити вплив людського фактора, підвищити точність виконання технологічних операцій, покращити умови утримання тварин і забезпечити стабільність виробництва молока.

Водночас важливою проблемою функціонування молочно-товарних ферм є утворення значної кількості органічних відходів. Гній та гнойові стоки за неправильного зберігання можуть бути джерелом забруднення ґрунтів, водних ресурсів і атмосферного повітря. Крім того, під час природного розкладання органічної маси виділяються гази, що негативно впливають на довкілля та санітарний стан території ферми. Тому раціональна утилізація відходів тваринництва є важливою складовою сталого розвитку аграрного виробництва.

Одним із найбільш ефективних способів переробки органічних відходів є анаеробне зброджування з отриманням біогазу. Біогазова технологія дає змогу перетворити гній і гнойові стоки на корисний енергетичний ресурс, який може використовуватися для одержання теплової або електричної енергії. Крім того, після зброджування утворюється органічне добриво, придатне для внесення в ґрунт. Таким чином, використання біогазових установок на молочно-товарних фермах дозволяє одночасно вирішувати енергетичні, екологічні та економічні завдання.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи полягає в необхідності підвищення ефективності роботи молочно-товарної ферми шляхом удосконалення її технічного забезпечення, зменшення витрат ручної праці, раціонального використання органічних відходів та впровадження технології отримання біогазу. Запропоновані проєктні рішення спрямовані на поліпшення виробничих процесів, зниження енерговитрат, покращення екологічної безпеки та підвищення економічної результативності господарства.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка проєкту механізації молочно-товарної ферми з удосконаленням технологічного процесу

отримання біогазу шляхом застосування сучасних машин**,** обладнання та конструктивного вдосконалення біогазової установки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити так**і завдання**:

– проаналізувати сучасний стан механізації молочно-товарних ферм в Україні та країнах Європейського Союзу;

– розглянути особливості виробництва біогазу з органічних відходів тваринництва;

– обґрунтувати заходи з механізації та автоматизації основних технологічних процесів на фермі;

– запропонувати сучасні технічні рішення для підвищення ефективності роботи молочно-товарної ферми;

– розробити конструктивне вдосконалення біогазової установки;

– виконати необхідні інженерні розрахунки основних елементів установки;

– розглянути питання охорони праці під час експлуатації обладнання ферми та біогазової установки;

– провести техніко-економічне обґрунтування запропонованих проєктних рішень.

Об’єктом дослідження є технологічні процеси механізованого виробництва молока та утилізації органічних відходів на молочно-товарній фермі.

Предметом дослідження є технічні засоби механізації та автоматизації молочно-товарної ферми, а також технологічний процес отримання біогазу з відходів тваринництва.

У процесі виконання роботи використано методи аналізу науково-технічної літератури, порівняльної оцінки технічних рішень, інженерних розрахунків, техніко-економічного обґрунтування, а також методи узагальнення й систематизації інформації щодо сучасного обладнання для молочно-товарних ферм і біогазових установок.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Грудовий Р.С., Король Д.Р., Литвиненко В.Ю., **Семчук Д.Л.** Перспективні напрями механізації тваринництва в Україні. VI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі». Запоріжжя: ТДАТУ. URL: https://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/borak_26.pdf (дата звернення 02.06.2026).

2. Борак К.В., Шевчук О.А., **Семчук Д.Л.** Біоконверсія побічних продуктів тваринництва в біогаз. Збірник тез XII Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь». 29 квітня 2026 року. Житомир. Видавничий центр ЖАТФК. 2026. С. 39-141.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання запропонованих рішень для підвищення рівня механізації молочно-товарної ферми, зменшення трудомісткості виробничих операцій, покращення умов праці персоналу, зниження негативного впливу відходів тваринництва на довкілля та одержання додаткового енергетичного ресурсу у вигляді біогазу.

Отже, розробка проєкту механізації молочно-товарної ферми з удосконаленням технологічного процесу отримання біогазу є важливим і своєчасним завданням, яке відповідає сучасним вимогам енергоефективного, екологічно безпечного та економічно обґрунтованого аграрного виробництва.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 41 найменування. Загальний обсяг роботи становить 76 сторінок комп’ютерного тексту, містить 3 рисунки, 16 таблиць та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СТАНУ МЕХАНІЗАЦІЇ МОЛОЧНО-ТОВАРНИХ ФЕРМ В УКРАЇНІ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ І ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ТВАРИННИЦТВА

1.1. Значення механізації молочно-товарної ферми

Молочно-товарна ферма є складним виробничим об’єктом, у якому щоденно виконуються операції заготівлі й роздавання кормів, доїння, первинної обробки молока, напування, прибирання приміщень, видалення гною, підтримання мікроклімату та контролю здоров’я тварин. Рівень механізації цих процесів визначає продуктивність корів, якість молока, трудомісткість виробництва, санітарний стан приміщень і собівартість продукції. У сучасних умовах механізація повинна розглядатися не як набір окремих машин, а як цілісна технологічна система, у якій кормовий, молочний, гнойовий, енергетичний та інформаційний потоки узгоджені між собою.

Для теми даної кваліфікаційної роботи особливе значення має зв’язок між механізацією ферми і технологічним процесом отримання біогазу. Гній, гноївка, залишки кормів і стічні води є не лише відходами виробництва, а й сировиною для анаеробного зброджування. Якщо система гноєвидалення працює неритмічно, допускає надмірне розбавлення водою або забруднення сторонніми домішками, то стабільність біогазового процесу знижується. Тому проєктування біогазової установки доцільно починати з аналізу стану механізації основних процесів на фермі, насамперед годівлі, утримання та видалення гною.

Удосконалення механізації молочно-товарної ферми створює кілька взаємопов’язаних результатів. По-перше, зменшується частка ручної праці і залежність господарства від дефіциту кадрів. По-друге, стабілізуються умови утримання тварин, що позитивно впливає на надої та якість молока. По-третє, формується керований потік органічної сировини для біогазової установки.

По-четверте, господарство отримує можливість частково забезпечувати себе тепловою та електричною енергією, а після очищення біогазу – виробляти біометан.

1.2. Стан механізації молочно-товарних ферм в Україні

Молочне скотарство України має неоднорідну структуру. Поряд із сучасними промисловими комплексами, обладнаними доїльними залами, резервуарами-охолоджувачами, змішувачами-роздавачами кормів і механізованими системами гноєвидалення, функціонує значна кількість старих ферм та господарств населення. У 2024 році в Україні було вироблено близько 7,2 млн т молока, з яких на промисловий сегмент припало приблизно 3,0 млн т, а на господарства населення – близько 4,2 млн т [3]. Це свідчить, що значна частина молока все ще виробляється у секторі з нижчим рівнем механізації, тоді як саме промислові ферми є основною базою для впровадження сучасних технологій і біогазових установок.

Різниця у технічному рівні помітно відображається на продуктивності. За даними Держстату, середній річний удій молока від однієї корови в Україні у 2024 році становив близько 5,7 т; на промислових підприємствах – близько 8,2 т, у фермерських господарствах – 7,1 т, а в господарствах населення – близько 4,7 т [3]. Таке розходження пояснюється не лише породним складом стада, а й рівнем механізації годівлі, доїння, охолодження молока, вентиляції, напування та ветеринарного контролю. Сучасне обладнання забезпечує стабільний режим роботи, зменшує стрес тварин і дає можливість вести облік продуктивності кожної корови.

Для багатьох українських МТФ характерною є часткова механізація. Наприклад, ферма може мати доїльний зал типу «ялинка» або «паралель», але використовувати застарілі скреперні транспортери, відкриті гноєсховища чи недостатньо ефективну вентиляцію. На старих об’єктах зберігаються приміщення з прив’язним утриманням, обмеженою площею на одну голову, низькою технологічною гнучкістю та значною часткою ручних робіт. За

оцінками галузевих експертів, понад 60% молочно-товарних ферм України потребують глибокої модернізації для наближення до європейських вимог благополуччя тварин [4].

Найбільш поширеними технічними рішеннями на промислових фермах України є тракторні або самохідні змішувачі-роздавачі кормів, доїльні зали, молокопроводи, танки-охолоджувачі, скреперні установки, гнойові насоси, автоматичні поїлки, вентилятори та системи освітлення. Натомість роботизоване доїння, автоматичні підгортачі корму, роботи для очищення проходів, датчики жуйки, активності та інші елементи точного тваринництва поширені переважно на нових або інвестиційно сильних підприємствах. Це означає, що найближчий резерв підвищення ефективності полягає у комплексній реконструкції базових технологічних ліній.

З позиції біогазового виробництва слабким місцем багатьох ферм є саме система поводження з гноєм. Для стабільної роботи біореактора потрібно забезпечити регулярне надходження субстрату, достатню вологість, відсутність сторонніх домішок, перемішування та дозовану подачу. Якщо гній накопичується у відкритих майданчиках без контролю вологості, то частина органічної речовини втрачається, зростають запахи й викиди метану. Тому модернізація гноєвидалення має бути першочерговою умовою впровадження біогазової установки на МТФ.

1.3. Стан механізації молочно-товарних ферм у Європейському Союзі

Молочне виробництво Європейського Союзу характеризується вищим рівнем спеціалізації, автоматизації та контролю якості. У 2024 році фермиЄС виробили близько 161,8 млн т сирого молока, а середній умовний надій на одну молочну корову досяг 8120 кг [1]. Поголів’я великої рогатої худоби у ЄС у 2024 році становило близько 72 млн голів і продовжувало скорочуватися, однак виробництво молока залишається стабільним завдяки

підвищенню продуктивності, кращій організації годівлі, селекції, механізації та цифровому управлінню стадом [2].

Для багатьох європейських МТФ типовими є безприв'язне утримання, комфортні бокси, вільний доступ до корму і води, механізоване прибирання проходів, точне приготування повнораціонних сумішей, автоматичне охолодження молока, контроль мікроклімату та використання програм управління стадом. У країнах із розвиненим молочним сектором – Німеччині, Нідерландах, Данії, Франції, Польщі, Ірландії – поширені доїльні зали високої пропускної здатності, автоматичні доїльні системи, датчики рухової активності й жуйки, електронна ідентифікація, вагові платформи, автоматичні підгортачі корму і роботи-скрепери.

Одним із головних напрямів є роботизоване доїння. Матеріали EU CAP Network зазначають, що автоматичні доїльні системи активно впроваджуються через нестачу кваліфікованої робочої сили, потребу у стандартизованій процедурі доїння та позитивний вплив на благополуччя корів [5]. У такій системі корова ідентифікується електронним датчиком, після чого робот виконує підготовку вимені, приєднання доїльних стаканів, контроль молоковіддачі, промивання та передавання даних у програму управління стадом. Водночас вибір між роботом і традиційним доїльним залом залежить від розміру ферми, вартості праці, планування приміщень і доступності сервісу.

Європейська практика свідчить, що автоматизація не обмежується доїнням. У дослідженні молочних ферм Німеччини зазначено, що доїння займає понад чверть трудових витрат, годівля – близько 21%, а догляд за підстилкою, телятами і видаленням гною також потребує значного часу [7]. Тому фермери механізують рутинні операції, щоб зменшити фізичне навантаження, підвищити якість виконання робіт і залишити більше часу для управлінських рішень. Для України цей досвід важливий, оскільки дефіцит кадрів у сільській місцевості також стає істотним фактором модернізації.

Важливою відмінністю ЄС є інтеграція механізації з екологічними вимогами. Системи зберігання і переробки гною мають зменшувати втрати азоту, запахи, забруднення води та викиди парникових газів. Біогазові установки часто працюють при фермах або кооперативах, приймають гній, гноївку, залишки кормів та інші органічні відходи, а після зброджування повертають дигестат на поля. Таким чином, гноєвидалення, біогазова переробка і внесення органічних добрив розглядаються як єдина система управління поживними речовинами.

1.4. Відходи тваринництва як сировина для отримання біогазу

Основними органічними відходами молочно-товарної ферми є гній, гноївка, залишки кормів, підстилка і стічні води від миття обладнання. Ці матеріали містять органічну речовину та поживні елементи, але за неконтрольованого зберігання стають джерелом запахів, втрат азоту, забруднення території та викидів метану. Анаеробне зброджування дає змогу перевести цей потік у керований технологічний процес: органічна частина перетворюється на біогаз, а після зброджування утворюється дигестат, який може використовуватися як органічне добриво.

Типовий процес отримання біогазу з відходів ВРХ включає механізоване збирання гною в корівнику, транспортування скреперами або насосами, накопичення в приймальній ємності, перемішування, дозовану подачу в метантенк, анаеробне зброджування, відведення біогазу, очищення від вологи та сірководню, а також використання газу в когенераційній установці або його очищення до біометану. Для стабільності процесу необхідні сталі температура, вологість, pH, відсутність токсичних домішок і рівномірне завантаження субстрату.

Біогаз складається переважно з метану та вуглекислого газу. За даними Української енергетики, біогазові установки виробляють газ приблизного складу 55% метану і 45% CO_2, а після відділення CO_2 отримують біометан із вмістом метану понад 96% [10]. Для ферми це відкриває два практичні

напрями: виробництво тепла й електроенергії для власних потреб або отримання біометану, близького за властивостями до природного газу. У першому випадку біогаз може забезпечувати роботу насосів, вентиляції, освітлення, підігрів води та обігрів біореактора; у другому – створювати товарний енергетичний продукт.

Гній ВРХ має важливу перевагу – він утворюється регулярно і може подаватися до біогазової установки протягом усього року. Недоліком є нижчий вихід газу порівняно з енергетичними культурами або відходами переробки. Тому доцільним є використання гною як базового субстрату з можливим додаванням залишків кормів, силосу, жому або інших органічних ко-субстратів. Однак для молочно-товарної ферми головною метою має бути саме екологічна утилізація власних відходів і зменшення витрат на енергію, а не лише максимальний вихід газу.

1.5. Виробництво біогазу в Європі при утилізації відходів тваринництва

Європейський біогазовий сектор сформувався як інструмент відновлюваної енергетики, управління органічними відходами та скорочення викидів парникових газів. За даними European Biogas Association, у 2023 році біогаз і біометан забезпечили близько 22 млрд м³ відновлюваного газу на європейському ринку, а виробництво біометану в Європі зросло на 0,8 млрд м³; у межах ЄС темп зростання становив 21% [8]. Це свідчить про перехід від традиційного використання біогазу для електроенергії до активного розвитку біометану як відновлюваного аналога природного газу.

Стратегічним орієнтиром ЄС є нарощування виробництва біометану до 35 млрд м³ у 2030 році в межах плану REPowerEU. Оцінки Gas for Climate показують, що в ЄС достатньо сталих ресурсів для досягнення цієї мети, а серед ключових субстратів для анаеробного зброджування названо гній, аграрні залишки та проміжні культури [9]. Для молочного скотарства це означає, що гній ВРХ розглядається як важлива частина енергетичного

балансу ферми та регіону, а не як відхід, який потрібно лише вивезти за межі тваринницького приміщення.

У країнах ЄС використовуються різні організаційні моделі біогазового виробництва. Великі ферми часто будують власні установки, де гній і залишки кормів подаються безпосередньо з ферми до приймальної ємності. У регіонах із дрібнішими господарствами поширені кооперативні біогазові станції, що приймають сировину від кількох виробників і повертають дигестат на поля. Така модель знижує інвестиційне навантаження на окрему ферму, забезпечує професійне обслуговування обладнання і дозволяє сформувати стабільний обсяг субстрату.

Європейський досвід важливий для України тим, що біогазова установка розглядається як частина фермерської інфраструктури. Її ефективність залежить від планування корівників, каналів гноєвидалення, насосних станцій, метантенків, сховищ дигестату, теплових мереж і під'їзних шляхів. Якщо ці елементи узгоджені, зменшуються витрати на транспортування сировини, підвищується безпека обслуговування і створюються умови для раціонального використання тепла, електроенергії та органічного добрива.

1.6. Виробництво біогазу і біометану в Україні при утилізації відходів тваринництва

Україна має значний потенціал для розвитку біогазу на базі аграрного сектору, однак фактичний рівень використання відходів тваринництва поки що залишається нижчим, ніж у країнах ЄС. За даними Біоенергетичної асоціації України, на кінець 2021 року в державі були побудовані та мали досвід експлуатації щонайменше 77 біогазових підприємств; у 2021 році було отримано близько 260 млн м³ біогазу [11]. Частина установок працювала на полігонах твердих побутових відходів, а частина – на сільськогосподарських і промислових відходах. Це свідчить про наявність технічної бази, але також про великий резерв для подальшого зростання.

Сировинна база українських агробіогазових установок включає гній ВРХ, свинячий гній, пташиний послід, жом цукрових буряків, барду, силос, залишки кормів і відходи харчової промисловості. Для молочно-товарної ферми найбільш логічним є використання гною ВРХ у поєднанні з доступними ко-субстратами. Такий підхід дає змогу одночасно вирішувати санітарну проблему, зменшувати викиди метану при зберіганні гною, отримувати енергію і повертати поживні речовини на поля у вигляді дигестату.

Після 2022 року розвиток біогазових проєктів в Україні ускладнився воєнними ризиками, подорожчанням обладнання, проблемами фінансування та пошкодженням інфраструктури. Водночас енергетична нестабільність підвищила інтерес аграрних підприємств до власних джерел енергії. Біогазова установка на МТФ може забезпечувати теплом підігрів води, обігрів біореактора, частину потреб у електроенергії для насосів, освітлення, вентиляції та охолодження молока. Це особливо важливо для ферм, які прагнуть зменшити залежність від зовнішніх енергоносіїв.

Окремим напрямом стала поява українського ринку біометану. Держенергоефективності повідомляє, що у 2025 році Україна розпочала перші поставки біометану до ЄС, їх сумарний обсяг перевищив приблизно 11,2 млн м³, а в країні працювали 7 біометанових заводів із загальною потужністю понад 110 млн м³ на рік [12]. Показовим прикладом є тестова поставка компанії VITAGRO у лютому 2025 року: до Німеччини було експортовано біометан, вироблений зі 100% відходів тваринництва, обсягом близько 68 тис. м³ [13]. Це підтверджує реальну можливість використання тваринницьких відходів як сировини для сертифікованого відновлюваного газу.

Основними бар’єрами для поширення біогазових установок на українських МТФ є недостатня концентрація поголів’я на малих фермах, зношеність старих приміщень, потреба у реконструкції гноєвидалення, висока вартість обладнання, складність підключення до мереж і нестача

підготовленого персоналу. Тому доцільним є поетапний підхід: спочатку модернізація гноєвидалення, приймальних ємностей і сховищ, далі встановлення системи гомогенізації та дозування, після цього – будівництво метантенка і когенераційного модуля, а на наступному етапі – очищення біогазу до біометану.

Отже, біогазова установка повинна розглядатися як складова загальної механізації молочно-товарної ферми. Її ефективність залежить від стабільної роботи кормового, молочного і гнойового потоків, від якості сировини та можливості використати отриману енергію безпосередньо у господарстві. Для українських умов найбільш перспективними є проєкти, у яких біогазова технологія одночасно зменшує екологічне навантаження, підвищує енергетичну незалежність ферми і покращує використання органічних добрив.

Висновки по розділу

Проведений аналіз показує, що рівень механізації молочно-товарних ферм є ключовим чинником ефективності молочного виробництва. В Україні сучасні промислові ферми вже використовують доїльні зали, кормозмішувачі, охолоджувачі молока, вентиляцію та скреперні системи, однак значна частина господарств потребує реконструкції. У Європейському Союзі механізація має більш комплексний характер і поєднує автоматизоване доїння, точну годівлю, цифровий контроль стада, механізоване гноєвидалення та екологічні технології поводження з відходами.

Виробництво біогазу з відходів тваринництва є перспективним напрямом підвищення ефективності МТФ. Гній ВРХ може бути стабільною сировиною для анаеробного зброджування, а отриманий біогаз використовується для виробництва тепла й електроенергії або очищується до біометану. Європейський досвід підтверджує, що біогазові установки найкраще працюють тоді, коли інтегровані у загальну технологічну схему ферми та систему управління поживними речовинами.

Для подальшого проєктування молочно-товарної ферми доцільно розглядати біогазову установку не як окремий енергетичний об’єкт, а як продовження механізованої системи гноєвидалення. Удосконалення технологічного процесу отримання біогазу має передбачати ритмічне збирання гною, гомогенізацію, дозовану подачу сировини, контроль режиму зброджування, ефективне використання тепла й електроенергії та раціональне внесення дигестату на поля. Такий підхід забезпечує економічний, енергетичний та екологічний ефект від модернізації ферми.

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З МЕХАНІЗАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ МОЛОЧНО-ТОВАРНОЇ ФЕРМИ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНОГО ОБЛАДНАННЯ

2.1. Загальна концепція механізації та автоматизації молочно-товарної ферми

Молочно-товарна ферма є виробничою системою безперервної дії, у якій щоденно виконуються операції годівлі, доїння, напування, догляду за тваринами, видалення гною, охолодження молока та підтримання мікроклімату. Тому модернізація ферми має розглядатися не як заміна окремих машин, а як створення інтегрованої технологічної системи. Її завданням є поєднання кормового, молочного, гнойового, енергетичного та інформаційного потоків у єдиний керований комплекс, здатний працювати стабільно за мінімальної участі ручної праці.

Сучасний розвиток молочного скотарства в Європейському Союзі та Україні спрямований на впровадження точного тваринництва, робототехніки, цифрових датчиків і штучного інтелекту. EU CAP Network у 2025 році окремо розглядав практичне використання роботів та ШІ в аграрному виробництві [1]. У звіті OECD зазначається, що штучний інтелект може зменшувати потребу в ручній праці, підтримувати прогнозну аналітику та розширювати можливості моніторингу тварин [2]. Для молочної ферми це означає перехід від епізодичного ручного контролю до постійного аналізу даних у реальному часі.

У проєкті доцільно прийняти безприв'язне боксове утримання корів із поділом стада на технологічні групи: дійні корови високої продуктивності, корови середньої продуктивності, сухостійна група, нетелі, молодняк і телята.

Така схема полегшує використання роботизованого доїння, автоматичних селекційних воріт, кормових роботів, датчиків активності,

камер комп'ютерного зору та гноєприбиральних систем. Головна мета запропонованих заходів полягає у підвищенні продуктивності праці, стабілізації якості молока, поліпшенні умов утримання тварин і створенні надійної сировинної бази для біогазової установки.

2.2. Модернізація технологічної лінії доїння та первинної обробки молока

Доїння є центральною технологічною операцією молочно-товарної ферми, оскільки воно визначає якість основної продукції, ритм роботи персоналу і режим переміщення тварин. У проєкті пропонується застосувати роботизоване або високоавтоматизоване доїння з ідентифікацією корів за RFID-мітками, обліком надоїв, контролем електропровідності молока, швидкості молоковіддачі, тривалості доїння та санітарного стану обладнання. Автоматизація цієї операції знижує вплив людського фактора і дає змогу обслуговуючому персоналу більше часу приділяти проблемним тваринам.

Одним із можливих рішень є використання доїльних роботів типу Lely Astronaut, DeLaval VMS або GEA DairyRobot. У системах добровільного доїння корова самостійно підходить до робота, а програмне забезпечення вирішує, чи потрібно її доїти відповідно до часу після попереднього доїння, стадії лактації, очікуваного надою та ветеринарних обмежень. Lely підкреслює принцип вільного руху корів, за якого тварина сама обирає час для годівлі, відпочинку та доїння [3]. DeLaval описує VMS V300 як автоматизований процес із використанням датчиків, робототехніки та даних у реальному часі [4], а GEA позиціонує DairyRobot R9500 як цілодобову систему добровільного доїння з меншими вимогами до постійного нагляду оператора [5].

Первинна обробка молока повинна бути повністю узгоджена з доїльною системою. Для цього передбачаються санітарний молокопровід, фільтрація, пластинчастий попередній охолоджувач, резервуар-охолоджувач, автоматична CIP-мийка та електронна реєстрація температури. Теплу воду

після теплообміну можна частково використовувати для санітарних потреб ферми, що підвищує енергоефективність. Дані про надої, температуру, відхилення якості молока і результати мийки мають зберігатися в електронному журналі та використовуватися для аналізу продуктивності, раннього виявлення маститів і підтвердження якості продукції.

2.3. Автоматизація годівлі, водопостачання та управління кормовим столом

Годівля є найбільш витратною частиною молочного виробництва, тому її автоматизація повинна забезпечувати точність раціонів, рівномірне споживання корму і зменшення втрат. Проєктом передбачається використання змішувача-роздавача з ваговою системою або автономного кормового робота, який дозує компоненти, готує повнораціонну кормову суміш і роздає її окремим технологічним групам. Для кожної групи корів у програмі формується власний рецепт, що враховує продуктивність, фазу лактації та фізіологічний стан тварин.

Сучасним рішенням є роботизоване приготування і роздавання кормів. Наприклад, GEA DairyFeed F4500, за даними виробника, може зважувати, змішувати й роздавати до 2,2 м3 TMR-суміші за годину для 300 тварин у різних групах [6]. Якщо господарство впроваджує автоматизацію поетапно, першим кроком може бути електронне зважування компонентів і програмний контроль раціону, а другим - перехід до повністю автономного кормороздавання. Такий підхід знижує ризик технологічних помилок і полегшує контроль фактичних витрат кормів.

Окремо слід механізувати підштовхування корму на кормовому столі. Коли корм відсувається від зони доступу, корови менше споживають сухої речовини, зростає конкуренція, а продуктивність стає менш стабільною. Робот Lely Juno автоматизує цю повторювану операцію і підтримує доступність корму протягом доби [7]. У проєкті доцільно передбачити його рух уздовж кормового столу кілька разів на добу, особливо після основної

роздачі корму і в нічний період. Для телят рекомендується автоматична станція випоювання, яка ідентифікує тварину, видає потрібну порцію молока або замінника і фіксує швидкість споживання.

2.4. Механізація видалення гною та підготовка сировини для біогазової установки

Для даної кваліфікаційної роботи гнойовий потік має особливе значення, оскільки він пов'язаний з технологічним процесом отримання біогазу. На звичайній фермі видалення гною розглядають переважно як санітарну операцію, а на фермі з біогазовою установкою гній стає енергетичною сировиною. Тому він повинен збиратися регулярно, без надмірного розбавлення водою, без тривалого зберігання у корівнику та з мінімальними втратами органічної речовини.

Для очищення проходів можна застосувати стаціонарні скрепери, роботизовані скрепери або вакуумні гноєприбиральні роботи залежно від конструкції підлоги. Lely Discovery Collector збирає гній вакуумним способом і сприяє чистоті копит, хвостів та вимені [8]. DeLaval Robot Scraper працює автономно, рухається з низькою швидкістю і призначений для очищення підлоги без суттєвого турбування тварин [9]. Такі системи особливо важливі для корівників із вільним рухом тварин, де чистота проходів впливає на здоров'я копит і якість молока.

Зібраний гній повинен надходити до приймального каналу або проміжного збірника, звідки насосом подається до гомогенізаційної ємності. У цій ємності встановлюється мішалка для вирівнювання вологості та складу субстрату. За потреби перед реактором передбачають подрібнювач або мацератор, а також дозувальний насос, який подає сировину малими порціями відповідно до графіка роботи біогазової установки. Автоматизація гнойового потоку має включати датчики рівня, контроль роботи насосів, аварійне сповіщення і журнал подачі субстрату. Це забезпечує стабільність анаеробного зброджування та зменшує ризик технологічних збоїв.

2.5. Автоматизація мікроклімату, освітлення та санітарного стану

Мікроклімат у корівнику впливає на споживання корму, молочну продуктивність, відтворення і загальний стан тварин. За підвищеної температури та вологості корови переходять у стан теплового стресу, зменшують споживання корму, частіше стоять і гірше відпочивають. Тому проєктом передбачається автоматизована система вентиляції, яка включає бокові штори, конькову витяжку, вентилятори, датчики температури, вологості, аміаку та вуглекислого газу.

Керування вентиляторами і шторами має здійснюватися за алгоритмом, який враховує температуру, вологість, час доби та показники стану тварин. У літній період доцільним є використання систем охолодження біля кормового столу, щоб стимулювати споживання корму. Автоматизоване LED-освітлення повинно забезпечувати рівномірне світло в зонах годівлі, проходах, біля доїльних роботів і селекційних воріт. Датчики освітленості дають змогу зменшити витрати електроенергії, оскільки система коригує роботу світильників залежно від природного світла.

Санітарний стан ферми підтримується не лише прибиранням гною, а й автоматизацією мийки доїльного обладнання, контролем концентрації мийних засобів, температури розчину і тривалості циклів. У проходах доцільно використовувати ванни для копит із контролем кількості проходів та своєчасною заміною розчину. Якщо цифрова система фіксує зменшення часу лежання, зростання випадків кульгавості або зниження активності корів, оператор повинен перевірити не лише здоров'я тварин, а й параметри мікроклімату та чистоту приміщення.

2.6. Використання цифрового моніторингу та штучного інтелекту

Цифровий моніторинг є основою сучасної автоматизованої ферми. Дані з доїльних роботів, датчиків активності, RFID-ідентифікації, вагових платформ, камер, датчиків мікроклімату, кормових систем і біогазової установки повинні надходити до єдиної програми управління стадом. У

картці кожної тварини фіксуються походження, вік, лактація, продуктивність, осіменіння, отелення, лікування, зміни активності, показники молока і результати ветеринарних оглядів.

Штучний інтелект доцільно використовувати для аналізу тих процесів, які складно постійно контролювати людині. Насамперед це раннє виявлення маститу, кульгавості, теплового стресу, порушень відтворення, зміни вгодованості та відхилень у поведінці. В Україні вже з'являються приклади практичного застосування таких рішень: у 2026 році повідомлялося про молочну ферму на Черкащині, де камери контролюють вгодованість корів, кульгавість і дотримання працівниками технологічних протоколів [10]. Це підтверджує, що ШІ стає реальним інструментом управління фермами, а не лише перспективною ідеєю.

Для проєктованої ферми доцільно передбачити три рівні цифровізації. Перший рівень - базовий електронний облік стада, надоїв, осіменінь і ветеринарних операцій. Другий рівень - автоматичний моніторинг активності, жуйки, мікроклімату, годівлі та гнойового потоку. Третій рівень - прогнозна аналітика, яка формує попередження і пропонує оператору дію: оглянути корову, перевести її в іншу групу, змінити раціон, перевірити насос або відкоригувати вентиляцію. При цьому основні операції повинні працювати локально навіть у разі тимчасової втрати інтернет-з'єднання, а хмарні сервіси використовуються для звітності та дистанційного аналізу.

2.7. Організація впровадження запропонованих заходів

Модернізацію ферми доцільно виконувати поетапно. На першому етапі слід упровадити обладнання, яке найбільше впливає на якість молока і трудомісткість робіт: автоматизоване доїння, охолодження молока, електронний облік, механізовану годівлю та видалення гною. На другому етапі встановлюються датчики активності, камери, система мікроклімату, селекційні ворота і програмна платформа управління стадом. На третьому етапі ферма інтегрується з біогазовою установкою через автоматизовану

підготовку і дозування субстрату, контроль енергоспоживання і використання тепла.

Перед запуском роботизованого доїння необхідно адаптувати стадо до нового руху. Корів поступово привчають до проходу через робот, селекційні ворота і отримання концентрованого корму у доїльній станції. У перші тижні частина тварин потребує підведення до робота, але після стабілізації відвідувань система зменшує потребу в ручному доїнні. Персонал повинен пройти навчання не лише з експлуатації обладнання, а й з аналізу повідомлень, ведення електронних журналів і базової діагностики несправностей.

Важливо передбачити сервісне забезпечення. Доїльні роботи потребують регулярної перевірки датчиків, мийної автоматики, гумових деталей і вакуумної системи. Кормові роботи потребують контролю ваг, навігації, шнеків і акумуляторів. Гноєприбиральні системи потребують очищення, перевірки насосів, датчиків рівня і станцій заряджання. Для зменшення простоїв потрібні електронний журнал технічного обслуговування, комплект основних запасних частин і договір сервісної підтримки з постачальником.

Таблиця 2.1 – Основні заходи механізації та автоматизації ферми

Ділянка	Рішення	Функція	Очікуваний результат
Доїння	Доїльні роботи або автоматизований зал з RFID	Автоматичне доїння, облік надоїв, контроль молока	Менше ручної праці, стабільна якість продукції
Охолодження молока	Пластинчастий охолоджувач, танк, CIP-мийка	Швидке охолодження і санітарне миття	Збереження якості молока, економія енергії
Годівля	Змішувач-роздавач з вагами або кормовий робот	Дозування, змішування і роздавання TMR	Точні раціони, менші втрати корму
Кормовий стіл	Робот-підштовхувач корму	Регулярне підсування корму	Краще споживання сухої речовини
Телята	Автоматична станція випоювання	Індивідуальне дозування молока або ЗЦМ	Контроль росту і раннє виявлення проблем

Продовження таблиці 2.1

Гній	Скрепери, вакуумні роботи, насоси, мішалки	Збирання і подача гною до збірника	Чистота корівника і стабільна сировина для біогазу
Біогазова лінія	Гомогенізатор, мацератор, дозувальний насос	Підготовка і рівномірна подача субстрату	Стабільне анаеробне зброджування
Мікроклімат	Датчики, вентилятори, штори, LED-освітлення	Автоматичне регулювання умов утримання	Менше теплового стресу, кращий комфорт
Здоров’я тварин	Датчики активності, камери, аналітика ШІ	Виявлення маститу, кульгавості, охоти, стресу	Раннє реагування і менші втрати продуктивності
Управління фермою	Програмна платформа, мобільні додатки, CMMS	Об’єднання даних і планування завдань	Оперативне управління і контроль витрат

2.8. Очікувані результати від упровадження заходів

Упровадження запропонованих заходів забезпечує комплексний технологічний ефект. У молочному блоці очікується стабілізація режиму доїння, зменшення впливу людського фактора, кращий контроль якості молока і своєчасне виявлення відхилень. У кормовому блоці підвищується точність раціонів, поліпшується доступ корів до корму, зменшуються залишки на кормовому столі і з'являється можливість швидко коригувати годівлю за фактичними даними продуктивності.

У блоці утримання тварин результатом є чистіші проходи, менше забруднення копит і вимені, контроль теплового стресу та кращий санітарний стан приміщень. Завдяки датчикам активності, камерам і цифровим журналам ферма отримує інструмент раннього реагування на хвороби, кульгавість, проблеми відтворення і зниження споживання корму. Це зменшує ризик виробничих втрат і підвищує довговічність корів у стаді.

Для біогазового напряму головний результат полягає у перетворенні гною з проблемного відходу на керований енергетичний ресурс. Автоматизоване прибирання, гомогенізація і дозована подача субстрату створюють умови для стабільного анаеробного зброджування. Крім біогазу, ферма отримує дигестат, який після належного зберігання може

використовуватися як органічне добриво. Отже, механізована молочно-товарна ферма з цифровим управлінням і біогазовою установкою є перспективною моделлю енергоефективного та екологічно безпечного виробництва.

Висновки по розділу

У розділі розроблено комплекс заходів з механізації та автоматизації молочно-товарної ферми, який охоплює доїння, годівлю, водопостачання, мікроклімат, санітарний стан, видалення гною, цифровий моніторинг і підготовку сировини для біогазової установки. Обґрунтовано, що ферму доцільно модернізувати як єдину технологічну систему, у якій обладнання, програмне забезпечення і персонал працюють узгоджено.

Найбільш важливими рішеннями визначено роботизоване доїння, автоматичну ідентифікацію корів, точну годівлю, роботизоване підштовхування корму, автоматичне випоювання телят, механізоване прибирання гною, датчики мікроклімату, камери комп'ютерного зору і програмну систему управління стадом. Штучний інтелект запропоновано використовувати для раннього виявлення хвороб, кульгавості, змін вгодованості, охоти та порушень технологічних протоколів.

Особливу увагу приділено гнойовому потоку, оскільки для ферми з біогазовою установкою гній є основною сировиною. Запропоновано використовувати регулярне автоматизоване збирання гною, гомогенізаційну ємність, подрібнення, дозувальні насоси і систему аварійного сповіщення. Це створює передумови для стабільного виробництва біогазу, зниження екологічного навантаження і підвищення енергетичної автономності ферми.

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МОБІЛЬНОЇ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Конструктивні особливості резервуарів біогазових установок

Метантенк є центральним елементом біогазової установки, оскільки саме в ньому відбувається анаеробне перетворення органічної маси на горючий газ і зброджений залишок. Тому конструкція резервуара повинна забезпечувати герметичність, технологічну надійність, зручність обслуговування, допустимі теплові втрати та економічну доцільність виготовлення. Для фермерських умов особливо важливими є простота завантаження гною, можливість вивантаження дигестату, безпечне відведення газу і стійкість корпусу до корозійного впливу середовища.

За геометричною формою реактори біогазових установок можуть мати різне виконання. У практиці застосовують такі основні типи резервуарів:

– яйцеподібні;

– циліндричні;

– сферичні або кулеподібні;

– циліндричні з конічною верхньою, нижньою або двосторонньою частиною;

– траншейні;

– прямокутні або кубічні;

– гнучкі, виконані з еластичних полімерних матеріалів [24].

Найкращі умови для руху субстрату створюють резервуари обтічної форми. Яйцеподібні корпуси дають змогу зменшити гідравлічний опір під час перемішування, обмежити утворення застійних зон та спрямувати накопичення осаду і газу до відповідних технологічних зон.

Близькими до них за експлуатаційними властивостями є реактори з конічними днищами, а також циліндричні резервуари із правильно підібраною системою перемішування. Матеріал корпусу обирають з урахуванням об’єму, вартості, строку експлуатації та умов монтажу: для

великих установок поширені залізобетон і сталь, для менших – склопластик та полімерні матеріали.

За кількістю робочих камер установки поділяють на однореакторні та багатореакторні. Однореакторна схема є простішою і дешевшою, однак вона гірше пристосована до безперервного режиму. Багатореакторні системи, навпаки, дають змогу розділити стадії бродіння, стабілізувати процес і підвищити продуктивність, що важливо для великих тваринницьких підприємств [24].

Найпростішими у виготовленні залишаються циліндричні, кубічні та сферичні місткості. У невеликих господарствах їх нерідко виготовляють на базі наявних металевих цистерн, бочок або інших технологічних ємностей. Такий підхід зменшує початкові витрати, але потребує ретельної перевірки герметичності, антикорозійного захисту та можливості встановлення запобіжних пристроїв.

До корпуса біореактора висувають підвищені вимоги. Він має витримувати внутрішній тиск, не пропускати газ і рідину, зберігати тепло, протидіяти корозії та дозволяти виконувати профілактичний огляд. Крім того, конструкція повинна мати вузли для подавання сировини, відведення збродженої маси, встановлення мішалки, приладів контролю і газовідвідної арматури [25]. Загальний принцип роботи установок однаковий: підготовлена до необхідної вологості сировина надходить у герметичний реактор, де за відсутності кисню підтримуються умови для розвитку метаноутворювальних мікроорганізмів [26].

Фактичний вихід біогазу залежить не лише від складу сировини, а й від конструктивного рішення установки. Найбільше значення мають такі параметри [27]:

– ступінь заповнення робочого об’єму і кількість субстрату, що припадає на одиницю корисного об’єму реактора;
– тривалість перебування органічної маси в зоні анаеробного бродіння;
– інтенсивність та рівномірність перемішування субстрату в резервуарі.

Якщо ці умови не виконуються, частина органічної речовини не встигає розкластися, утворюються осади, погіршується теплообмін і знижується вихід газу. Тому при виборі конструкції потрібно оцінювати не лише її вартість, а й здатність підтримувати стабільний технологічний режим.



Рис. 3.1. Класифікація біогазових реакторів за конструктивними ознаками

Форма реактора безпосередньо впливає на характер циркуляції рідкої біомаси, умови руйнування поверхневої кірки та ефективність відведення осаду. З цієї причини для інтенсивного зброджування доцільними є резервуари без гострих кутів. Яйцеподібний корпус вважається найбільш сприятливим для перемішування та накопичення біогазу, але при великих об’ємах його будівництво потребує значних витрат. Для установок меншої продуктивності можливе застосування склопластикових корпусів, які мають меншу масу, достатню корозійну стійкість і простішу технологію монтажу.

Циліндричний реактор із конічними верхньою та нижньою частинами поєднує порівняно просте виготовлення із прийнятними умовами для відведення газу і вивантаження збродженого осаду. Недоліком такої форми є

менш досконала циркуляція субстрату порівняно з яйцеподібним корпусом. Тому для таких реакторів особливо важливо правильно розмістити перемішувальний пристрій і забезпечити достатню інтенсивність руху рідкої фази [29].

Класичні циліндричні резервуари найбільш поширені завдяки простоті виготовлення та наявності досвіду будівництва сільськогосподарських ємностей. Такі корпуси можуть виконуватися зі сталі, бетону або склопластика. Разом з тим у циліндричних місткостях складніше запобігти утворенню осаду і плаваючої кірки, тому зростає потреба в енерговитратах на перемішування та очищення внутрішніх поверхонь [14].

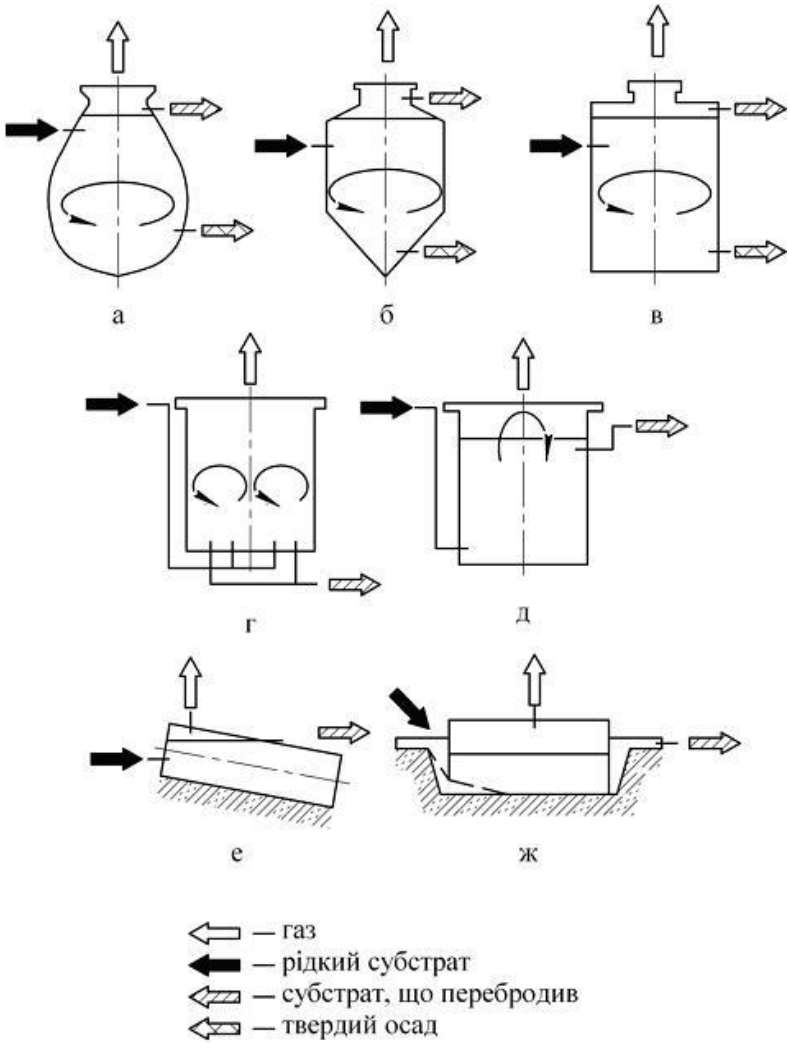


Рис. 3.2. Основні форми резервуарів біогазових реакторів

Для невеликих установок, які споруджують без складного промислового обладнання, іноді застосовують прямокутні бродильні камери у вигляді басейну або герметичної ями. Щоб підвищити ефективність,

внутрішній об’єм поділяють перегородкою на головну камеру зброджування і камеру доброджування. Це дозволяє частково впорядкувати рух субстрату та зменшити винос незбродженої маси з реактора.

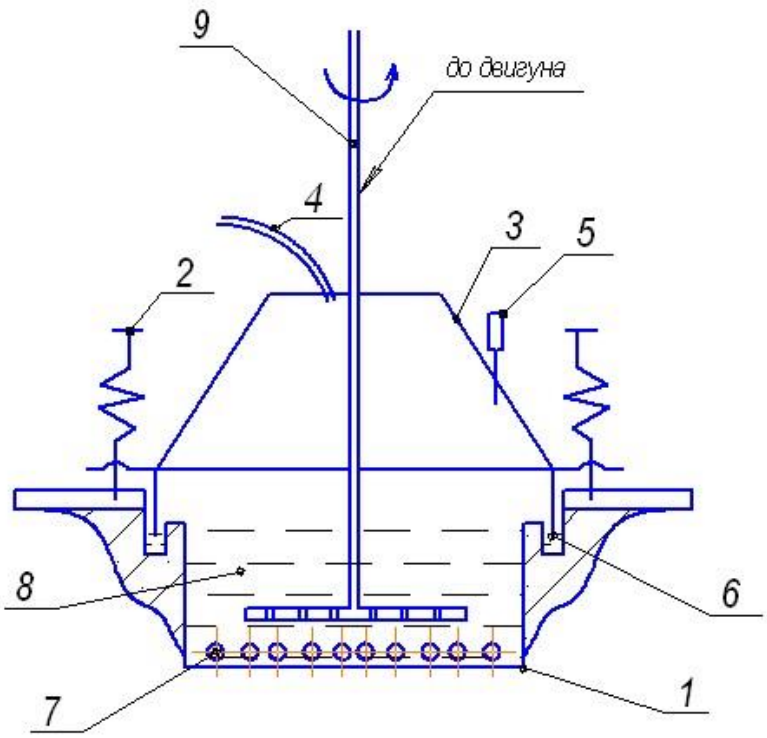


Рис. 3.3. Типова конструкція біореактора: 1 – корпус; 2 – напрямні ковпака; 3 – ковпак; 4 – газовідвідна трубка; 5 – манометр; 6 – гідрозатвори; 7 – нагрівальний елемент; 8 – субстрат; 9 – мішалка.

Типові прості біореактори мають обмежені можливості регулювання процесу. У них важко точно підтримувати час перебування маси в робочому об’ємі, забезпечувати однакову температуру по всій глибині та керувати режимом завантаження. Через це знижується повнота розкладання органічної речовини, а видалення осаду і руйнування кірки потребують додаткових витрат [30].

Більш раціональним варіантом є двокамерне виконання, коли циліндричний резервуар розділяють поперечною перегородкою. У такому разі камери можуть працювати почергово або послідовно, що підвищує стабільність процесу. Крім того, один спільний корпус з перегородкою дешевший за два окремі резервуари, а теплові втрати через внутрішню стінку практично не впливають на навколишнє середовище. У перегородці також

можна розмістити нагрівальні елементи, що спрощує підтримання температурного режиму [31].

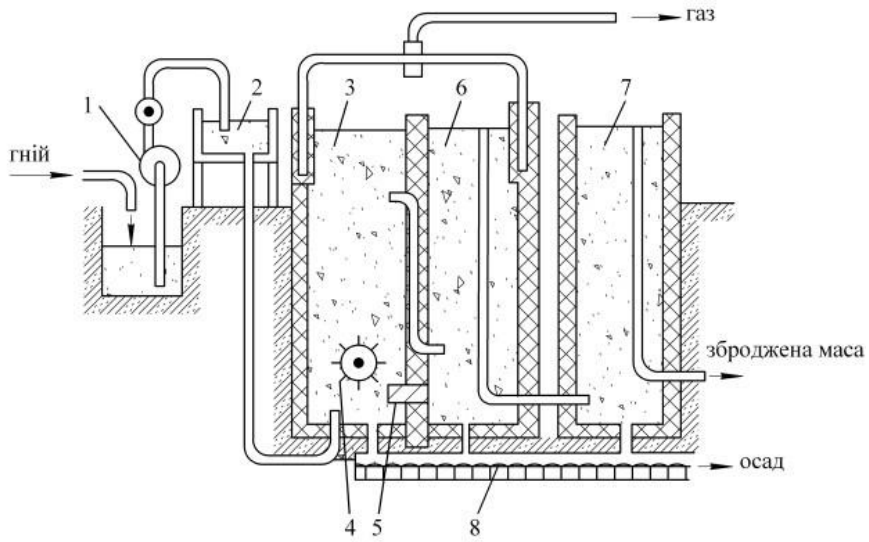


Рис. 3.4. Двокамерна біогазова установка проточного типу: 1 – насос; 2 – приймальна камера; 3 – бродильна камера; 4 – перемішувальний пристрій; 5 – підігрівач біомаси; 6 – камера остаточного зброджування; 7 – збірник зброженої маси; 8 – шнек.

У горизонтальних реакторах рух субстрату відбувається переважно вздовж осі корпусу. Таке компонування зручне для компактних установок і дає змогу розміщувати перемішувальний механізм у поздовжньому напрямі. Нахилене встановлення корпусу полегшує самоплинне переміщення відпрацьованої маси до вивантажувального патрубка [32].

Траншейні реактори доцільні тоді, коли необхідно обробляти значні обсяги органічної маси при відносно простій будівельній частині. Їх стінки, як правило, виконують із бетону, а верхню частину накривають газонепроникним покриттям або еластичним газозбірником. Гній, розбавлений водою, надходить із тваринницького приміщення в бродильну камеру, де перемішується і поступово зброджується.

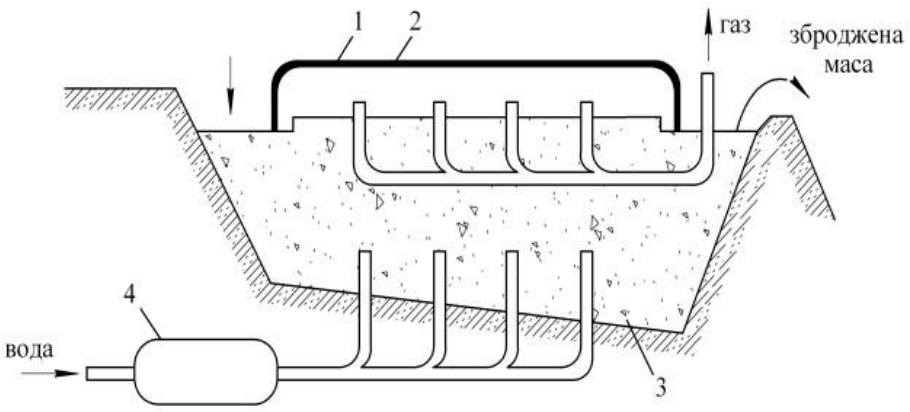


Рис. 3.5. Траншейна біогазова установка: 1 – еластичний збірник біогазу; 2 – теплоізоляційні плити; 3 – бродильна камера; 4 – нагрівач.

Окрему групу становлять еластичні реактори, що виготовляються з армованих полімерних матеріалів, синтетичних плівок або прогумованої тканини. Їх перевагами є невисока вартість, швидкий монтаж і мала маса. Недоліками є потреба в захисті від механічних пошкоджень, обмежений термін служби та необхідність встановлення в заглибленні або в міцному огородженні.

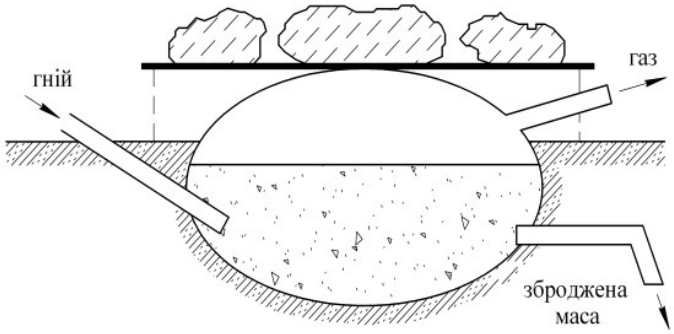


Рис. 3.6. Еластичний біогазовий реактор.

Для нормального перебігу анаеробного зброджування в реакторі необхідно одночасно забезпечити низку технологічних умов [3]:

– повну відсутність доступу кисню до робочого середовища;

– підтримання заданої температури з мінімальними коливаннями;

– наявність поживних речовин, необхідних для розвитку мікрофлори;

– узгодження тривалості бродіння з режимом завантаження і вивантаження;

– стабільний кислотно-лужний стан середовища;

– оптимальне співвідношення вуглецю та азоту;

– потрібний вміст сухої речовини і якісне перемішування;

– відсутність речовин, які пригнічують активність бактерій.



Рис. 3.7. Фактори, що впливають на оптимізацію анаеробного бродіння.

Ефективно організована біогазова установка дає господарству не лише енергетичний, а й санітарно-екологічний ефект. Вона зменшує витрати на традиційні види палива, дозволяє отримувати стабілізоване органічне добриво, скорочує обсяг відходів у місцях зберігання та зменшує забруднення повітря і води. Після анаеробного бродіння гній втрачає різкий запах, частково знезаражується, а поживні речовини переходять у більш доступну для рослин форму.

Важливою складовою установки є система накопичення газу. У процесі метанового бродіння біогаз збирається у верхній частині реактора, створюючи надлишковий тиск. Якщо газ не відводити своєчасно, це погіршує умови реакції та може створювати небезпечні ситуації. Оскільки споживання біогазу протягом доби і року нерівномірне, його доцільно акумулювати у газгольдерах.

Залежно від способу зберігання застосовують такі типи газгольдерів:

– підземні порожнини або спеціально підготовлені резервуари у газонепроникних породах;

– абсорбційні системи, де метан під тиском розчиняється у рідкому середовищі;

– криогенні сховища, у яких газ переходить у рідкий стан при наднизькій температурі;

– резервуари високого тиску для промислових обсягів газу;

– газгольдери низького тиску для невеликих фермерських установок.

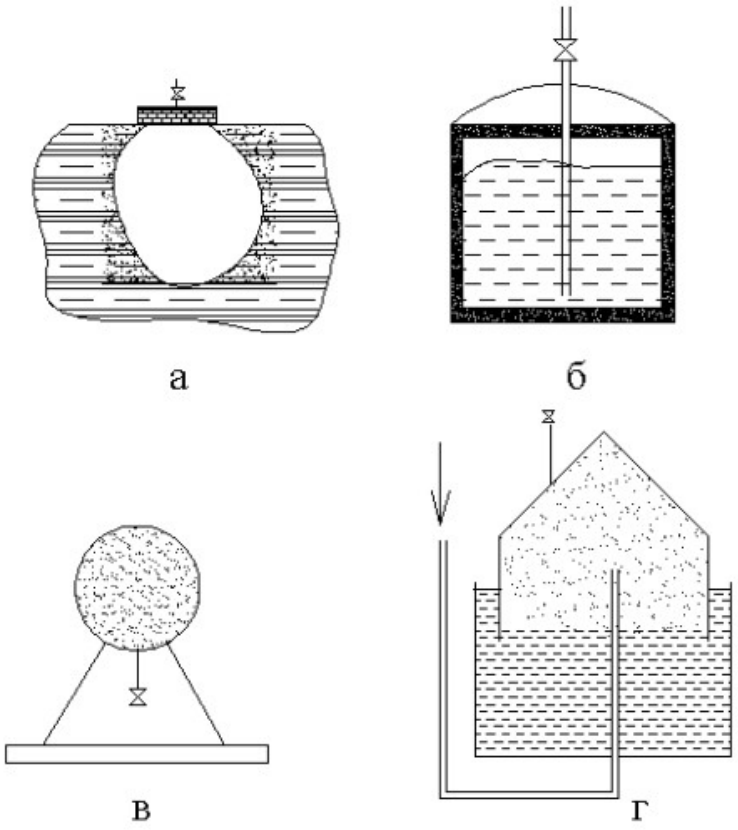


Рис. 3.8. Типи газгольдерів для зберігання біогазу.

Вибір газгольдера здійснюють за об’ємом виробництва газу, режимом споживання, вартістю, вимогами безпеки та можливістю технічного обслуговування. Для невеликих господарств найбільш виправданими є газгольдери низького тиску, які можуть виконуватися у вигляді герметичних еластичних або металевих ємностей [8].

Слід враховувати, що біогаз є вибухонебезпечною газовою сумішшю, а його окремі компоненти можуть бути шкідливими для людини. При концентрації метану в повітрі приблизно 5...15 % утворюється вибухонебезпечне середовище [3]. Тому приміщення з газовим обладнанням повинні мати вентиляцію, пристрої захисту від зворотного полум’я, редуктори, запобіжні клапани, газоаналізатори та відсікаючі пристрої.

Газопроводи необхідно регулярно перевіряти на герметичність, оскільки неочищений біогаз може спричиняти корозію металевих елементів.

Для підвищення виходу біогазу особливе значення має перемішування. Воно вирівнює температуру в об’ємі реактора, розподіляє поживні речовини, руйнує плаваючу кірку та запобігає осіданню твердих частинок на дні. У біогазових установках застосовують механічне, гідравлічне й газове перемішування. Найбільш універсальним для фермерських реакторів є механічний спосіб, оскільки він забезпечує керований рух субстрату та може бути реалізований відносно простими робочими органами [13].

Механічні мішалки поділяють на лопатеві, пропелерні, турбінні, шнекові, рамні, якірні та інші спеціальні конструкції. Турбінні перемішувачі формують інтенсивні радіальні потоки, пропелерні – переважно осьову циркуляцію, а шнекові ефективні при роботі з в’язкими масами. Дискові та скребкові мішалки в анаеробній біоконверсії застосовуються рідше через меншу доцільність для рідких гнойових субстратів.



Рис. 3.9. Класифікація перемішувальних пристроїв біогазових реакторів

Лопатеві мішалки є простими, дешевими і технологічними у виготовленні. Їх доцільно використовувати в установках, де не потрібна дуже інтенсивна радіально-осьова циркуляція. Рамні та якірні мішалки працюють на малих обертах і можуть зменшувати місцеве перегрівання, а шнекові конструкції придатні для більш густих середовищ, оскільки створюють спрямований потік при відносно невеликих витратах енергії.

Підвищення інтенсивності анаеробного бродіння може здійснюватися за рахунок різних схем перемішування. У технічних рішеннях застосовують лопатеві перемішувачі, шнекові органи та вертикальні пропелерні мішалки. Кожна конструкція має власну область раціонального використання, що визначається в’язкістю субстрату, об’ємом реактора, способом нагрівання та вимогами до енергоефективності.

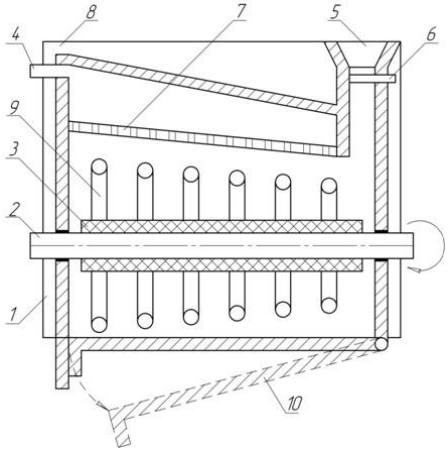


Рис. 3.10. Біогазовий реактор з лопатевим перемішувачем.

Реактор із лопатевим перемішувачем складається з резервуара, завантажувального бункера, шиберної засувки, підігрівача, газорозподільної решітки та вузла відведення біогазу. Біомаса надходить у корпус, нагрівається і перемішується лопатями, завдяки чому температура та склад середовища вирівнюються. Після завершення циклу зброджений залишок видаляється через нижню частину резервуара.

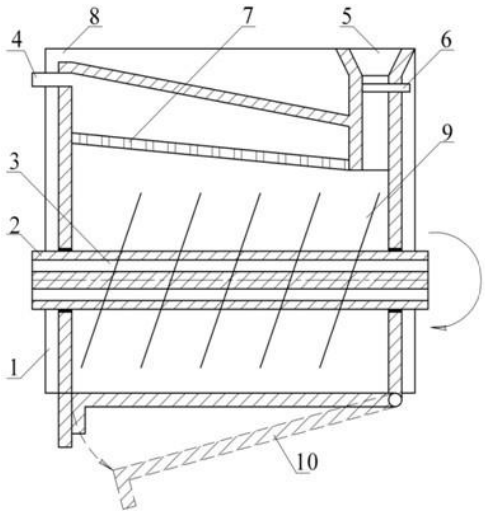


Рис. 3.11. Біогазовий реактор із шнековим перемішувачем.

Шнековий перемішувач створює поздовжню циркуляцію і забезпечує кращий рух в’язкої біомаси. У такій конструкції підігрівач може розміщуватися всередині вала, що покращує передачу тепла. Завдяки поєднанню перемішування і прогрівання підвищується рівномірність процесу, а отже, зростає потенційний вихід біогазу.

3.2 Оптимізація роботи біогазових установок

Оптимізація роботи біогазової установки – це сукупність технічних і технологічних рішень, спрямованих на отримання стабільного виходу газу при мінімальних енергетичних витратах. Для цього потрібно знати добову кількість сировини, її вологість, вміст органічної речовини, співвідношення вуглецю і азоту, а також можливі коливання складу гною протягом року.

На молочно-товарній фермі основним видом сировини є гній великої рогатої худоби. Від однієї корови масою близько 500 кг за добу можна отримати значну кількість сухої органічної речовини, яка після анаеробного зброджування перетворюється на біогаз. Для підвищення газоутворення до гною можуть додаватися інші органічні відходи, зокрема рослинні рештки, солома, відходи кормів або інші компоненти, здатні збалансувати поживне середовище [16, 17].

Одним із ключових чинників є співвідношення C:N. Якщо в субстраті надлишок азоту, може накопичуватися аміак, який пригнічує метаноутворювальні бактерії. Якщо ж надмірний вміст вуглецю, процес сповільнюється через нестачу азотистого живлення. Для коригування складу до гною ВРХ доцільно додавати подрібнену солому або інші матеріали з високим вмістом вуглецю.

Інтенсивність метаногенезу також залежить від кислотності середовища. Використання мийних або дезінфекційних засобів може змінити pH гною, що негативно впливає на біологічний процес. Тому перед подаванням у реактор бажано контролювати кислотно-лужний стан субстрату і не допускати потрапляння речовин, які пригнічують мікрофлору.

Важливим напрямом оптимізації є раціональне використання виробленого біогазу. Найдоцільніше спрямовувати його на виробництво електроенергії та тепла в когенераційній установці. Отримане тепло може використовуватися для підігрівання реактора, приготування гарячої води, обігріву технологічних приміщень або сушіння продукції. Такий підхід підвищує енергетичну незалежність ферми і скорочує витрати на зовнішні енергоносії.

Зброджений залишок після реактора має цінність як органічне добриво. У ньому зберігаються азот, фосфор і калій, а частина органічних сполук переходить у більш доступну для рослин форму. На відміну від свіжого гною, дигестат має менш виражений запах, нижчу біологічну активність патогенних мікроорганізмів та кращі технологічні властивості для внесення в ґрунт [19].

Рідка фракція після відстоювання також може бути використана в системі безвідходного виробництва. Її доцільно застосовувати як поживний розчин, технологічну воду або компонент для повторного зброджування за умови дотримання санітарних вимог. Такий підхід зменшує втрати азоту та підвищує загальну ефективність перероблення органічних відходів.

Отже, оптимізація біогазової установки повинна охоплювати три взаємопов’язані напрями: підготовку субстрату, керування процесом бродіння та раціональне використання кінцевих продуктів. Лише комплексне врахування цих чинників дозволяє забезпечити стабільну роботу установки на молочно-товарній фермі.

3.3 Розробка конструкції нової біогазової установки

Проєктування нової біогазової установки доцільно розпочинати з аналізу наявних технічних рішень. Таке порівняння дає змогу визначити сильні сторони відомих конструкцій і виявити недоліки, які потрібно усунути при розробленні нового зразка. Для умов фермерського господарства особливо актуальними є простота монтажу, мобільність, можливість

суміщення перероблення гною з транспортуванням добрива та зменшення витрат на допоміжне обладнання.

Аналіз існуючих біогазових установок показує, що значна частина з них має низку обмежень [28]:

– потребу в додаткових місткостях для зберігання і транспортування збродженого субстрату;

– накопичення осаду на внутрішніх поверхнях реактора при тривалій роботі;

– складність очищення корпусу після завершення циклу;

– високу вартість промислових установок великої продуктивності;

– жорстку прив’язку до місця монтажу;

– підвищені вимоги до електробезпеки при використанні електроприводів мішалок.

З метою усунення зазначених недоліків запропоновано конструкцію мобільної біогазової установки. Її особливість полягає у поєднанні функцій реактора, транспортної ємності і засобу внесення збродженого залишку на поле. Така схема дає змогу зменшити кількість стаціонарних резервуарів, скоротити операції перевантаження та підвищити практичну придатність установки для невеликих і середніх ферм.

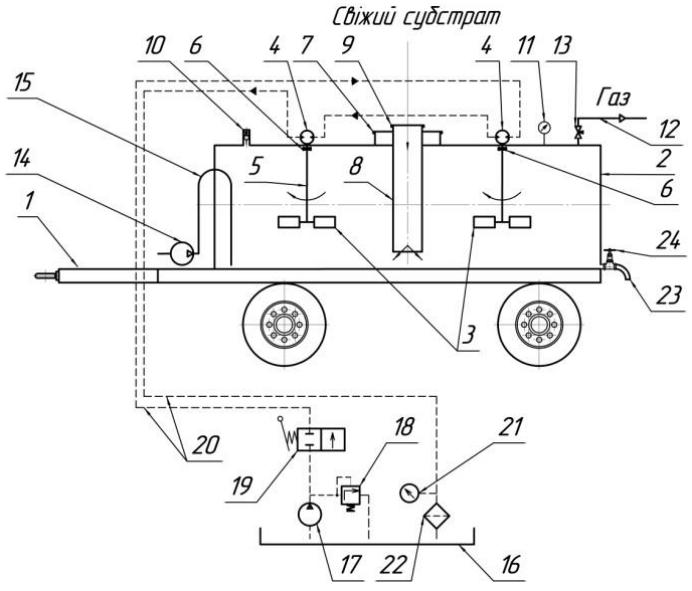


Рис. 3.12. Конструктивна схема мобільної біогазової установки.

Мобільна установка складається з шасі 1, на якому закріплено резервуар-реактор 2. Усередині резервуара встановлено дві лопатеві мішалки 3. Обертання мішалок забезпечують гідромотори 4, розміщені на корпусі реактора. Лопаті закріплені на валу 5, який з'єднується з приводом за допомогою муфти 6. У верхній частині корпусу передбачено люк 7 із додатковою горловиною 8 та кришкою 9 для завантаження субстрату.

Для контролю й безпечної роботи на резервуарі встановлено запобіжний клапан 10, манометр 11, газопровід 12 і кран 13. У передній частині передбачено фекальний насос 14, приєднаний до трубопроводу 15, що доходить до нижньої точки резервуара. Привід мішалок та насоса може здійснюватися від гідросистеми енергозасобу або окремої насосної станції. До її складу входять гідробак 16, насос 17, перепускний клапан 18, розподільник 19, гідропроводи 20, манометр 21 і фільтр робочої рідини 22. Для вивантаження зброджeного субстрату в нижній задній частині резервуара розміщено зливний трубопровід 23 та кран 24.

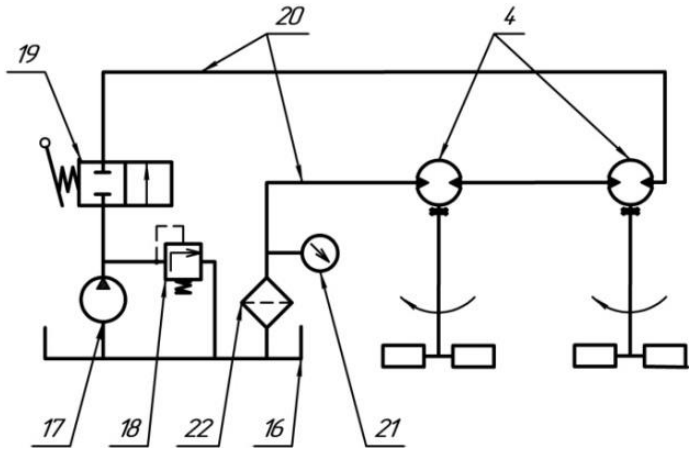


Рис. 3.13. Гідравлічна схема привода мішалок.

Робочий цикл установки можна поділити на кілька послідовних етапів: завантаження субстрату, анаеробне зброджування з періодичним перемішуванням, відведення біогазу, транспортування зброджeної маси та її внесення в ґрунт. Установка розміщується біля місця накопичення гною або поряд із вигрібною ямою. Субстрат подають у резервуар через горловину, після чого його розбавляють водою для отримання потрібної консистенції.

Робочий об’єм доцільно заповнювати приблизно на дві третини, залишаючи простір для накопичення газу.

Після завантаження запускають гідропривід перемішувального механізму. Гідронасос створює тиск у напірній магістралі, а після переведення розподільника в робоче положення гідромотори приводять лопатеві мішалки в обертання. Перемішування виконується періодично, наприклад один раз на 12 годин, що забезпечує рівномірний розподіл тепла та поживних речовин без надмірних витрат енергії.

У процесі бродіння газ накопичується у верхній частині реактора. Тиск контролюється манометром, а при досягненні заданого значення біогаз через кран і газопровід подається до газгольдера. Запобіжний клапан запобігає небезпечному перевищенню тиску. Після завершення газоутворення газопровід від’єднують, тиск у корпусі вирівнюють з атмосферним, а установку транспортують до місця внесення добрива.

Під час транспортування коливання рідкої маси сприяють змиванню відкладень з внутрішніх стінок резервуара. Це є додатковою перевагою мобільної схеми, оскільки зменшується потреба в ручному очищенні. На полі відкривають зливний кран, створюють надлишковий тиск або використовують насосну подачу, після чого зброджений субстрат вивантажується через трубопровід і розподіляється по поверхні ґрунту. Після спорожнення резервуар повертають до місця завантаження, і цикл повторюється.

Запропонована конструкція має такі переваги: поєднання реактора і транспортної ємності, скорочення кількості допоміжних операцій, можливість періодичного механічного перемішування, використання гідравлічного привода замість електричного та спрощене очищення стінок резервуара. Для молочно-товарної ферми така установка може бути ефективним рішенням при локальному переробленні гною і використанні дигестату як органічного добрива.

3.4 Розрахунок лопатевої мішалки

Розрахунок перемішувального пристрою виконують з метою вибору конструкції мішалки, визначення її основних розмірів, потужності привода, діаметра вала та перевірки робочих елементів на міцність. Для біогазового реактора доцільно застосувати лопатеву мішалку, оскільки вона має просту будову, може працювати в середовищі напіврідкого гною і не потребує складного обслуговування.

Вихідними даними для розрахунку є діаметр апарата D, робочий тиск, температура, густина та в’язкість субстрату, геометричні параметри лопатей, частота обертання, а також конструктивні обмеження, пов’язані з розміщенням мішалки в резервуарі. За даними досліджень, раціональна частота обертання лопатей у біогазових установках знаходиться в межах 30...100 об/хв [2]. Для проєктованої установки частоту обертання приймають у зазначеному діапазоні з урахуванням в’язкості субстрату та необхідної інтенсивності перемішування.

На першому етапі визначають режим руху середовища за числом Рейнольдса:

$$R_e = (\rho \cdot n \cdot d^2) / \mu, \tag{3.1}$$

де ρ – густина субстрату, кг/м³; n – частота обертання, с⁻¹; d – діаметр мішалки, м; μ – динамічна в’язкість середовища, Па·с.

За отриманим значенням R_e і типом мішалки вибирають критерій потужності. Потужність, необхідну для перемішування, визначають залежністю:

$$N = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5, \tag{3.2}$$

де K_N – критерій потужності, який залежить від типу мішалки та режиму руху субстрату [6].

Номінальну потужність на валу привода обчислюють з урахуванням втрат у передачі:

$$N_{дв} = (N + N_тр) / \eta, \tag{3.3}$$

де $N_{тр}$ – потужність, що витрачається на подолання механічного тертя; η – коефіцієнт корисної дії привода.

$$N_тр = f \cdot N, \tag{3.4}$$

де f – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати в опорах, ущільненнях і муфтах.

Діаметр вала мішалки визначають за умовою міцності при кручення:

$$d_в = \sqrt[3]{(16 \cdot M_кр / (\pi \cdot [\tau]))}, \tag{3.5}$$

де $M_{кр}$ – розрахунковий крутний момент, Н·м; [τ] – допустиме напруження на кручення для матеріалу вала, МПа.

$$M_{кр} = N_дв / \omega, \tag{3.6}$$

$$\omega = \pi \cdot n / 30, \tag{3.7}$$

де ω – кутова швидкість вала, $с^{-1}$; n – частота обертання, об/хв.

Перевірку міцності вала виконують за умовою:

$$\tau = M_{кр} / W_p \leq [\tau]. \tag{3.8}$$

Робочі лопаті також перевіряють на згин у небезпечному перерізі. Умова міцності має вигляд:

$$\sigma = M_{зг} / W \leq [\sigma], \tag{3.9}$$

де M_зг – згинальний момент у місці кріплення лопаті; W – момент опору перерізу; [σ] – допустиме напруження на згин.

$$W = b \cdot \delta^2 / 6, \tag{3.10}$$

де b – ширина лопаті; δ – товщина лопаті. Для лопатевих мішалок розміри робочого органу приймають з урахуванням внутрішнього діаметра реактора, допустимих зазорів і технологічних вимог до перемішування.

$$M_{зг} = P \cdot l, \tag{3.11}$$

$$P = M_{кр} / r, \tag{3.12}$$

де P – розрахункове зусилля на лопаті; l – плече дії сили; r – радіус прикладання крутного моменту.

За результатами розрахунку приймають ширину лопаті у найбільш навантаженому перерізі 38 мм. Це значення відповідає конструктивним

вимогам і забезпечує необхідний запас міцності. Якщо умова $\sigma \leq [\sigma]$ виконується, робочий орган придатний для використання в заданих умовах.

Далі виконують розрахунок резервуара метантенка. Товщину стінки корпусу визначають за умовою міцності циліндричної обичайки під внутрішнім тиском:

$$s = (p \cdot D) / (2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - p) + c + c_д, \quad (3.13)$$

де p – розрахунковий тиск, МПа; D – внутрішній діаметр резервуара, м; $[\sigma]$ – допустиме напруження матеріалу, МПа; φ – коефіцієнт міцності зварного шва; c – припуск на корозію; $c_д$ – додатковий конструктивний припуск.

Максимальний тиск у біогазових установках обмежують допустимим рівнем, тому для розрахунку приймають $p \leq 0{,}5$ МПа. Коефіцієнт міцності поздовжнього зварного шва для якісно виконаного автоматичного зварювання приймають $\varphi = 1$.

Припуск на корозію визначають з урахуванням проникності матеріалу і прийнятого строку експлуатації:

$$c = П \cdot T, \quad (3.14)$$

де П – швидкість корозійного зношування матеріалу, м/рік; T – строк служби резервуара, років. Остаточну товщину стінки приймають за найближчим більшим значенням зі стандартного ряду листового металу [7].

3.5 Розрахунок продуктивності біогазової установки

Продуктивність біогазової установки визначається кількістю субстрату, що надходить у реактор за добу, тривалістю зброджування, об’ємом метантенка та питомим виходом біогазу. Для тваринницьких ферм важливим показником є ступінь розкладання сухої органічної речовини, оскільки від нього залежать обсяг утвореного газу та якість збродженого добрива [17].

Добову дозу завантаження приймають відповідно до кількості гною, що надходить від поголів’я. У даному випадку для розрахунку прийнято добове завантаження реактора 130 кг, що відповідає приблизному виходу

гною від чотирьох корів. Цей параметр визначає навантаження на одиницю об’єму реактора і впливає на тривалість перебування субстрату в зоні бродіння.

Ступінь розпаду органічної речовини можна оцінювати через залежність, що враховує дозу завантаження, густину біогазу, питомий вихід газу, густину біомаси, вологість і зольність субстрату:

$$\eta_р = f(D_з, \rho_г, q_г, \rho_б, W, A), \quad (3.15)$$

де $D_з$ – доза добового завантаження метантенка, %; $\rho_г$ – густина біогазу, кг/м³; $q_г$ – питомий вихід біогазу, м³/добу; $\rho_б$ – густина біомаси, кг/м³; W – вологість біомаси, %; A – зольність біомаси, %.

Оскільки точний вихід біогазу без експериментального визначення встановити складно, на етапі проєктування об’єм реактора доцільно визначати за добовим надходженням біомаси та тривалістю циклу:

$$V_р = (G_{доб} \cdot \tau) / (\rho_б \cdot k_в), \quad (3.16)$$

де $G_{доб}$ – добова маса біомаси, кг/добу; τ – тривалість зброджування, діб; $\rho_б$ – густина біомаси, кг/м³; $k_в = 0{,}95$ – коефіцієнт використання об’єму метантенка.

За результатами розрахунку для проєктованої установки приймають об’єм реактора 5 м³. Таке значення забезпечує достатній запас робочого простору для завантаження, перемішування та накопичення газу, а також відповідає мобільному виконанню установки.

Доза добового завантаження є одним із головних параметрів роботи метантенка. Вона визначає питомий вихід біогазу з одиниці об’єму, ступінь зброджування органічної речовини, рівень знезараження гною та розміри реактора. У практиці рекомендовані значення можуть істотно відрізнятися залежно від температурного режиму, складу сировини і типу установки, тому остаточний режим потрібно уточнювати під час експлуатації.

Енергетична ефективність установки може оцінюватися за умовою отримання товарного біогазу або за часткою енергії, що витрачається на власні потреби. Якщо значна частина виробленої енергії використовується на

підігрівання реактора, перемішування чи транспортування субстрату, економічний ефект зменшується. Тому при розробці конструкції важливо знижувати тепловтрати, забезпечувати раціональний режим перемішування і використовувати тепло біогазу максимально повно.

Загальне рівняння теплового балансу біогазової установки можна подати у вигляді:

$$Q_{доб} = Q_н + Q_{тр1} + Q_м + Q_{тр2} + Q_р + Q_г, \quad (3.17)$$

де $Q_{доб}$ – загальна добова кількість теплоти, необхідна для здійснення процесу; $Q_н$ – теплота на попереднє нагрівання добової дози біомаси; $Q_{тр1}$ і $Q_{тр2}$ – втрати теплоти у трубопроводах; $Q_м$ – втрати у проміжній місткості; $Q_р$ – втрати через стінки камери зброджування; $Q_г$ – втрати з біогазом, що виділяється.

Складові теплового балансу уточнюються розрахунковим або експериментальним способом з урахуванням температурного режиму, площі поверхні резервуара, товщини теплоізоляції та тривалості роботи установки. Для мобільної біогазової установки особливо важливо передбачити якісну теплоізоляцію корпусу і мінімізувати тривалі простої, оскільки нестабільна температура знижує активність метаноутворювальних бактерій.

Таким чином, запропонована мобільна біогазова установка поєднує технологічні операції зброджування, накопичення газу, транспортування та внесення дигестату. Її конструкція орієнтована на потреби молочно-товарної ферми, де необхідно утилізувати гній, отримати додаткове джерело енергії та зменшити екологічне навантаження на навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 4
ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні положення

Охорона праці у проєкті механізації молочно-товарної ферми з удосконаленням технологічного процесу отримання біогазу розглядається як система заходів, спрямованих на збереження життя і здоров’я працівників, запобігання аваріям та підтримання безпечного виробничого середовища. На такій фермі поєднуються процеси утримання великої рогатої худоби, доїння, приготування і роздавання кормів, видалення гною, транспортування органічних відходів та їх анаеробне зброджування в біогазовій установці. Тому безпека має охоплювати як традиційні операції тваринництва, так і експлуатацію автоматизованих, газових, гідравлічних та електричних систем.

Нормативною основою для розроблення розділу є Закон України «Про охорону праці», Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві, Правила пожежної безпеки в Україні та Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Відповідно до цих документів роботодавець повинен створити безпечні умови праці, забезпечити справність обладнання, організувати навчання та інструктажі, а працівники зобов’язані знати й виконувати вимоги інструкцій, користуватися засобами індивідуального захисту та не допускати порушення технологічної дисципліни [1–4].

У даній кваліфікаційній роботі передбачено застосування сучасної механізації та автоматизації: роботизованого доїння, автоматичних систем годівлі, скреперного видалення гною, цифрового моніторингу стану тварин, датчиків мікроклімату і систем штучного інтелекту.

Такі рішення зменшують частку ручної праці, однак не усувають потреби в контролі з боку персоналу. Будь-яке автоматизоване обладнання повинно мати аварійне вимкнення, сервісний режим, блокування випадкового пуску та зрозумілу сигналізацію про відхилення параметрів.

4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

Під час роботи молочно-товарної ферми на працівників можуть впливати механічні, фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні фактори. Механічні небезпеки виникають біля рухомих частин кормороздавачів, транспортерів, скреперів, насосів, вентиляторів, лопатевих мішалок і гідроприводів. Додатковим джерелом травмування є велика рогата худоба, особливо під час перегону, ветеринарних процедур, чищення станків і роботи в обмеженому просторі.

Для біогазового процесу найбільш суттєвими є газові небезпеки. Під час розкладання гною можуть виділятися метан, вуглекислий газ, аміак і сірководень. Метан є горючим компонентом біогазу, а сірководень належить до токсичних газів, тому місця накопичення субстрату, гнойові канали, приймальні ями, реактор, газгольдер і газопроводи повинні розглядатися як потенційно небезпечні зони [5, 6]. У конструктивній частині роботи передбачено мобільну біогазову установку з реактором на шасі, мішалками, гідромоторами, фекальним насосом, газопроводом, манометрами та запобіжним клапаном, що вимагає окремих заходів безпеки під час завантаження, перемішування, відведення газу і вивантаження збродженої маси.

До фізичних факторів належать шум і вібрація від насосів, компресорів, вентиляторів та приводів, підвищена вологість, перепади температури, недостатнє освітлення, слизькі підлоги й обмерзання проходів у зимовий період. Біологічні ризики пов’язані з контактом працівників із гноєм, стічними водами, мікроорганізмами, пилом, підстилкою і кормами. Психофізіологічне навантаження зростає через необхідність постійного контролю датчиків, роботів, аварійних повідомлень і технологічних параметрів біогазового процесу.

Таблиця 4.1 – Основні ризики та заходи їх зниження

Фактор	Можливий ризик	Заходи безпеки
Рухомі частини машин	Защемлення, удари, травми	Огородження, блокування пуску, аварійні кнопки, ремонт тільки після зупинки
Біогаз і шкідливі гази	Отруєння, задуха, пожежа, вибух	Газоаналізатори, вентиляція, герметичність, запобіжний клапан, заборона відкритого вогню
Гній і стоки	Біологічне забруднення, ковзання	Спецодяг, рукавиці, гумове взуття, дезінфекція, прибирання проходів
Електрообладнання і роботи	Ураження струмом, некерований рух	Заземлення, пристрої захисту, сервісний режим, калібрування датчиків

4.3 Організаційні заходи охорони праці

На фермі необхідно призначити відповідальних осіб за охорону праці, електрогосподарство, пожежну безпеку, експлуатацію біогазової установки та технічний стан роботизованого обладнання. Для операторів доїльних роботів, працівників гноєвидалення, оператора біогазової установки, електромонтера і механізатора мають бути розроблені посадові інструкції та інструкції з охорони праці. Окремо слід оформити порядок допуску до робіт у гнойових каналах, приймальних ямах, біля газгольдера, у зоні газопроводів і під час ремонту обладнання.

Працівники допускаються до самостійної роботи після медичного огляду, навчання, вступного та первинного інструктажу, перевірки знань і практичного ознайомлення з обладнанням. Повторні інструктажі проводять за графіком, а позапланові – після зміни технології, модернізації програмного забезпечення, аварійного спрацювання захисту, виявлення витоку газу або порушення правил безпеки. У журналі технічного стану необхідно фіксувати огляди роботів, насосів, гідроприводів, датчиків тиску, температури, рівня субстрату, вентиляції та газоаналізаторів.

Роботи у замкнених або погано вентильованих просторах виконують лише за нарядом-допуском. Перед входом у резервуар, колодязь або гнойову яму проводять провітрювання і контроль газового середовища, забезпечують страхування працівника, спостерігача зовні та засоби зв’язку. Самовільний вхід у такі місця без перевірки повітряного середовища забороняється. Для

робітників слід передбачити спецодяг, гумове взуття, рукавиці, захисні окуляри, засоби захисту органів дихання, аптечки та місця для санітарної обробки.

4.4 Технічні заходи безпеки під час експлуатації обладнання

Машини і механізми ферми розміщують так, щоб забезпечити безпечні проходи, зручний доступ до органів керування та можливість технічного обслуговування без перебування працівника в небезпечній зоні. Приводи, вали, муфти, ланцюгові передачі, шнеки, скребки, вентилятори та мішалки повинні мати міцні огородження. Запуск обладнання після ремонту дозволяється тільки після встановлення захисних кожухів, перевірки кріплень, відсутності людей у небезпечній зоні та подання попереджувального сигналу.

Роботизовані доїльні модулі, автоматичні годівниці, скреперні установки та транспортні засоби повинні мати обмеження швидкості руху, датчики перешкод, світлову або звукову сигналізацію, сервісний режим і аварійні вимикачі. Оскільки поруч із машинами перебувають тварини, обладнання має працювати плавно, без різких ударів і небезпечних виступів. Системи штучного інтелекту слід використовувати як засіб підтримки рішень, але не як повну заміну відповідальному оператору. Критичні датчики доцільно дублювати, а їх показання – регулярно калібрувати.

Електрообладнання у вологих і запилених приміщеннях повинно мати відповідний ступінь захисту, справну ізоляцію, захисне заземлення, автоматичні вимикачі та пристрої захисного вимкнення. Розподільчі щити розміщують у сухих місцях, захищених від пошкодження транспортом і тваринами. Освітлення має забезпечувати добру видимість проходів, сходів, органів керування, манометрів і попереджувальних знаків. У зонах біогазової установки необхідно передбачити вентиляцію, газоаналізатори та аварійне освітлення.

4.5 Безпека експлуатації біогазової установки та дії в аварійних ситуаціях

Перед пуском біогазової установки оператор перевіряє герметичність люків, фланцевих з’єднань і газопроводу, справність манометра, кранів, запобіжного клапана, гідросистеми, насоса та огороджень мішалок. Завантаження субстрату виконують без переповнення реактора, залишаючи газовий простір для накопичення біогазу. Перемішування дозволяється тільки за закритих люків і справних блокувань. Відкривати реактор, очищати мішалки або виконувати ремонт під час роботи приводу забороняється.

Під час технічного обслуговування установку потрібно зупинити, відключити джерела енергії, перекрити газопровід, скинути залишковий тиск і переконатися у безпечному складі повітря. Гідросистему оглядають після зниження тиску, оскільки прорив рідини під тиском може спричинити травмування. Під час транспортування мобільної установки перевіряють шасі, зчіпний пристрій, гальма, світлову сигналізацію, фіксацію кришок і закриття арматури. Рух територією ферми має відбуватися встановленим маршрутом з обмеженою швидкістю.

Пожежна і вибухова безпека забезпечується герметичністю газової системи, вентиляцією, контролем концентрації газів і недопущенням джерел запалювання. У зоні реактора, газгольдера і газопроводів заборонені паління, відкритий вогонь та вогневі роботи без дозволу. У разі спрацювання сигналізатора газу, появи підозрілого запаху, пошкодження трубопроводу, різкого відхилення тиску або займання оператор зупиняє подачу газу й субстрату, відключає обладнання, евакуює людей із небезпечної зони, повідомляє відповідальну особу і діє згідно з планом ліквідації аварії.

Ферма повинна бути забезпечена первинними засобами пожежогасіння, пожежними щитами, вогнегасниками, водою для пожежогасіння, схемами евакуації людей і тварин. Під’їзди до корівників, електрощитових, біогазової установки й складів кормів необхідно утримувати вільними. Горючі

матеріали, солому, сіно та паливно-мастильні матеріали не допускається зберігати поблизу газового обладнання, електрощитів і нагрітих поверхонь.

Висновок до розділу

У розділі визначено основні небезпечні та шкідливі фактори, характерні для механізованої молочно-товарної ферми з біогазовою установкою, і запропоновано комплекс організаційних, технічних, санітарних та протипожежних заходів. Найважливішими напрямами є огородження рухомих частин машин, контроль газового середовища, вентиляція, електробезпека, справність гідросистеми, навчання персоналу та використання засобів індивідуального захисту.

Впровадження роботів, автоматизованих систем і штучного інтелекту підвищує продуктивність ферми та зменшує ручну працю, але потребує постійного технічного контролю, калібрування датчиків і наявності ручного аварійного керування. Дотримання запропонованих заходів дозволить знизити ризик травматизму, отруєнь, пожеж і аварій, а також забезпечити надійну та безпечну роботу технологічного процесу отримання біогазу.

РОЗДІЛ 5
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ

5.1. Завдання та методика техніко-економічної оцінки

Техніко-економічне обґрунтування проєктних рішень є завершальним етапом оцінювання доцільності запропонованої модернізації молочно-товарної ферми. У попередніх розділах роботи обґрунтовано необхідність переходу від розрізненого виконання окремих операцій до інтегрованої системи механізації, автоматизації та цифрового управління. Така система охоплює роботизоване або високоавтоматизоване доїння, точну годівлю, автоматизоване водопостачання, механізоване прибирання гною, підготовку органічної сировини до зброджування, контроль мікроклімату, використання датчиків і програмних засобів аналізу виробничих даних.

Економічна сутність проєкту полягає в тому, що гнойовий потік ферми розглядається не тільки як відхід, який потребує вивезення та утилізації, а як сировинний ресурс для одержання біогазу і органічного добрива. Внаслідок цього формується замкнений виробничий цикл: корми надходять у тваринницьке приміщення, продукцією є молоко, а побічні органічні відходи переробляються з утворенням енергії та дигестату. Енергетична складова підвищує автономність ферми, а агрономічна складова зменшує потребу в мінеральних добривах і поліпшує екологічний стан території господарства.

У даному розділі оцінюється економічна ефективність проєктних рішень, пов'язаних із механізацією технологічних процесів ферми та удосконаленням отримання біогазу.

Основну увагу приділено розрахунку ефекту від застосування мобільної біогазової установки, оскільки саме вона є конструктивною розробкою кваліфікаційної роботи. Додатково враховано організаційний ефект від автоматизації гноєвидалення, точного обліку сировини, зменшення ручної праці та підвищення керованості технологічного процесу.

Метою техніко-економічного розрахунку є визначення капітальних витрат на впровадження проєктного рішення, річних експлуатаційних витрат, річної економії ресурсів, умовного річного економічного ефекту, строку окупності та рівня рентабельності. Оцінювання виконано за порівняльним методом, тобто порівнюються базовий варіант організації робіт і проєктний варіант. У базовому варіанті гній накопичується і вивозиться без попереднього енергетичного використання. У проєктному варіанті органічні відходи спрямовуються у біореактор, де відбувається анаеробне зброджування з отриманням біогазу та збродженого залишку.

Через те, що фактична вартість обладнання, енергоносіїв, запасних частин і монтажних робіт змінюється залежно від регіону, постачальника та року реалізації, у розрахунку прийнято укрупнені проєктні ціни. Вони призначені для обґрунтування доцільності технічного рішення на стадії кваліфікаційної роботи. Перед практичним впровадженням ці показники повинні бути уточнені за комерційними пропозиціями постачальників, фактичною чисельністю стада, цінами на енергоносії та умовами конкретного господарства.

5.2. Вихідні дані для економічного розрахунку

Конструктивною частиною роботи передбачено використання мобільної біогазової установки, яка складається з шасі, резервуара-реактора, лопатевих мішалок, гідромоторів, насосної станції, газової арматури, запобіжного клапана, манометра, газопроводу, фекального насоса, зливного трубопроводу та допоміжних елементів керування. Така компоновка дає змогу поєднати функції зброджування органічної сировини і транспортування збродженого залишку до місця внесення на поле. Відповідно зменшується потреба у додаткових транспортних операціях і окремих ємностях для перевезення дигестату.

У розрахунку прийнято, що добове завантаження реактора становить 130 кг напіврідкого гною, що відповідає приблизному виходу гною від

чотирьох корів. Прийнятий об'єм реактора становить 5 м^3. Такий об'єм дає змогу забезпечити необхідний запас робочого простору, газового простору і можливість перемішування субстрату без переповнення. У разі збільшення поголів'я ферми економічний розрахунок може масштабуватися шляхом встановлення кількох модулів або використання реактора більшої місткості.

Для оцінювання ефективності прийнято помірно обережний варіант виходу біогазу. Вважаємо, що одна корова забезпечує у середньому 1,3 м^3 біогазу на добу з гною, який надходить у реактор. Для чотирьох корів добовий вихід становитиме 5,2 м^3. Річний вихід біогазу визначається множенням добового виходу на кількість днів роботи установки. У роботі прийнято, що установка працює протягом усього року з урахуванням регламентного обслуговування, а коефіцієнт використання часу наближений до одиниці, оскільки процес зброджування має безперервний характер.

Умовну енергетичну цінність біогазу в розрахунку зручно оцінювати через еквівалент заміщення природного газу. Для навчального техніко-економічного розрахунку прийнято, що 1 м^3 біогазу заміщує 0,55 м3 природного газу. Це значення враховує нижчу теплотворну здатність біогазу порівняно з природним газом і можливі втрати під час використання. Прийнята розрахункова ціна природного газу становить 15 грн/м^3. Для оцінки цінності дигестату прийнято умовну вартість 350 грн за 1 т збродженого органічного добрива.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Показник	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Добове завантаження субстрату	$G_д$	130	кг/добу
Кількість корів, що забезпечують прийнятий обсяг гною	n	4	гол.
Об'єм реактора	$V_р$	5,0	м3
Питомий вихід біогазу від однієї корови	$q_б$	1,3	м3/добу
Добовий вихід біогазу	$Q_{б.д}$	5,2	м3/добу
Кількість днів роботи установки за рік	D	365	діб
Еквівалент заміщення природного газу	$k_г$	0,55	м3/м3
Розрахункова ціна природного газу	$Ц_г$	15,0	грн/м3
Розрахункова вартість органічного добрива	$Ц_д$	350	грн/т

Прийняті вихідні дані дозволяють оцінити не тільки прямий енергетичний результат, а й супутній ефект від отримання зброджeного органічного добрива. Річна маса субстрату, яка проходить через реактор, визначається за формулою:

$$G_р = G_д \cdot D / 1000, \text{ т/рік.} \quad (5.1)$$

Підставивши прийняті значення, отримаємо: Gр = 130 · 365 / 1000 = 47,45 т/рік. Оскільки після зброджування маса дигестату близька до маси вхідного субстрату з урахуванням незначних газових втрат, у подальших розрахунках приймаємо річний вихід органічного добрива 47,45 т.

Річний вихід біогазу визначається за формулою:

$$Q_{б.р} = Q_{б.д} \cdot D, \text{ м}^3\text{/рік.} \quad (5.2)$$

Для прийнятого варіанта: $Q_{б.р}$ = 5,2 · 365 = 1898 м^3/рік. Цей обсяг не є промисловим, однак для навчального проєкту він демонструє принцип локального енергетичного використання відходів тваринництва і може бути масштабований при збільшенні поголів'я.

5.3. Визначення капітальних вкладень у проєктне рішення

Капітальні вкладення у мобільну біогазову установку включають вартість виготовлення резервуара, шасі, перемішувального пристрою, гідравлічного приводу, газової арматури, насосної та зливної системи, захисного покриття, монтажу і пусконалагоджувальних робіт. Особливістю запропонованої конструкції є те, що вона не потребує будівництва стаціонарного бетонного метантенка, складної будівельної частини і окремої системи транспортування дигестату. Саме мобільність установки є однією з передумов економічної доцільності проєкту.

Перевагою використання гідравлічного приводу мішалок є можливість живлення від насосної станції або від гідросистеми енергетичного засобу. Це зменшує потребу у встановленні окремих електродвигунів у зоні підвищеної газової небезпеки та спрощує експлуатацію. Водночас у кошторисі необхідно

передбачити витрати на гідромотори, гідронасос, фільтр, розподільник, рукави високого тиску, ущільнення і засоби контролю тиску.

У таблиці 5.2 наведено укрупнену структуру капітальних витрат. Вона складена з урахуванням матеріальних витрат на основні вузли установки і додаткового резерву на непередбачені витрати. Такий підхід є прийнятним для проєктного розрахунку, оскільки точна вартість виготовлення залежить від конкретної виробничої бази, марки матеріалів, наявності готових вузлів і вартості робіт у майстерні.

Таблиця 5.2 – Орієнтовні капітальні вкладення у мобільну біогазову установку

№ з/п	Стаття витрат	Вартість, грн
1	Резервуар-реактор об'ємом 5 м^3 з люком, горловиною та кріпленнями	45000
2	Шасі, рама, опори, ходова частина та зчіпний пристрій	18000
3	Лопатеві мішалки, вали, муфти, підшипникові вузли	14000
4	Гідромотори, гідронасос, бак, розподільник, фільтр, гідропроводи	22000
5	Газова арматура, манометр, запобіжний клапан, газопровід, кран	8000
6	Фекальний насос, зливний трубопровід, зливна арматура	9000
7	Антикорозійний захист, фарбування, теплоізоляційні та ущільнювальні матеріали	4000
8	Монтаж, випробування, пусконалагоджувальні роботи	7000
9	Резерв на непередбачені витрати, 10 %	13000

Загальна сума капітальних вкладень становить:

$$К = 45000 + 18000 + 14000 + 22000 + 8000 + 9000 + 4000 + 7000 + 13000 = 140000 \text{ грн.}$$

Отримане значення використовується як база для визначення строку окупності та рентабельності проєктного рішення. За потреби воно може бути скориговане відповідно до фактичних цін на метал, гідравлічні компоненти, газову арматуру і вартість робіт у конкретному господарстві.

5.4. Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати включають витрати на технічне обслуговування, поточний ремонт, енергоресурси, мастильні матеріали, контроль безпеки газового обладнання, оплату праці персоналу, який

здійснює завантаження, нагляд і вивантаження збродженого залишку. Оскільки установка має відносно просту будову і працює в циклічному режимі, основними поточними витратами є ремонтно-сервісні витрати та оплата допоміжних операцій.

Витрати на технічне обслуговування прийнято на рівні 5 % від капітальної вартості установки. До них входить заміна ущільнень, мастил, рукавів, дрібних деталей приводу, перевірка кріплень, контроль герметичності резервуара і газопроводу. Витрати на енергію та мастильні матеріали включають роботу насосної станції, періодичне перемішування субстрату, перекачування маси та обслуговування гідравлічного приводу.

Окремо враховано витрати на контроль безпеки, оскільки біогазова установка працює з горючим газом. До цих витрат віднесено періодичну перевірку манометра, запобіжного клапана, газових з'єднань, вентиляції, справності кранів і відсутності витоків. Незважаючи на те, що ці витрати порівняно невеликі, вони є обов'язковими, адже безпечна експлуатація є передумовою економічної ефективності.

Сумарні річні експлуатаційні витрати становлять 22000 грн. У собівартість біогазу ці витрати доцільно включати з урахуванням побічного продукту – дигестату. Якщо не враховувати вартість отриманого добрива, умовна собівартість 1 м^3 біогазу становитиме:

$$C_б = B_е / Q_{б.р} = 22000 / 1898 = 11{,}59 \text{ грн/м}^3. \quad (5.4)$$

Таблиця 5.3 – Річні експлуатаційні витрати проєктної установки

№ з/п	Стаття витрат	Сума, грн/рік
1	Технічне обслуговування та поточний ремонт, 5 % від К	7000
2	Енергія, паливо для допоміжних операцій і мастильні матеріали	5500
3	Перевірка газового обладнання, манометрів і запобіжної арматури	3000
4	Допоміжна оплата праці на завантаження, нагляд і вивантаження	6500
Разом	Річні експлуатаційні витрати	22000

Якщо ж вартість дигестату відняти від експлуатаційних витрат, оскільки він є корисним продуктом, скоригована собівартість біогазу буде значно нижчою:

$$C_{б.ск} = (B_е - E_д) / Q_{б.р.} \quad (5.5)$$

У подальших розрахунках ця залежність використовується для комплексної оцінки результату, адже біогазова установка створює не один, а два корисні продукти: газове паливо і зброджене органічне добриво.

5.5. Визначення річного економічного ефекту

Річний економічний ефект від упровадження проєктного рішення формується за кількома напрямами. Перший напрям – енергетичний, тобто заміщення частини природного газу або іншого палива біогазом. Другий напрям - агрономічний, тобто отримання органічного добрива після анаеробного зброджування. Третій напрям – організаційно-технологічний, пов'язаний зі зменшенням витрат на транспортування, накопичення і санітарне обслуговування гнойового потоку. Четвертий напрям – екологічний, що проявляється у зниженні запахів, зменшенні неконтрольованих викидів метану та поліпшенні стану території ферми.

Енергетичний ефект визначається через еквівалент заміщення природного газу. За прийнятих умов річний вихід біогазу становить 1898 м^3. З урахуванням коефіцієнта заміщення 0,55 це відповідає 1043,9 м^3 природного газу. За розрахункової ціни 15 грн/м^3 річна економія на паливі становить:

$$E_г = Q_{б.р} \cdot k_г \cdot Ц_г = 1898 \cdot 0{,}55 \cdot 15 = 15658{,}5 \text{ грн/рік.} \quad (5.6)$$

Ефект від використання дигестату як органічного добрива визначається множенням річної маси збродженого залишку на його умовну вартість:

$$E_д = G_р \cdot Ц_д = 47{,}45 \cdot 350 = 16607{,}5 \text{ грн/рік.} \quad (5.7)$$

Додатковий організаційний ефект пов'язаний із тим, що мобільна установка дозволяє зменшити кількість операцій із перевантаження гною, скоротити обсяги тривалого відкритого зберігання, поліпшити санітарний стан ферми та раціональніше доставляти зброджену масу до місця внесення. Для розрахунку цей ефект прийнято у сумі 9000 грн/рік. Ефект від зниження санітарно-екологічних втрат, запахів і потреби у додатковому прибиранні прийнято у сумі 5000 грн/рік. Економія допоміжної ручної праці, пов'язана з

механізацією завантаження, перемішування і вивантаження, прийнята у сумі 12000 грн/рік.

Таблиця 5.4 – Річні результати від використання проєктного рішення

№ з/п	Складова економічного результату	Сума, грн/рік
1	Економія природного газу за рахунок використання біогазу	15659
2	Вартість отриманого збродженого органічного добрива	16608
3	Зменшення витрат на транспортування і перевантаження гнойової маси	9000
4	Зменшення санітарно-екологічних втрат і витрат на підтримання чистоти	5000
5	Економія допоміжної ручної праці завдяки механізації операцій	12000
Разом	Сумарний річний результат	58267

Річний чистий економічний ефект визначається як різниця між сумарним річним результатом і річними експлуатаційними витратами:

$$Е_ч = Е_р – В_е, \text{ грн/рік.} \quad (5.8)$$

Для проєктного варіанта: $Е_ч = 58267 - 22000 = 36267$ грн/рік. Отримане значення показує, що навіть за невеликого обсягу реактора мобільна біогазова установка створює позитивний економічний результат. Основна частина ефекту формується не тільки за рахунок газу, а й за рахунок добрива, зменшення витрат на поводження з відходами та механізації допоміжних операцій.

5.6. Розрахунок строку окупності та рентабельності

Строк окупності є одним із найзрозуміліших показників для оцінювання інвестиційного рішення. Він показує, за скільки років чистий річний ефект компенсує початкові капітальні вкладення. Для сільськогосподарських підприємств, які працюють в умовах змінних цін на енергоносії, цей показник особливо важливий, оскільки дає змогу порівняти модернізацію з іншими можливими напрямами вкладення коштів.

$$T_{ок} = К / Е_ч. \quad (5.9)$$

Підставивши розрахункові значення, отримаємо:

$$T_{ок} = 140000 / 36267 = 3{,}86 \text{ року}. \quad (5.10)$$

Отже, за прийнятих умов проєктне рішення окупається приблизно за 3,9 року. Для фермерського обладнання, яке має тривалий строк використання, такий показник є прийнятним, особливо якщо враховувати додаткові екологічні й організаційні переваги, які не повністю відображаються у прямих грошових розрахунках.

Рентабельність капітальних вкладень визначається відношенням чистого річного ефекту до суми капітальних вкладень:

$$R = (Е_ч / К) \cdot 100\ \%. \quad (5.11)$$

Для проєктного рішення:

$$R = (36267 / 140000) \cdot 100 = 25{,}9\ \%. \quad (5.12)$$

Показник рентабельності 25,9 % свідчить про економічну доцільність запропонованої установки за умови дотримання технологічного режиму зброджування, регулярного завантаження субстрату, справності перемішувального механізму і раціонального використання отриманого біогазу та дигестату.

Таблиця 5.5 – Основні техніко-економічні показники проєктного рішення

Показник	Значення	Одиниця виміру
Капітальні вкладення	140000	грн
Річний вихід біогазу	1898	$м^3$/рік
Річний вихід збродженого органічного добрива	47,45	т/рік
Річні експлуатаційні витрати	22000	грн/рік
Сумарний річний економічний результат	58267	грн/рік
Чистий річний економічний ефект	36267	грн/рік
Строк окупності	3,86	року
Рентабельність капітальних вкладень	25,9	%

5.7. Економічна оцінка заходів механізації та автоматизації ферми

Біогазова установка є лише одним елементом загальної системи модернізації ферми. Економічний результат від її впровадження значною мірою залежить від того, наскільки якісно механізовані попередні операції:

прибирання гною, транспортування до приймальної ємності, подрібнення, перемішування, дозування і контроль складу субстрату. Якщо ці операції виконуються неритмічно, реактор працює нестабільно, знижується вихід біогазу і зростає ризик технологічних збоїв. Тому автоматизація ферми повинна розглядатися як економічно пов'язаний комплекс заходів.

Найбільший економічний потенціал у молочно-товарній фермі мають операції доїння, годівлі, гноєвидалення і цифрового контролю стану тварин. Роботизоване або високоавтоматизоване доїння зменшує потребу в ручній праці, стабілізує режим одержання молока, підвищує якість обліку та дає змогу раніше виявляти проблеми здоров'я корів. Автоматизована годівля з ваговим контролем і програмним плануванням раціонів зменшує перевитрати кормів, покращує однорідність кормової суміші й підтримує стабільне споживання сухої речовини. Гноєприбиральні роботи або скреперні системи зменшують забруднення підлоги, підвищують гігієну вимені та забезпечують рівномірне надходження сировини до біогазового напряму.

Система штучного інтелекту та цифрової аналітики не створює економічного ефекту сама по собі, якщо дані не використовуються для управлінських рішень. Її цінність полягає у своєчасному виявленні відхилень: зниження надоїв, зміни активності, ознак кульгавості, порушень споживання води, перегріву приміщення, збоїв у роботі насосів або мішалок. Раннє реагування зменшує втрати молока, знижує витрати на лікування, запобігає аваріям і підвищує надійність роботи ферми.

Для практичного впровадження модернізацію доцільно виконувати поетапно. На першому етапі варто впровадити ті рішення, які безпосередньо забезпечують підготовку сировини до біогазової установки: механізоване гноєвидалення, насосну подачу, подрібнення і гомогенізацію субстрату. На другому етапі доцільно модернізувати годівлю, водопостачання та мікроклімат, оскільки ці процеси впливають на продуктивність тварин і кількість органічної сировини. На третьому етапі впроваджуються

роботизоване доїння, цифрові датчики, камери комп'ютерного зору і єдина інформаційна система управління фермою.

Таблиця 5.6 – Очікуваний економічний ефект від комплексної механізації ферми

Напрям модернізації	Основний результат	Економічний прояв
Роботизоване або автоматизоване доїння	Стабільний режим доїння, точний облік молока, зменшення ручної праці	Зниження трудомісткості, менші втрати молока, вища якість продукції
Автоматизована годівля і підштовхування корму	Точне дозування раціонів і рівномірний доступ до корму	Економія кормів, стабілізація продуктивності, менше відходів кормової суміші
Механізоване гноєвидалення	Регулярне очищення проходів і формування керованого потоку гною	Менші витрати праці, краща санітарія, стабільніша робота біореактора
Датчики мікроклімату та автоматичне керування вентиляцією	Контроль температури, вологості, аміаку і повітрообміну	Менше теплового стресу, стабільніша продуктивність, економія електроенергії
Цифрова система управління стадом і ШІ-аналітика	Раннє виявлення відхилень і підтримка рішень технолога	Зниження ветеринарних втрат, скорочення простоїв, поліпшення відтворення
Біогазова установка	Отримання біогазу і дигестату з гною	Енергетична економія, добривний ефект, зменшення екологічних ризиків

Поетапний підхід має економічну перевагу, оскільки зменшує одноразове фінансове навантаження на господарство, дає можливість навчити персонал, перевірити сумісність обладнання і поступово накопичувати виробничі дані. Крім того, частина економії від перших етапів модернізації може бути спрямована на фінансування наступних етапів. Такий підхід є особливо важливим для українських фермерських господарств, які часто мають обмежений доступ до довгострокового кредитування і змушені ретельно планувати інвестиції.

5.8. Чутливість економічного результату та умови ефективного впровадження

Економічна ефективність біогазового напряму залежить від кількох ключових факторів. Найбільший вплив мають фактичний вихід біогазу, ціна

енергоносіїв, вартість виготовлення установки, регулярність завантаження субстрату, якість перемішування, температура бродіння і можливість повного використання дигестату. Якщо біогаз не використовується постійно, а спалюється або втрачається, економічний ефект різко зменшується. Тому ще на стадії проєктування необхідно визначити споживачів газу: підігрів води, підтримання температури реактора, обігрів допоміжних приміщень або робота малопотужного генератора.

Важливим фактором є дисципліна експлуатації. Навіть проста біогазова установка потребує контролю герметичності, температурного режиму, кислотності середовища, відсутності інгібіторів, регулярного перемішування і своєчасного вивантаження збродженої маси. Порушення цих умов може призвести до зниження газоутворення, накопичення осаду, утворення кірки, пошкодження мішалок або погіршення безпеки. Тому техніко-економічний ефект повинен розглядатися разом із системою технічного обслуговування і навчання персоналу.

Для підвищення надійності проєкту доцільно передбачити резервний план використання біогазу. Якщо у певний період немає потреби в теплі, газ може спрямовуватися до газгольдера або використовуватися для підігріву технологічної води. Дигестат бажано вносити на поля відповідно до агротехнічних строків і потреб культур. За такого підходу ферма отримує не тільки економічний, а й ресурсозберігальний ефект, оскільки частина поживних речовин повертається у ґрунт.

На рівні всієї ферми ефективність автоматизації залежить від підготовки персоналу. Якщо працівники не вміють користуватися програмним забезпеченням, не аналізують повідомлення системи і не виконують профілактичне обслуговування, дорогі роботи перетворюються на окремі машини без повного економічного потенціалу. Тому в проєктних витратах необхідно передбачати навчання операторів, технолога, ветеринарного спеціаліста та механіка.

Таблиця 5.7 – Фактори, що впливають на економічну ефективність проєкту

Фактор	Можливий вплив	Заходи зниження ризику
Зменшення виходу біогазу	Зниження енергетичної економії і подовження строку окупності	Контроль температури, вологості, pH, регулярне перемішування, стабільне дозування
Зростання вартості виготовлення установки	Збільшення капітальних вкладень	Використання доступних матеріалів, уніфікованих вузлів, поетапне виготовлення
Неповне використання біогазу	Втрати енергетичного ефекту	Планування споживачів тепла, газгольдер, резервне використання
Недостатнє використання дигестату	Втрати добривного ефекту	План внесення на поля, зберігання у герметичній ємності, аналіз поживних речовин
Низька кваліфікація персоналу	Простої, аварії, неповне використання автоматизації	Навчання, інструкції, сервісний графік, журнал обслуговування

5.9. Узагальнення результатів техніко-економічного обґрунтування

Проведені розрахунки свідчать, що запропоновані проєктні рішення мають техніко-економічну доцільність. Мобільна біогазова установка забезпечує річний вихід біогазу 1898 м3 і дає змогу переробити близько 47,45 т органічного субстрату на рік. За прийнятих цін і умов експлуатації сумарний річний результат становить 58267 грн, річні експлуатаційні витрати - 22000 грн, а чистий економічний ефект - 36267 грн/рік.

Капітальні вкладення у виготовлення та впровадження установки прийнято на рівні 140000 грн. За цих умов строк окупності становить 3,86 року, а рентабельність капітальних вкладень - 25,9 %. Отримані показники можна вважати прийнятними для фермерського господарства, особливо якщо враховувати, що установка створює не тільки прямий паливний ефект, а й забезпечує отримання органічного добрива, зменшує витрати на поводження з гноєм і поліпшує екологічний стан ферми.

Важливо, що реальна ефективність проєкту зростатиме при збільшенні поголів'я і масштабуванні біогазового модуля. Чим більшим є стабільний потік гною, тим повніше завантажується реактор, тим вищий обсяг біогазу і

тим нижчою стає умовна собівартість одиниці енергії. Тому для середньої або великої молочно-товарної ферми запропоновану установку доцільно розглядати як модульне рішення або як дослідно-виробничу основу для подальшого збільшення об'єму метантенка.

Комплексна механізація та автоматизація ферми підсилює економічний результат біогазового напряму. Роботизоване доїння, точна годівля, автоматизоване гноєвидалення, цифровий моніторинг і системи штучного інтелекту зменшують трудомісткість, підвищують якість управління та формують стабільний технологічний потік. У такій системі гній не накопичується неконтрольовано, а своєчасно надходить на підготовку і зброджування, що безпосередньо впливає на вихід біогазу.

Отже, проєкт механізації молочно-товарної ферми з удосконаленням технологічного процесу отримання біогазу є економічно обґрунтованим. Запропоновані рішення забезпечують зниження витрат на енергоносії, отримання органічного добрива, скорочення трудових витрат, поліпшення санітарного стану ферми та створення передумов для енергетичної автономності господарства. Найбільшого ефекту можна досягти за умови поетапного впровадження обладнання, підготовки персоналу, регулярного технічного обслуговування та використання цифрової системи контролю всіх основних виробничих потоків.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання підвищення ефективності функціонування молочно-товарної ферми шляхом удосконалення засобів механізації, автоматизації та впровадження енергозберігаючих технологій. Основну увагу приділено модернізації процесу утилізації органічних відходів тваринництва з отриманням біогазу, що забезпечує виробничу, економічну та екологічну ефективність господарства.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан механізації молочно-товарних ферм в Україні та країнах Європейського Союзу. Встановлено, що застосування автоматизованих систем доїння, годівлі, видалення гною, контролю мікроклімату та моніторингу стану тварин сприяє зменшенню витрат праці, підвищенню продуктивності стада, покращенню умов утримання тварин і забезпеченню стабільної якості молочної продукції.

У роботі обґрунтовано доцільність використання сучасних технічних рішень, зокрема роботизованих доїльних установок, автоматизованих систем роздавання кормів, сенсорного контролю та елементів точного тваринництва. Такі засоби дозволяють знизити вплив людського фактора, оперативно виявляти відхилення у роботі ферми та підвищувати ефективність управління виробничими процесами.

Окрему увагу приділено утилізації гною та гнойових стоків, які можуть бути не лише джерелом забруднення довкілля, а й цінною сировиною для виробництва біогазу та органічних добрив. Використання біогазової технології дає змогу зменшити викиди метану, покращити санітарний стан ферми, знизити запахове навантаження та забезпечити господарство додатковим джерелом енергії.

У конструктивному розділі запропоновано вдосконалення процесу отримання біогазу шляхом застосування мобільної біогазової установки. Її використання забезпечує переробку органічної сировини безпосередньо поблизу місця утворення, зменшує потребу в транспортуванні субстрату та

дозволяє застосовувати зброджену масу як органічне добриво. Запропонована конструкція включає резервуар, систему перемішування, гідравлічний привод, елементи контролю тиску та газовідведення.

Проведені розрахунки підтвердили працездатність основних елементів біогазової установки. Обрані конструктивні параметри забезпечують якісне перемішування субстрату, запобігають утворенню осаду й кірки, сприяють рівномірному перебігу анаеробного бродіння та підвищують ефективність виділення біогазу.

У розділі з охорони праці визначено основні небезпечні та шкідливі фактори під час експлуатації ферми й біогазової установки, зокрема рухомі частини машин, підвищений тиск, можливість витоку біогазу, вибухонебезпечні суміші, біологічні ризики, шум, вологість та контакт із гнойовими стоками. Запропоновано заходи безпеки, що передбачають герметизацію обладнання, вентиляцію, контроль тиску, використання газоаналізаторів, запобіжних клапанів, засобів індивідуального захисту та проведення інструктажів.

Техніко-економічне обґрунтування показало, що впровадження запропонованих рішень дозволяє зменшити витрати на енергоносії, скоротити частку ручної праці, раціонально використовувати органічні відходи, отримувати біодобрива та підвищити загальну ефективність роботи ферми. Отже, проєкт механізації молочно-товарної ферми з модернізацією біогазової установки є технічно обґрунтованим, економічно доцільним та екологічно ефективним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.

2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 20 с.

3. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12 (дата звернення: 05.06.2026).

4. Про затвердження Правил охорони праці у сільськогосподарському виробництві : наказ Міністерства соціальної політики України від 29.08.2018 № 1240 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/z1090-18 (дата звернення: 05.06.2026).

5. ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. Київ : Мінрегіон України, 2019. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3200377925350196674?doc_type=2 (дата звернення: 05.06.2026).

6. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.

7. ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.

8. ДСТУ ISO 5707:2012. Установки доїльні. Конструкція та технічні характеристики. Київ : Мінекономрозвитку України, 2013.

9. ДСТУ ISO 6690:2012. Установки доїльні. Механічні випробування. Київ : Мінекономрозвитку України, 2013.

10. Калетнік Г. М. Біопалива: ефективність їх виробництва та споживання в АПК України : навч. посіб. Київ : Аграрна наука, 2010. 327 с.

11. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні. Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України. Київ : БАУ, 2020. 28 с.

12. Біоенергетична асоціація України. Біогаз та біометан [Електронний ресурс]. URL: https://uabio.org/en/biogas-and-biomethane/ (дата звернення: 05.06.2026).

13. UABIO as a facilitator of the biogas/biomethane market in Ukraine : presentation / Bioenergy Association of Ukraine. Kyiv, 2025. URL: https://www.energy-community.org/dam/jcr%3A2cc2ce26-d21d-47ba-961d-140ba87a9108/Geletukha%20UABIO%20presentation%2012.05.2025%20Kyiv.pdf (дата звернення: 05.06.2026).

14. European Biogas Association. EBA Statistical Report 2024 [Electronic resource]. Brussels : EBA, 2024. URL: https://www.europeanbiogas.eu/publication/eba-statistical-report-2024/ (date of access: 05.06.2026).

15. European Biogas Association. EBA Statistical Report 2025 [Electronic resource]. Brussels : EBA, 2025. URL: https://www.europeanbiogas.eu/publication/eba-statistical-report-2025/ (date of access: 05.06.2026).

16. International Energy Agency. Outlook for biogas and biomethane: prospects for organic growth. Paris : IEA, 2020. URL: https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth (date of access: 05.06.2026).

17. Wellinger A., Murphy J., Baxter D. The Biogas Handbook: Science, Production and Applications. Cambridge : Woodhead Publishing, 2013. 512 p.

18. Deublein D., Steinhauser A. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2011. 550 p.

19. Weiland P. Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology. 2010. Vol. 85. P. 849–860.

20. Ward A. J., Hobbs P. J., Holliman P. J., Jones D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. Bioresource Technology. 2008. Vol. 99, № 17. P. 7928–7940.

21. Møller H. B., Sommer S. G., Ahring B. K. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. Biomass and Bioenergy. 2004. Vol. 26, № 5. P. 485–495.

22. Angelidaki I., Treu L., Tsapekos P., Luo G., Campanaro S., Wenzel H., Kougias P. G. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. Biotechnology Advances. 2018. Vol. 36, № 2. P. 452–466.

23. Appels L., Baeyens J., Degrève J., Dewil R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Progress in Energy and Combustion Science. 2008. Vol. 34, № 6. P. 755–781.

24. Demirel B., Scherer P. Bio-methanization of energy crops through mono-digestion for continuous production of renewable biogas. Renewable Energy. 2009. Vol. 34, № 12. P. 2940–2945.

25. FAO. Biogas technology: A training manual for extension. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996. 134 p.

26. Технологія виробництва молока і яловичини : підручник / за ред. В. І. Костенка. Київ : Аграрна освіта, 2010. 530 с.

27. Бусенко О. Т., Столюк В. Д., Могильний О. Й. Технологія виробництва продукції тваринництва : підручник. Київ : Вища освіта, 2005. 496 с.

28. Машини та обладнання для тваринництва : підручник / І. І. Ревенко, В. М. Манько, В. І. Кравчук та ін. Київ : Кондор, 2011. 731 с.

29. Ревенко І. І., Брагінець М. В., Заболотько О. О. Машини та обладнання для тваринництва : навч. посіб. Київ : Урожай, 2002. 288 с.

30. Проектування механізованих технологічних процесів тваринницьких підприємств : навч. посіб. / за ред. І. І. Ревенка. Київ : НУБіП України, 2014. 345 с.

31. Кравчук В. І., Погорілий Л. В. Сучасні тенденції розвитку сільськогосподарської техніки. Київ : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2018. 240 с.

32. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва : навч. посіб. / за ред. О. В. Дацишина. Київ : Урожай, 2006. 320 с.

33. Lely. Astronaut A5 Next. Automatic Milking Robot [Electronic resource]. URL: https://www.lely.com/solutions/milking/astronaut/ (date of access: 05.06.2026).

34. DeLaval. DeLaval VMS™ V300 Robotic Milking System [Electronic resource]. URL: https://www.delaval.com/en-gb/farm-solutions/milking/delaval-vms-series/delaval-vms-milking-system-v300/ (date of access: 05.06.2026).

35. GEA. DairyRobot R9500. Robotic milking system [Electronic resource]. URL: https://www.gea.com/en/campaigns/dairyrobot-r9500-edition-2021/ (date of access: 05.06.2026).

36. Lely. Discovery Collector. Manure robot for dairy barns [Electronic resource]. URL: https://www.lely.com/solutions/manure/discovery-collector/ (date of access: 05.06.2026).

37. Lely. Vector. Automatic feeding system [Electronic resource]. URL: https://www.lely.com/solutions/feeding/vector/ (date of access: 05.06.2026).

38. DeLaval. Dairy farming solutions and herd management systems [Electronic resource]. URL: https://www.delaval.com/ (date of access: 05.06.2026).

39. OECD. Digital Opportunities for Better Agricultural Policies. Paris : OECD Publishing, 2019. 110 p.

40. European Commission. Common Agricultural Policy: digitalisation of agriculture and rural areas [Electronic resource]. URL: https://agriculture.ec.europa.eu/ (date of access: 05.06.2026).

41. European Commission. REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe [Electronic resource]. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en (date of access: 05.06.2026).