НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

к.т.н., доц._____/**АНТИПОВ Є.О./**
(підпис)
«____» _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Система енергопостачання фермерського господарства з використанням біогазової і когенераційної установки»

Спеціальність 144 „Теплоенергетика”

Гарант освітньої програми
к.т.н., доцент **Шеліманова О.В.**
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) _____ (ПІБ)

Керівник дипломного проекту бакалавра
к.т.н., доцент **Горобець В.Г.**
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) _____ (ПІБ)

Виконав _____ **Коваленко М.А.**
(підпис) (ПІБ)

КИЇВ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

к.т.н., доц._____/**АНТИПОВ Є.О./**
(підпис)
«____»_____2025 р.

ЗАВДАННЯ
на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту
Коваленку Максиму Андрійовичу

Спеціальність 144 „Теплоенергетика”
Тема дипломного проєкту: « Система енергопостачання фермерського господарства з використанням біогазової і когенераційної установки»
затверджена наказом ректора НУБіП України від 24.10.2025 №2514"С".
Термін подання завершеного проєкту на кафедру 01 . 06 . 2026

Вихідні дані до дипломного проєкту бакалавра
1. Завдання кафедри теплоенергетики на дипломне проектування;
2. Матеріали виробничої практики
3. Нормативні документи по проектуванню енергетичних об'єктів.

Перелік питань, які необхідно розробити
1. Розглянути структуру і устаткування фермерського господарства
2. Виконати розрахунок добового та річного виходу екскрементів(з урахуванням змінних показників)
4. Проведення теплового розрахунку господарства
5. Розрахунок витрат тепла на коректне функціонування господарства
6. Електроенергетичний розрахунок господарства, вибір когенераційної установки
7. Загальний економічний обрахунок

Дата видачі завдання 28.10.2025 р.

Керівник дипломного проєкту бакалавра_____/Горобець В.Г./
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____/ Коваленко М.А/
(підпис) (ПІБ)

ЗМІСТ

ВСТУП 7

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ 10

1.1. Характеристика базового фермерського господарства, його структура та устаткування 10

1.1.1. Аналіз передового європейського досвіду впровадження біогазових технологій в агропромисловому комплексі 13

1.1.2. Класифікація та конструктивні особливості біогазових реакторів 14

1.1.3. Системи підготовки та очищення біогазу перед когенерацією 16

1.2. Екологічна складова використання відходів ВРХ та їх подальше використання 17

1.3. Обґрунтування мезофільного режиму бродіння субстрату 19

1.4. Обґрунтування та вибір двостадійної схеми когенераційної установки ... 21

1.5. Зауваження та рекомендації 22

1.6. Чому саме газопоршневий ДВЗ мікро-класу (на противагу мікротурбінам чи котлам) 23

РОЗДІЛ 2 ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ ТА КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ 24

2.1. Вихід біогазу: розрахунок через вміст сухої органічної речовини 24

2.1.1. Математичне обчислення маси сухих речовин 25

2.1.2. Обчислення добового та річного об'єму генерації біогазу 25

2.1.3. Енергетичний еквівалент палива 26

2.1.4. Реологія та теплофізичні властивості гною ВРХ 26

2.2. Конструктивний розрахунок метантенка 27

2.2.1. Визначення робочого об'єму реактора 27

2.2.2. Визначення повного геометричного об'єму 28

2.2.3. Розрахунок геометричних розмірів та площі поверхонь 29

2.3. Теплотехнічний розрахунок 30

2.4. Вибір внутрішнього теплообмінника 32

2.4.1. Обґрунтування матеріалу та конструкції 33

2.4.2. Розрахунок площі поверхні теплообмінника 33

2.5. Застосування сучасних програмних комплексів для теплотехнічних розрахунків 34

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРО-ЕНЕРГОВТРАТ ГОСПОДАРСТВА ТА ПІДБІР КОГЕНЕРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ 36

3.1. Розрахунок електричних та теплових енерговтрат (потреб) ферми на 100 голів ВРХ 36

3.1.1. Розрахунок електричних навантажень технологічного обладнання 36

3.1.2. Розрахунок теплових навантажень господарства 39

3.2. Розрахунок енергетичного потенціалу біогазу та підбір когенераційної установки 40

3.2.1. Обґрунтування вибору та технічні характеристики когенераційної установки 40

3.2.2. Розрахунок фактичної генерації енергії когенераційною установкою . 42

3.2.3. Синхронізація КГУ з локальною електромережею та якість енергії 42

3.3. Енергетичний баланс та інтеграція системи 43

3.3.1. Баланс електричної енергії 44

3.3.2. Баланс теплової енергії (для зимового періоду) 45

3.3.3. Технологічна схема підігріву питної води для ВРХ із використанням обладнання HERZ 47

3.4. Автоматизована система управління технологічним процесом (АСУ ТП) біогазової установки 48

3.4.1. Структура багаторівневої системи керування 48

3.4.2. Алгоритми аварійної безпеки (Safety Instrumented Systems)..... 49

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ТА ОКУПНІСТЬ ОБ’ЄКТУ 50

4.1. Розрахунок капітальних вкладень (CAPEX) 50

4.2 Розрахунок операційних витрат (OPEX) 53

4.3 Розрахунок річного економічного ефекту (доходів та заощаджень)..... 53

ВИСНОВКИ..... 55

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 56

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ТА ТЕРМІНІВ

- ВРХ — велика рогата худоба
- КГУ — когенераційна установка
- БГУ — біогазова установка
- ГВП — гаряче водопостачання
- ДВЗ — двигун внутрішнього згоряння
- ККД — коефіцієнт корисної дії
- СВ — суха речовина субстрату
- ОР — органічна речовина (суха органічна речовина)
- CAPEX (Capital Expenditures) — капітальні витрати (початкові інвестиції)
- OPEX (Operating Expenditures) — операційні (експлуатаційні) витрати
- PBP (Payback Period) — період (термін) окупності інвестицій
- $V_{доб}$ — добовий об'єм генерації біогазу, м³/добу
- $E_{хім}$ — повна хімічна енергія палива (біогазу), кВт·год
- $P_{вст}$ — встановлена електрична потужність обладнання, кВт
- $P_{ел.ном}$ — номінальна електрична потужність когенераційного модуля, кВт
- $P_{тепл.ном}$ — номінальна теплова потужність системи утилізації тепла КГУ, кВт
- $Q_{реактор}$ — теплова потужність, необхідна для підігріву та термостабілізації метантенка, кВт
- $k_в$ — коефіцієнт використання встановленої потужності
- τ (тау) — тривалість роботи обладнання або протікання процесу, год
- $η_{ел}$ (ета) — електричний коефіцієнт корисної дії, %
- $η_{тепл}$ (ета) — тепловий коефіцієнт корисної дії, %
- ρ (ро) — густина речовини (субстрату, води, газу), кг/м³
- $c_в$ — питома теплоємність води (або субстрату), кДж/(кг·°С)
- $T_{зовн}$ — розрахункова температура зовнішнього повітря, °С
- $T_{мез}$ — температура мезофільного режиму зброджування, °С
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- НУБіП – Національний університет біоресурсів і природокористування України;
- НДГ – навчально-дослідне господарство;

ВСТУП

Актуальність теми**.** На сучасному етапі розвитку економіки України питання енергетичної незалежності, диверсифікації джерел енергопостачання та підвищення енергоефективності є критично важливими для забезпечення життєдіяльності всіх галузей народного господарства. Особливої гостроти ця проблема набуває в аграрному секторі, де децентралізовані споживачі, такі як фермерські господарства, стикаються з постійним зростанням тарифів на традиційні енергоносії (природний газ, електричну енергію з мережі), незадовільною надійністю централізованих електричних мереж та частими аварійними відключеннями.

Разом з тим, підприємства агропромислового комплексу (АПК), зокрема тваринницькі та птахівничі ферми, володіють колосальним власним енергетичним потенціалом у вигляді вторинних біоресурсів — органічних відходів (гній, послід, залишки силосу тощо). Неконтрольоване накопичення цих відходів створює суттєве екологічне навантаження на навколишнє середовище, викликаючи забруднення підземних вод нітратами та емісію ув атмосферу значних об'ємів парникових газів (метану та вуглекислого газу).

Ефективним розв'язанням зазначених енергетичних та екологічних проблем є впровадження автономних систем енергопостачання на основі технологій анаеробного зброджування біомаси з подальшою когенераційним виробництвом енергії. Використання біогазових установок (БГУ) дозволяє переробляти відходи у високоякісні органічні добрива (біошлам), одночасно генеруючи відновлюваний енергоносій — біогаз. Спалювання біогазу в когенераційних установках (КГУ) на базі газопоршневих двигунів забезпечує спільне виробництво електричної та теплової енергії з високим загальним коефіцієнтом корисної дії (до 85–90%). Це дозволяє фермерському господарству повністю або частково перейти на самозабезпечення енергією, знизити собівартість кінцевої аграрної продукції та мінімізувати екологічні ризики.

Зв'язок роботи з науковими програмами**.** Робота виконується відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні, зокрема напряму «Енергетика та енергоефективність», а також концепцій розвитку відновлюваної енергетики та декарбонізації енергетичного сектора.

Мета і завдання дослідження**.** Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка та комплексне обґрунтування системи автономного енергопостачання фермерського господарства тепловою та електричною енергією шляхом інтеграції біогазової технології та когенераційного комплексу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан розвитку біогазових та когенераційних технологій, визначити потенціал сировинної бази обраного фермерського господарства.
2. Визначити добові та річні графіки споживання електричної та теплової енергії об'єктом проектування.
3. Розрахувати вихід біогазу, визначити оптимальний температурний режим анаеробного бродіння та геометричні параметри біореактора (метантенка).
4. Обґрунтувати вибір когенераційної установки відповідної потужності, розрахувати її теплову схему та баланс енергії.
5. Розробити заходи з автоматизації керування основними технологічними процесами установки та забезпечення надійної і безпечної роботи системи енергопостачання.
6. Оцінити екологічний ефект від впровадження розробленої системи та провести розрахунок техніко-економічних показників проєкту для підтвердження його доцільності.

Об'єкт дослідження — процеси трансформації хімічної енергії органічних відходів фермерського господарства в електричну та теплову енергію за допомогою біогазового комплексу та когенераційної установки.

Предмет дослідження — термодинамічні, конструктивні, режимні та техніко-економічні характеристики елементів системи автономного енергопостачання на базі БГУ та КГУ.

Методи дослідження**.** При виконанні роботи використано фундаментальні закони технічної термодинаміки та тепломасообміну, класичні методики розрахунку хімічного складу та теплотворної здатності палива, інженерні методи проектування теплообмінного обладнання та газопоршневих систем, а також методи техніко-економічного аналізу інвестиційних проєктів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в оптимізації схеми утилізації вторинного тепла когенераційної установки для підтримки стабільного мезофільного/термофільного режиму зброджування за умов перемінних зовнішніх кліматичних факторів, що дозволяє мінімізувати витрати енергії на власні потреби системи.

Практичне значення отриманих результатів**.** Розроблений проєкт системи енергопостачання є готовим технічним рішенням, яке може бути безпосередньо впроваджене на тваринницьких комплексах аналогічної потужності в Україні з метою підвищення їхньої енергетичної автономності та покращення екологічного стану довкілля.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ

1.1. Характеристика базового фермерського господарства, його структура та устаткування

На сучасному етапі розвитку агропромислового комплексу України фермерські господарства відіграють ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки держави. Об'єктом інженерного проектування у даній кваліфікаційній роботі обрано типове діюче фермерське господарство молочно-товарного напрямку, розраховане на утримання 100 голів великої рогатої худоби (ВРХ) дійного стада. Фізичне розташування об'єкта характеризується кліматичними умовами помірно-континентальної зони України, де розрахункова температура зовнішнього повітря для проектування систем опалення у зимовий період становить -20°С.

Виробнича діяльність та продуктивність Основний напрямок діяльності господарства — виробництво високоякісного сирого коров'ячого молока з подальшою його реалізацією на молокопереробні підприємства. Для забезпечення рентабельності господарство орієнтується на інтенсивні методи тваринництва. Середній річний надій на одну фуражну корову становить близько 7500–8000 кг молока. Приблизний добовий валовий надій по фермі складає близько 2000–2200 літрів, що вимагає безперебійної роботи доїльного обладнання та систем первинного охолодження молока для збереження його сортності та запобігання розвитку патогенної мікрофлори.

Спосіб утримання та годівлі На фермі застосовується стійлово-боксовий спосіб утримання корів протягом усього року без використання вигульних майданчиків. Цей підхід мінімізує енергетичні витрати тварин на рух, підвищує молочну продуктивність та, що критично важливо для нашого проекту,

забезпечує 100% збір екскрементів без домішок ґрунту та атмосферних опадів. Годівля здійснюється повнораціонними сумішами (TMR), що включають кукурудзяний силос, сінаж, концентровані корми та вітамінно-мінеральні добавки. Збалансований раціон не лише забезпечує високі надої, але й формує стабільний хімічний склад гною, що є ідеальною сировиною для подальшої метан-генерації в біогазовій установці.

Функціональне зонування та устаткування господарства

Для забезпечення повного циклу життєдіяльності та виробництва продукції, інфраструктура фермерського господарства поділена на кілька ключових технологічних зон і будівель, кожна з яких виконує специфічну функцію та має власне енергетичне навантаження:

Основний корівник (стійлове приміщення): Центральна будівля площею близько 1500 м², де тварини перебувають більшість часу. Корівник обладнаний автоматизованою системою мікроклімату (осьові вентилятори, припливні клапани), енергоефективним світлодіодним освітленням та автоматичними груповими напувалками.

Система гноєвидалення**:** Для підтримання санітарно-гігієнічних норм приміщення оснащене механізованою транспортерною системою на базі скребкових конвеєрів типу ТСН-160А. Видалення гною здійснюється тричі на добу (після кожного доїння та годівлі) безпосередньо у проміжний приймальний резервуар біогазової установки. Це запобігає аеробному розкладанню сировини та втраті біогазового потенціалу.

Доїльно-молочний блок: Окреме приміщення, де встановлено вакуумну доїльну установку типу «Ялинка» та холодильне обладнання (танк-охолоджувач молока). Саме ця будівля є найбільшим споживачем електроенергії на фермі в пікові години, оскільки процес доїння вимагає роботи потужних вакуумних насосів, а охолодження свіжого молока від +35°С до +4°С вимагає інтенсивної роботи компресорів.

Будівля для обмивки устаткування та інвентарю**:** Спеціалізоване санітарне приміщення, призначене для щоденної глибокої очистки, дезінфекції та зберігання мобільного доїльного інвентарю, молочних шлангів, фільтрів, а також деталей механізмів роздачі кормів. Будівля оснащена промисловими мийками високого тиску, автоматичними станціями CIP-мийки (Clean-In-Place) та стелажами для сушіння. Цей об'єкт є значним споживачем гарячої води, оскільки якісна дезінфекція молочного обладнання вимагає великих об'ємів води з температурою не менше 60-70°C.

Ветеринарний пункт (із зоною стаціонарного обслуговування на 5 ВРХ): Окремий ізольований блок, призначений для проведення планових зооветеринарних заходів, вакцинації, штучного осіменіння, лікування маститів та захворювань копит, а також для тимчасового ізолювання хворих тварин. Пункт розрахований на одночасне перебування до 5 голів великої рогатої худоби. Обладнаний фіксаційними станками (станками для обробки копит), локальними системами інфрачервоного обігріву для ослаблених тварин, холодильниками для зберігання вакцин та медикаментів, а також установками для стерилізації інструментів. Ветеринарний пункт вимагає цілодобового підтримання комфортного мікроклімату та наявності стабільного гарячого водопостачання.



Рис. 1.1 Приклад спрощеної архітектурної схематики господарства на 100 голів ВРХ

1.1.1. Аналіз передового європейського досвіду впровадження біогазових технологій в агропромисловому комплексі

Дослідження проблематики автономного енергозабезпечення фермерських господарств неможливе без глибокого ретроспективного та сучасного аналізу досвіду країн Європейського Союзу, які є беззаперечними світовими лідерами у сфері біоенергетики. Впровадження директив щодо відновлюваних джерел енергії (зокрема RED II — Renewable Energy Directive) та стратегії REPowerEU стимулювало безпрецедентний розвиток децентралізованих біогазових потужностей у Європі.

Абсолютним лідером є Німеччина, де станом на початок поточного десятиліття функціонує понад 9500 біогазових установок різної потужності. Німецька модель розвитку (так звана модель «Erneuerbare-Energien-Gesetz» — EEG) базується на концепції стимулювання малих фермерських установок (потужністю до 75–150 кВт). Для німецького фермера біогазова установка є таким самим невід'ємним елементом інфраструктури, як корівник чи тракторний парк. Особливістю німецького підходу є широке використання концепції «коферментації» — спільного зброджування гною ВРХ із енергетичними культурами (переважно кукурудзяним силосом), що дозволяє різко підвищити вихід біогазу з одного кубічного метра реактора. Однак останніми роками, через дискусії щодо використання орних земель для вирощування енергетичних культур замість продовольчих (конфлікт "Food vs. Fuel"), німецький уряд змістив фокус фінансової підтримки виключно на установки, що працюють на 100% відходах тваринництва — рідкому та твердому гної, що повністю корелює з тематикою даної кваліфікаційної роботи.

Данія демонструє інший, не менш ефективний підхід, який отримав назву «централізованої біогазової моделі». Данський уряд стимулює створення потужних біогазових кооперативів. Фермери з радіусу 15–20 кілометрів

постачають рідкий гній трубопроводами або цистернами на єдиний потужний завод, де відбувається його зброджування, а згодом забирають знезаражений дигестат назад на свої поля. Хоча така модель забезпечує високу економію на масштабі (economies of scale), для сучасних українських реалій з порушеною логістикою та високими ризиками централізованих об'єктів більш доцільною залишається німецька модель децентралізованої (індивідуальної) генерації, яка розглядається у цьому проєкті.

Аналіз європейського досвіду дозволяє виділити три ключові критерії успішності малих біогазових проектів на фермах ВРХ:

Максимальна автоматизація процесів завантаження та вивантаження субстрату для мінімізації витрат на персонал.

Стовідсоткова утилізація теплової енергії від когенератора (використання тепла не лише для підігріву метантенка, але й для сушіння кормів, опалення приміщень, санітарних потреб).

Застосування стандартизованих, серійних (контейнерних) рішень когенераційних модулів, що різко знижує капітальні витрати (CAPEX) на етапі монтажу.

1.1.2. Класифікація та конструктивні особливості біогазових реакторів

Апаратне оформлення процесу анаеробного зброджування є критичним етапом інженерного проєктування. Залежно від гідродинамічного режиму, вмісту сухої речовини в субстраті та способу подачі сировини, біореактори (метантенки) поділяються на кілька принципових типів:

Реактори безперервного перемішування (CSTR — Continuous Stirred Tank Reactor). Це класичний і найпоширеніший у світі тип метантенків, який застосовується для переробки рідких субстратів з вологістю 85-95% (що ідеально відповідає параметрам рідкого гною ВРХ). Реактор являє собою вертикальний циліндричний резервуар, виготовлений із монолітного залізобетону або

емальованої сталі. Головна особливість CSTR — наявність потужної системи механічного перемішування (заглибні або лопатеві мішалки), яка забезпечує повну гомогенізацію вмісту. Свіжий субстрат безперервно або дискретно (кілька разів на добу) подається в реактор, і такий самий об'єм відпрацьованого дигестату відводиться. Температурний режим та концентрація поживних речовин у будь-якій точці такого реактора є однаковими. Саме цей тип реактора було обрано для розрахунку в даній роботі через його найвищу надійність та адаптованість до гною великої рогатої худоби.

Реактори витіснення (Plug-Flow Reactors). Ці установки зазвичай мають форму довгого горизонтального каналу (траншеї), герметично закритого зверху еластичною мембраною, яка одночасно слугує газгольдером. Субстрат подається з одного кінця каналу і поступово (протягом 20-30 діб) переміщується до протилежного кінця, де вивантажується. Перемішування у класичних plug-flow реакторах майже відсутнє або є мінімальним. Їх перевагою є низькі капітальні витрати та простота конструкції. Проте вони придатні лише для густих субстратів (з вмістом сухої речовини 11-14%), які не розшаровуються під час руху. Для рідкого гною ВРХ без додавання соломи такі реактори є неефективними через швидке осідання твердих частинок на дно та утворення плаваючої кірки на поверхні.

Реактори з нерухомою біоплівкою (UASB — Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Це високотехнологічні реактори, розроблені переважно для очищення промислових стічних вод із дуже низьким вмістом завислих твердих речовин (наприклад, стоків пивоварень або молокозаводів). У таких установках метаногенні бактерії формують щільні гранули (активний мул) у нижній частині реактора. Рідина подається знизу вгору, проходячи через шар цих гранул. Хоча UASB-реактори забезпечують колосальну швидкість переробки, вони абсолютно не придатні для сільськогосподарського гною, оскільки тверді залишки корму та підстилки миттєво забивають систему розподілу рідини і руйнують гранули активного мулу.

1.1.3. Системи підготовки та очищення біогазу перед когенерацією

Сирий біогаз, що виходить із метантенка, не може бути безпосередньо використаний у газопоршневому двигуні когенераційної установки. Він містить низку домішок, які викликають інтенсивну корозію, абразивний знос та деградацію моторного мастила. Основними баластними та шкідливими компонентами є водяна пара та сірководень (H_2S).

Осушення біогазу**.** Сирий газ виходить із реактора при температурі 38-40°C і має 100% відносну вологість. При охолодженні газу в трубопроводах водяна пара конденсується. Конденсат утворює водяні пробки, що перешкоджають руху газу, а також розчиняє в собі сірководень та вуглекислий газ, утворюючи агресивні кислоти. Для осушення застосовуються спеціальні холодильні машини (чиллери). Біогаз пропускається через теплообмінник, де різко охолоджується до температури +3...+5°C (точка роси). Волога конденсується і відводиться через гідрозатвор, після чого сухий газ знову трохи підігрівається перед подачею в газову рампу двигуна.

Очищення від сірководню (Десульфуризація)**.** Вміст сірководню в біогазі з гною ВРХ може досягати 1000–3000 ppm (частин на мільйон). Для двигунів TEDOM гранично допустима концентрація становить зазвичай не більше 200-500 ppm. У світовій практиці застосовують два основні методи десульфуризації для малих фермерських установок:

Біологічне очищення (мікроаерація): У газовий простір метантенка дозовано (близько 2-3% від об'єму біогазу) подається атмосферне повітря. Специфічні тіобактерії (Thiobacillus), які оселяються на дерев'яних балках перекриття або спеціальних сітках під куполом, окислюють сірководень до елементарної сірки, яка випадає в осад у субстрат. Це найдешевший метод.

Хімічне очищення (адсорбційне)*:* Пропускання газу через фільтри, заповнені гранульованим активованим вугіллям або гранулами на основі оксиду

заліза. Цей метод забезпечує найвищий ступінь очищення (майже до 0 ppm), але вимагає періодичної заміни дорогого сорбенту.

Для даного проєкту оптимальним є комбінований підхід: грубе біологічне очищення в самому реакторі з подальшим доочищенням у вугільному фільтрі перед когенератором.

1.2. Екологічна складова використання відходів ВРХ та їх подальше використання

Історично склалося, що більшість вітчизняних фермерських господарств розглядають екскременти тварин виключно як відхід виробництва, який підлягає тривалому зберіганню у гноєсховищах (лагунах) під відкритим небом з подальшим внесенням на поля. Така практика супроводжується низкою критичних екологічних та економічних недоліків:

Емісія парникових газів. Під час природного анаеробного розкладу гною у відкритих лагунах виділяються колосальні об'єми метану (CH_4), який має парниковий ефект у 28–32 рази вищий, ніж діоксид вуглецю (CO_2), а також аміак (NH_3) та сірководень (H_2S), що забруднюють атмосферне повітря та викликають сморід.

Забруднення водних ресурсів**.** Фільтрат із необлаштованих гноєсховищ просочується у глибокі водоносні горизонти, викликаючи критичне перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) нітратів та нітритів у питній воді навколишніх населених пунктів.

Втрата поживних речовин**.** При тривалому зберіганні гною на відкритому повітрі втрачається до 50% азоту (переважно внаслідок випаровування амонійного азоту), що знижує його цінність як добрива.

Енергетичні втрати**.** Органічна складова відходів, яка могла б бути конвертована у високоліквідні енергоносії, безповоротно втрачається для економіки господарства.

Концепція сталого розвитку та циркулярної економіки передбачає заміну лінійної моделі «утворення відходів – утилізація» на замкнений цикл, де відходи тваринництва стають високоцінною енергетичною сировиною. Анаеробна переробка (метан-генерація) органічної сировини в спеціалізованих герметичних реакторах (метантенках) дозволяє одночасно вирішити три фундаментальні завдання:

Енергетичне**:** генерація стабільного, прогнозованого потоку біогазу, який, на відміну від сонячної чи вітрової генерації, не залежить від добових чи погодних умов і може використовуватись для базового покриття теплових та електричних навантажень.

Екологічне**:** повна локалізація викидів метану, дезодорація відходів (знищення смердючих сполук) та дегельмінтизація (знищення насіння бур'янів, патогенної мікрофлори, сальмонел та яєць гельмінтів під дією температурного фактора).

Агрохімічне: отримання мінералізованого залишку (дигестату), в якому азот, фосфор та калій перебувають у максимально доступній для рослин формі (хелатній формі), що дозволяє фермеру повністю відмовитись від купівлі дорогих мінеральних добрив хімічного синтезу.

Розрахунок добового та річного виходу екскрементів:

Обсяг утворення екскрементів тварин є величиною змінною і зазнає коливань залежно від живої маси тварини, її продуктивності (надою), періоду лактації, структури раціону та кількості технологічної води, що потрапляє у систему видалення гною під час зачищення.

Для розрахунку сировинної бази приймаємо вище вказані середньостатистичні нормативні дані для дійних корів живою масою 550–600 кг із середнім річним надоєм 7500–8000 кг молока. Згідно з вітчизняними нормами технологічного проектування (ВНТП-АПК-01.05) та європейськими довідниками (наприклад, стандартами німецького інженерного союзу VDI 4630),

питомий добовий вихід екскрементів (екскременти + сеча) на одну голову ВРХ дійного стада становить $m_0 = 55$ кг/добу.

Визначимо загальний добовий об'єм сировини, що надходить до системи ($m_{доб}$) за формулою 1.1:

$$m_{доб} = N \times m_0 \quad (1.1)$$

де N — поголів'я тварин, N = 100 голів.

$$m_{доб} = 100 \times 55 = 5500 \text{ кг/добу} = 5,5 \text{ т/добу} \quad (1.2)$$

Враховуючи коливання у фізіологічному стані тварин, заміні раціонів та проведенні санітарних днів, річний обсяг утворення екскрементів $m_{рік}$ розраховується з урахуванням коефіцієнта технологічної нерівномірності та тривалості стійлового періоду у 365 днів за формулою 1.2:

$$m_{рік} = m_{доб} \times 365 = 5,5 \times 365 = 2007,5 \text{ т/рік} \quad (1.3)$$

Аналіз сировини показує, що гній ВРХ характеризується високою початковою вологістю (W = 86...89%), що робить його ідеальним субстратом для технологій «мокрого» (рідкого) анаеробного зброджування без необхідності додаткового штучного розрідження теплою водою.

1.3. Обґрунтування мезофільного режиму бродіння субстрату

Анаеробна конверсія органічної речовини здійснюється складним консорціумом мікроорганізмів, який ділиться на три основні групи: гідролітичні, ацидогенні (кислотоутворюючі) та метаногенні археї. Ключовим фактором, що визначає швидкість ферментації, питомий вихід газу та конструктивні розміри обладнання, є температурний режим усередині біореактора. У світовій інженерній практиці виділяють три температурні діапазони:

1. Психрофільний режим (15...25º С): Характеризується низькою швидкістю метаболізму бактерій. Час повного зброджування сировини становить від 50 до 100 діб, що вимагає будівництва реакторів гігантських

об'ємів. Для промислових об'єктів у кліматичних умовах України цей режим є неефективним і не застосовується.

2. Мезофільний режим (35...40º С, оптимум 37-38º С)**:** Оптимальний баланс між швидкістю реакції та термодинамічною стабільністю системи.

3. Термофільний режим (50...55º С): Забезпечує максимально високу швидкість розкладу та високий ступінь дезінфекції субстрату.Проте він потребує витрати значної кількості теплової енергії на підігрів свіжого субстрату взимку та є надзвичайно чутливим до найменших коливань температури (відхилення всього на ±1º С здатне заблокувати роботу метаногенів на кілька тижнів через температурний шок).

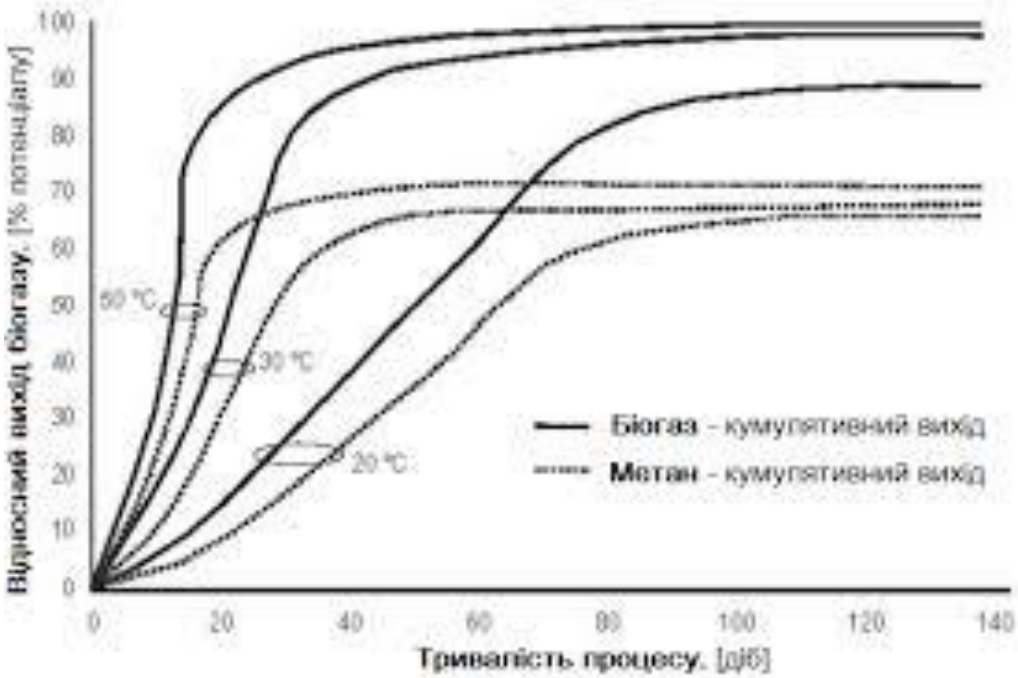


Рис. 1.2 Графік процесів зброджения та виходу біогазу

Для проектованої ферми на 100 голів ВРХ науково та інженерно обґрунтованим є вибір саме мезофільного режиму бродіння з підтриманням постійної температури 38ºС. Цей вибір базується на наступних фундаментальних аргументах:

1. Біологічна стабільність системи**.** Мезофільна мікрофлора є значно стійкішою до коливань хімічного складу сировини (наприклад, при зміні раціону

годівлі корів чи потраплянні дезінфікуючих засобів після промивки молочних ліній) та коливань температури в межах ± 2º С. Для невеликого господарства, де немає можливості утримувати штат вузькопрофільних мікробіологів-лаборантів, цей фактор є вирішальним для забезпечення безперебійної експлуатації установки.

2. Оптимізація внутрішнього теплового балансу**.** Оскільки розрахунковий зимовий період характеризується суворими морозами ($T_{зовн}$ = -20º С), підігрів 5,5 тонн гною з початкової температури +5º С до термофільної +55º С вимагав би витрати понад 45% усього згенерованого установкою тепла. Підтримка мезофільного режиму (38º С) суттєво знижує паразитичні теплові витрати самої БГУ, збільшуючи корисний відпуск тепла на потреби ферми (ГВС, опалення).

3. Гідравлічний час утримання (HRT**).** У мезофільному режимі для гною ВРХ час експозиції (перебування субстрату в реакторі) становить від 15 до 20 діб. Це дозволяє досягти ступеня розкладу органічної речовини на рівні 50-60%, що є оптимальним з точки зору капітальних витрат на об'єм метантенка.

1.4. Обґрунтування та вибір двостадійної схеми когенераційної установки

Генерація біогазу в метантенку відбувається безперервно, проте обсяги його накопичення та потреби господарства в енергії мають динамічний характер. Для перетворення хімічної енергії біогазу в корисну електричну та теплову енергію застосовують технологію когенерації (Combined Heat and Power — CHP).

У даному проекті обґрунтовано впровадження двостадійної (двоконтурної) схеми когенераційної установки (КГУ**)** на базі стаціонарного газопоршневого двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), який адаптований під роботу на

низькокалорійному газі з високим вмістом метану (55-65%).

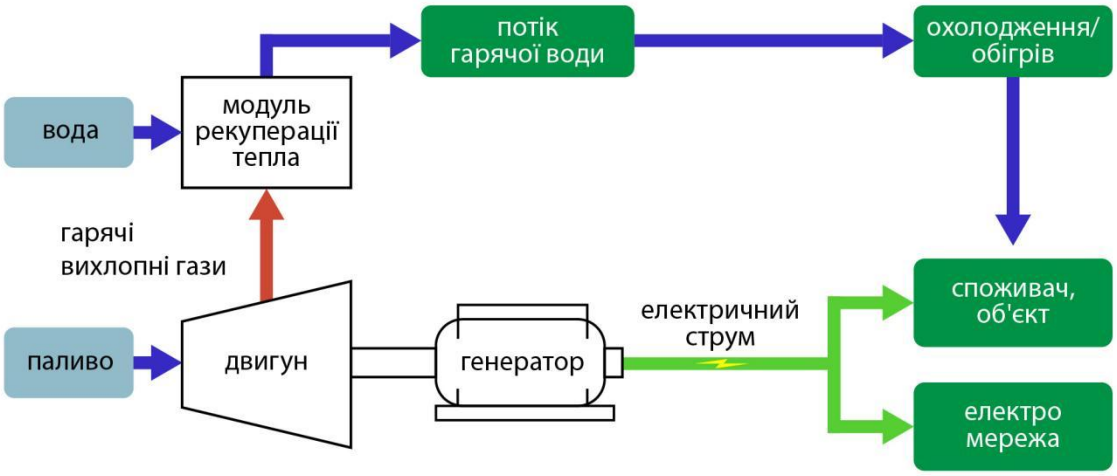


Рис. 1.3. Спрощена схема КГУ

1.5. Зауваження та рекомендації

Варто зауважити що у випадку надмірної генерації електроенергії варто “віддавати” надлишок у мережу. Таким чином забезпечуючи підтримку регіональної мережі на випадок блекаутів.

Класичний когенераційний модуль на базі ДВЗ генерує теплову енергію з двох принципово різних джерел, які мають різні температурні потенціали. Двостадійна схема утилізації розділяє та послідовно інтегрує ці контури:

1) Перша стадія (Низькотемпературний контур охолодження ДВЗ): Тепло знімається з сорочки охолодження блоку циліндрів двигуна та контуру змащувального масла. Температура теплоносія (води) на виході з цього контуру становить 80...85° С. Це тепло характеризується високою стабільністю і є ідеальним для підтримки технологічних процесів самого біогазового комплексу — воно подається на внутрішній теплообмінник метантенка для компенсації тепловтрат та підігріву свіжого субстрату.

2) Друга стадія (Високотемпературний контур утилізації вихлопних газів): Вихлопні гази покидають камери згоряння ДВЗ із температурою 450...500ºС Вони спрямовуються у спеціалізований високонадійний трубчастий або пластинчастий утилізаційний теплообмінник гази-вода (економайзер). Тут мережева вода нагрівається до температури 90...95ºС (а за потреби — з перегрівом під тиском). Цей високопотенційний тепловий потік спрямовується безпосередньо на зовнішні потреби фермерського господарства: систему гарячого водопостачання (миття доїльного обладнання, резервуарів для молока, що потребує води з температурою не менше 65-70ºС) та опалення виробничих і побутових споруд у зимовий період.

1.6. Чому саме газопоршневий ДВЗ мікро-класу (на противагу мікротурбінам чи котлам)

1. Високий електричний ККД: Газопоршневі двигуни малого класу потужності (10–30 кВт) забезпечують електричний ККД на рівні 30-33%, тоді як мікротурбіни аналогічної потужності рідко перевищують 20-22%.

2. Еластичність до палива: Сучасні ДВЗ європейських виробників оснащуються електронними системами контролю стехіометричного складу паливної суміші (Lean Burn технології). Вони здатні стабільно працювати при коливаннях концентрації метану в біогазі в межах ±10%, що часто трапляється на практиці при зміні вологості субстрату.

Автономність запусків**:** Система здатна працювати у режимі «Black Start» (запуск за відсутності напруги в зовнішній мережі за рахунок власних акумуляторних батарей), що гарантує повну енергетичну безпеку ферми під час блекаутів.

РОЗДІЛ 2
ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ ТА КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

2.1. Вихід біогазу: розрахунок через вміст сухої органічної речовини

Для точного визначення кількості та енергетичного потенціалу біогазу, який може бути отриманий в процесі анаеробного зброджування, недостатньо знати лише загальну масу вологого гною. Ключовим хіміко-технологічним показником є вміст сухої речовини (СР, або Total Solids — TS) та сухої органічної речовини (ОСР, або Volatile Solids — VS), оскільки метаногенні бактерії розщеплюють саме органічну складову субстрату.

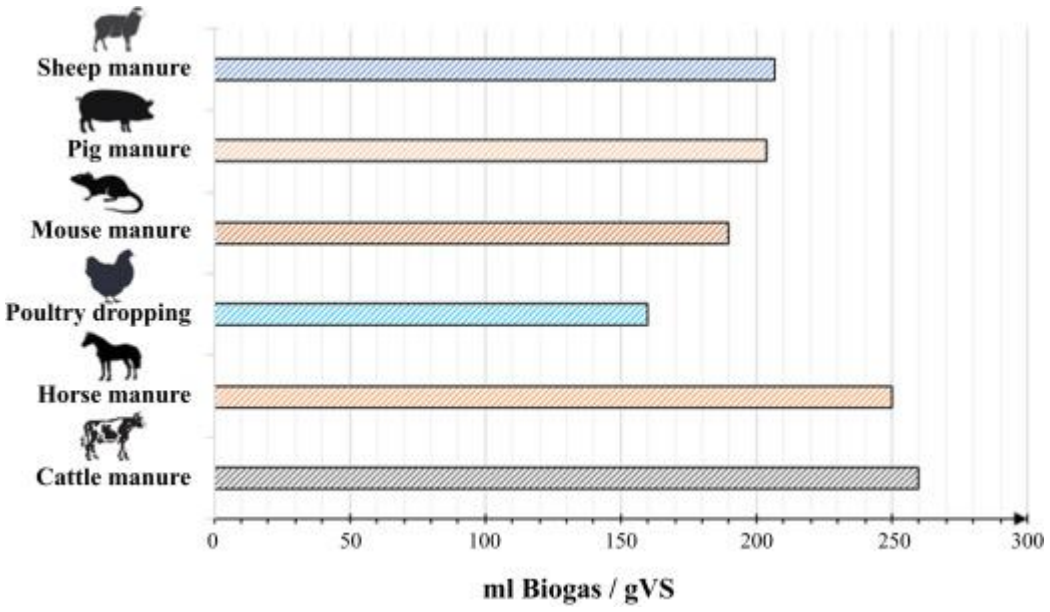


Рис. 2.1 Лінійний-порівняльний графік залежності виходу біогазу на грам сухої речовини

Згідно з інженерними довідниками та експериментальними даними для діючих ферм ВРХ із стійловим утриманням в Україні, вихідні фізико-хімічні параметри гною мають такі значення:

1. Загальна маса вологого субстрату, що надходить за добу: $m_{доб} = 5500$ кг/добу.
2. Початкова вологість гною ВРХ: W = 88% (відповідно, вміст сухої речовини становить $T_S = 100\% - 88\% = 12\%$, або у відносних одиницях $X_{ср} = 0,12$).
3. Вміст органічної речовини у складі сухого залишку для ВРХ: $V_S = 80\%$ (у відносних одиницях від СР: $X_{оср} = 0,80$).

2.1.1. Математичне обчислення маси сухих речовин

Визначаємо повну добову масу сухої речовини (mcp), яка потрапляє до метантенка за формулою 2.1:

$$m_{ср} = m_{доб} * X_{ср} = 5500 \times 0,12 = 660 \text{ кг/добу} \quad (2.1)$$

Оскільки мінеральна частина гною (пісок, солі, попел) не підлягає біохімічному розкладу мікроорганізмами, розраховуємо чисту добову масу сухої органічної речовини ($m_{оср}$), яка є безпосереднім джерелом живлення для метаногенів за формулою 2.2:

$$m_{оср} = mcp * X_{оср} = 660 \times 0,80 = 528 \text{ кг/добу} \quad (2.2)$$

2.1.2. Обчислення добового та річного об'єму генерації біогазу

Питомий вихід біогазу ($q_б$) з одного кілограма сухої органічної речовини гною ВРХ за умов дотримання мезофільного режиму (38º С) та часу затримки в 20 діб становить у середньому 0,38 м3/кг ОСР.

Розраховуємо загальний об'єм біогазу, що генерується установкою за добу (Vдоб) за формулою 2.3:

$$V_{доб} = m_{оср} \times qб = 528 \times 0,38 = 200,64 \text{ м3/добу} \quad (2.3)$$

Відповідно, прогнозований річний об'єм виробництва біогазу (Vрік) становитиме за формулою 2.4:

$$V_{рік} = V_{доб} \times 365 = 200,64 \times 365 = 73233,6 \text{ м3/рік} \quad (2.4)$$

2.1.3. Енергетичний еквівалент палива

Середній хімічний склад отриманого біогазу без глибокого очищення: метан (CH_4) — 60%, вуглекислий газ (CO_2) — 38%, інші домішки (H_2S, N_2, O_2, H_2O) — 2%. Нижча теплота згоряння ($Q_н$) такого біогазу становить: $Q_н$ = 21,6 МДж/м3 ≈ 6,0 кВт·год/м3

Загальний добовий потенціал хімічної енергії, що міститься в біогазі ($E_{хім}$) за формулою 2.5:

$$E_{хім} = V_{доб} \times Q_н = 200,64 \times 6,0 = 1203,84 \text{ кВт·год/добу} \quad (2.5)$$

2.1.4. Реологія та теплофізичні властивості гною ВРХ

Для коректного проведення теплотехнічних розрахунків необхідно детально розуміти реологічну поведінку (характер течії) та теплофізичні властивості гною. Рідкий гній великої рогатої худоби не є ньютонівською рідиною (як чиста вода). Це складна, багатокомпонентна, дисперсна, псевдопластична система.

Зі збільшенням вмісту сухої речовини (понад 8-10%) в'язкість гною починає зростати експоненціально, що різко погіршує умови конвективного теплообміну всередині метантенка. Крім того, в'язкість такого субстрату залежить від градієнта швидкості зсуву: чим інтенсивніше працює мішалка, тим

більш "рідким" стає гній у зоні її дії (явище тиксотропії). Саме через цю властивість у розрахунках площі теплообмінника (Розділ 2.4.2) застосовується коефіцієнт запасу (1,5), оскільки біля стінок реактора швидкість руху рідини мінімальна, утворюється так званий пристінковий ламінарний підшар із підвищеною в'язкістю, який чинить значний термічний опір передачі тепла від гарячої труби до основного об'єму субстрату.

Питома теплоємність субстрату також має вирішальне значення. Оскільки гній ВРХ при стійловому утриманні має вологість на рівні 88-90%, його термодинамічні властивості наближаються до властивостей води. Проте наявність органічної суспензії дещо знижує загальну теплоємність порівняно з дистильованою водою. Для практичних інженерних розрахунків прийнято використовувати уніфікований показник питомої теплоємності 4,187 кДж/(кг·°С), оскільки теплотою екзотермічних біохімічних реакцій (теплотою, що виділяється самими бактеріями під час розщеплення органіки) зазвичай нехтують у запас надійності системи теплопостачання.

2.2. Конструктивний розрахунок метантенка

Метантенк є центральним технологічним елементом біогазової установки, у якому підтримуються герметичність, постійна температура та безперервне перемішування. Його геометричні розміри повинні забезпечувати перебування кожної порції субстрату протягом строго визначеного гідравлічного часу утримання (HRT — Hydraulic Retention Time).

2.2.1. Визначення робочого об'єму реактора

Для гною ВРХ у мезофільному діапазоні для стабільного розщеплення клітковини та жирів приймаємо час експозиції HRT = 20 діб. Густина рідкого гною близька до густини води і становить $\rho \approx 1000$ кг/м3 (або 1 т/м3).

Необхідний корисний (робочий) об'єм метантенка ($V_{роб}$), який буде постійно заповнений рідким субстратом, обчислюється за формулою 2.6:

$$V_{роб} = (m_{доб} / \rho) * HRT = (5500 / 1000) * 20 = 5{,}5 \text{ м3/добу} * 20 \text{ діб} = 110 \text{ м3} \quad (2.6)$$

2.2.2. Визначення повного геометричного об'єму

У верхній частині метантенка необхідно передбачити буферну газову зону (газовий простір) для короткочасного збору та вирівнювання тиску біогазу перед його відведенням у газгольдер. Об'єм газової зони приймається в межах 20% від загального об'єму резервуара (коефіцієнт заповнення реактора $\eta = 0{,}8$).

Повний геометричний об'єм метантенка ($V_{повн}$) за формулою 2.7:

$$V_{повн} = V_{роб} / \eta = 110 / 0{,}8 = 137{,}5 \text{ м3} \quad (2.7)$$

Згідно з рядами стандартних ємностей промислових резервуарів, до встановлення приймається вертикальний циліндричний залізобетонний метантенк із повним об'ємом 140 м3.

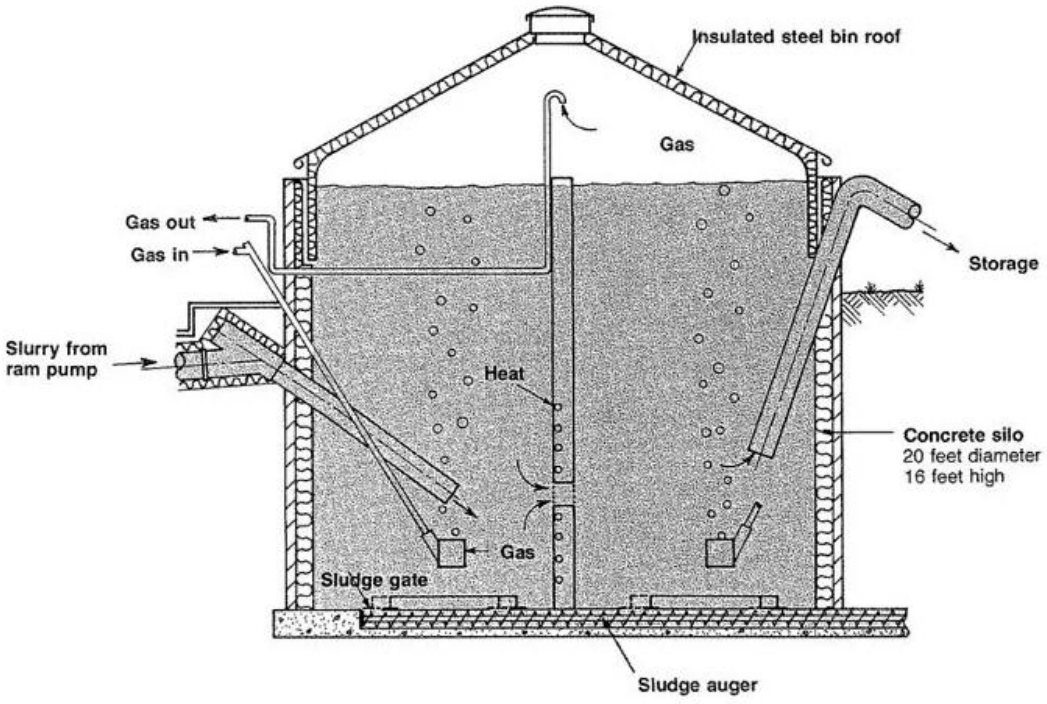


Рис. 2.2 Схематичний рисунок біогазової установки

2.2.3. Розрахунок геометричних розмірів та площі поверхонь

Для мінімізації тепловтрат через зовнішні огороджувальні конструкції оптимальним є співвідношення внутрішнього діаметра (D) до висоти циліндричної частини (H) як D : H ≈ 1,2 ... 1,5. Приймаємо внутрішній діаметр реактора D = 6,0 м.

Тоді робоча висота заповнення циліндра ($H_{роб}$) становить за формулою 2.8:

$$H_{роб} = (4 \times V_{роб}) / (3{,}1416 \times D^2) = (4 \times 110) / (3{,}1416 \times 6{,}0^2) = 440 / 113{,}1 \approx 3{,}9 \text{ м} \quad (2.8)$$

Повна внутрішня висота резервуара з урахуванням газової зони ($H_{повн}$) за формулою 2.9:

$$H_{повн} = (4 \times V_{повн}) / (3{,}1416 \times D^2) = (4 \times 140) / (3{,}1416 \times 6{,}0^2) = 560 / 113{,}1 \approx 4{,}95 \text{ м} \quad (2.9)$$

Округляємо повну конструктивну висоту стінок до H = 5,0 м.

Розраховуємо площі поверхонь метантенка для подальшого розрахунку тепловтрат через огородження:

1. Площа днища (основи) за формулою 2.10:

$$A_{дн} = (3{,}1416 \times 6{,}0^2) / 4 = 28{,}27 \text{ м2} \quad (2.10)$$

2. Площа бічної циліндричної стіни за формулою 2.11:

$$A_{ст} = 3{,}1416 \times D \times H = 3{,}1416 \times 6{,}0 \times 5{,}0 = 94{,}25 \text{ м}^2 \quad (2.11)$$

3. Площа верхнього перекриття (купола/даху): Через конструктивні особливості (конічна або напівсферична форма) площа даху приймається з коефіцієнтом 1,1 від площі основи за формулою 2.12:

$$A_{дах} = 1{,}1 \times 28{,}27 = 31{,}10 \text{ м}^2 \quad (2.12)$$

4. Загальна площа зовнішньої поверхні теплообміну метантенка ($A_{заг}$) за формулою 2.13:

$$A_{заг} = A_{дн} + A_{ст} + A_{дах} = 28{,}27 + 94{,}25 + 31{,}10 = 153{,}62 \text{ м}^2 \quad (2.13)$$

2.3. Теплотехнічний розрахунок

Теплотехнічний розрахунок виконується для найменш сприятливих умов — зимового розрахункового періоду, коли температура зовнішнього повітря сягає найнижчих значень, а гній надходить із тваринницького приміщення значно охолодженим.

Вихідні дані для проектування теплового режиму:

- Необхідна температура всередині метантенка:

$$T_{вн} = 38 \text{ °C}.$$

- Розрахункова температура зовнішнього повітря взимку:

$$T_{зовн} = -20 \text{ °C}.$$

- Температура ґрунту на глибині закладання основи метантенка:

$$T_{гр} = +5 \text{ °C}.$$

- Початкова температура свіжого гною, що надходить із корівника взимку:

$$T_{поч} = +5 \text{ °C}.$$

- Питома теплоємність субстрату (приймається рівною теплоємності води через високу вологість):

$$c = 4{,}187 \text{ кДж/(кг·°C)}.$$

а) Витрати тепла на підігрів свіжого субстрату ($Q_{підігрів}$)

Щодня до реактора порційно або безперервно завантажується 5500 кг холодного гною. Для підтримання життєдіяльності бактерій цю масу необхідно

нагріти від початкової температури +5 °С до режимної +38 °С. Кількість тепла на підігрів за добу обчислюється за формулою 2.14:

$$Q_{підігрів} = m_{доб} \times c \times (T_{вн} - T_{поч}) \; Q_{підігрів} = 5500 \text{ кг} \times 4{,}187 \text{ кДж/(кг·°С)} \times (38 - 5) \text{ ºС} = 5500 \times 4{,}187 \times 33 = 759938{,}5 \text{ кДж/добу} \quad (2.14)$$

Переведемо отримане значення в загальноприйняті в теплоенергетиці кВт·год (1 кВт·год = 3600 кДж) за формулою 2.15:

$$Q_{підігрів.кВт} = 759938{,}5 / 3600 \approx 211{,}09 \text{ кВт·год/добу} \quad (2.15)$$

б) Втрати тепла через зовнішні огороджувальні стінки метантенка ($Q_{втрати}$)

Для мінімізації витоку тепла залізобетонні стіни та купол метантенка покриваються шаром ефективного теплоізоляційного матеріалу (пінополістирол або мінеральна вата завтовшки 100 мм). Розрахункові коефіцієнти теплопередачі (k) з урахуванням термічного опору шарів становлять:

- через ізольовані стіни та дах обчислюємо за формулою 2.16:

$$k_{ст} = k_{дах} = 0{,}45 \text{ Вт/(м2·°С)}; \quad (2.16)$$

- через днище в ґрунт:

$$k_{дн} = 0{,}35 \text{ Вт/(м2·°С)}.$$

Обчислюємо добові втрати тепла теплопередачею через кожен елемент конструкції:

- Втрати через стіни обчислюємо за формулою 2.17:

$$Q_{втрати.ст} = k_{ст} * Аст * (Твн - Тзовн) * 24 \text{ год} = 0{,}45 * 94{,}25 * (38 - (-20)) * 24 = 0{,}45 * 94{,}25 * 58 * 24 = 59038{,}2 \text{ Вт·год} \approx 59{,}04 \text{ кВт·год/добу} \quad (2.17)$$

- Втрати через дах обчислюємо за формулою 2.18:

$$Q_{втрати.дах} = k_{дах} \times A_{дах} \times (T_{вн} - T_{зовн}) \times 24 \text{ год} = 0{,}45 \times 31{,}10 \times (38 - (-20)) \times 24 = 0{,}45 \times 31{,}10 \times 58 \times 24 = 19477{,}9 \text{ Вт·год} \approx 19{,}48 \text{ кВт·год/добу} \quad (2.18)$$

- Втрати через днище в ґрунтобчислюємо за формулою 2.19:

$$Q_{втрати.дн} = k_{дн} \times A_{дн} \times (T_{вн} - T_{гр}) \times 24 \text{ год} = 0,35 \times 28,27 \times (38 - 5) \times 24 = 0,35 \times 28,27 \times 33 \times 24 = 7838,9 \text{ Вт·год} \approx 7,84 \text{ кВт·год/добу} \quad (2.19)$$

- Сумарні добові втрати тепла через будівельні конструкції реактора становлять за формулою 2.20:

$$Q_{втрати.заг} = Q_{втрати.ст} + Q_{втрати.дах} + Q_{втрати.дн} = 59,04 + 19,48 + 7,84 = 86,36 \text{ кВт·год/добу} \quad (2.20)$$

в) Загальний тепловий баланс метантенка

Повний добовий обсяг теплової енергії ($Q_{реактор}$), який необхідно безперервно підводити до метантенка для компенсації всіх витрат у зимовий розрахунковий період, обчислюється за формулою 2.21:

$$Q_{реактор} = Q_{підігрів}.кВт + Q_{втрати.заг} = 211,09 + 86,36 = 297,45 \text{ кВт·год/добу} \quad (2.21)$$

У перерахунку на середньогодинну теплову потужність внутрішньої системи підігріву ($N_{тепл.сер}$) обчислюється за формулою 2.22:

$$N_{тепл.сер} = 297,45 \text{ кВт·год} / 24 \text{ год} \approx 12,4 \text{ кВт} \quad (2.22)$$

2.4. Вибір внутрішнього теплообмінника

Для передачі необхідної теплової потужності (12,4 кВт) від контуру охолодження когенераційної установки всередину біореактора обґрунтовано використання внутрішнього трубчастого спірального теплообмінника (змійовика), змонтованого на внутрішніх стінках метантенка по всьому периметру.



Рис. 2.3 Приклад монтажу внутрішнього трубчастого спірального теплообмінника (змійовика)

2.4.1. Обґрунтування матеріалу та конструкції

Субстрат (гній ВРХ) є агресивним хімічним середовищем. Використання звичайних вуглецевих сталей призведе до наскрізної корозії труб. Тому для виготовлення змійовика обрано високоякісну корозійностійку нержавіючу сталь марки AISI 316L (номінальний зовнішній діаметр труби $d_{зовн}$ = 50 мм, товщина стінки 2 мм).

2.4.2. Розрахунок площі поверхні теплообмінника

Теплоносієм виступає гаряча вода, що надходить від сорочки охолодження КГУ з температурою $T_{вхід}$ = 80 °С і повертається з температурою $T_{вихід}$ = 60 ºС. Середня температура теплоносія: $T_{сер.т}$ = (80 + 60) / 2 = 70 °С. Температура середовища в реакторі: $T_{вн}$ = 38 ºС.

Середній температурний напір розраховується за формулою 2.23:

$$\Delta T_{сер} = T_{сер.т} - T_{вн} = 70 - 38 = 32^{º} C \quad (2.23)$$

Коефіцієнт теплопередачі від гарячої води через стінку нержавіючої труби до густого рідкого гною приймається рівним

$$k_{то} = 450 \text{ Вт/(м2·°C)}.$$

Необхідна площа поверхні теплообміну змійовика (Ато) визначається з основного рівняння теплопередачі розраховується за формулою 2.24:

$$A_{то} = (N_{тепл.сер} \times 1000) / (k_{то} \times \Delta T_{сер}) = 12400 \text{ Вт} / (450 \times 32) = 12400 / 14400 \approx 0{,}86 \text{ м}^2 \quad (2.24)$$

Для забезпечення експлуатаційного запасу на випадок підвищення в'язкості субстрату вводиться коефіцієнт запасу 1,5. Розрахункова площа поверхні теплообмінника розраховується за формулою 2.25:

$$(A_{то.розр}): A_{то.розр} = 0{,}86 \times 1{,}5 = 1{,}29 \text{ м}^2 \quad (2.25)$$

Розрахуємо необхідну довжину нержавіючої труби за формулою 2.26:

$$(L_{тр}): L_{тр} = A_{то.розр} / (3{,}1416 \times d_{зовн}) = 1{,}29 / (3{,}1416 \times 0{,}050) = 1{,}29 / 0{,}157 \approx 8{,}2 \text{ м} \quad (2.26)$$

Приймаємо до встановлення внутрішній теплообмінний контур із загальною довжиною труби 10 метрів, виконаний у вигляді змійовика типу "меандр" (зигзагом) на одній із внутрішніх стінок метантенка біля зони завантаження субстрату»

2.5. Застосування сучасних програмних комплексів для теплотехнічних розрахунків

Проєктування систем теплопостачання фермерського комплексу від когенераційної установки є складним багатокритеріальним завданням. Воно включає гідравлічний розрахунок теплових мереж, підбір діаметрів

трубопроводів, балансувальної арматури та визначення точних теплових втрат будівель (корівників, доїльно-молочного блоку, ветеринарного пункту).

Виконання таких розрахунків виключно аналітичними (ручними) методами часто призводить до перерозмірення обладнання (закладання надлишкових коефіцієнтів запасу) або, навпаки, до гідравлічного розбалансування системи. Для підвищення точності та надійності проєктування у сучасній теплоенергетиці активно впроваджуються технології інформаційного моделювання будівель та спеціалізовані системи автоматизованого проєктування.

Зокрема, для детального визначення теплової потужності, необхідної для покриття трансмісійних та інфільтраційних втрат будівель ферми, а також для проєктування самої теплової мережі (визначення втрат тиску, підбору циркуляційних насосів) доцільно застосовувати професійні інженерні комплекси, такі як лінійка програм Audytor (OZC для розрахунку тепловтрат та CO для проєктування систем опалення). Використання таких сертифікованих інструментів дозволяє з високою точністю симулювати роботу системи теплопостачання на різних експлуатаційних режимах, оптимізувати температурний графік теплоносія (наприклад, 80/60°C або 90/70°C від когенератора) і гарантувати безперебійне забезпечення тепловою енергією як самого біореактора, так і супутніх господарських будівель.

РОЗДІЛ 3
РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРО-ЕНЕРГОВТРАТ ГОСПОДАРСТВА ТА ПІДБІР КОГЕНЕРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

3.1. Розрахунок електричних та теплових енерговтрат (потреб) ферми на 100 голів ВРХ

Для побудови точного та збалансованого проекту автономного енергозабезпечення об'єкта необхідно виконати детальний погодинний та добовий аналіз споживання електричної та теплової енергії. Сучасна молочно-товарна ферма є комплексним споживачем, де графік електричного навантаження має виражені технологічні піки, які збігаються з процесами ранкового, денного та вечірнього доїння корів, а також первинного охолодження молока.

Теплові потреби ферми складаються з витрат на гаряче водопостачання (ГВС), яке є критично важливим для підтримання належної санітарії (промивка доїльних ліній, танків-охолоджувачів молока, санітарна обробка вимені), та опалення адміністративно-побутових приміщень і секцій для утримання молодняку в холодний період року.

3.1.1. Розрахунок електричних навантажень технологічного обладнання

Визначимо основні групи електроспоживачів і розрахуємо їхнє добове споживання енергії за формулою 3.1:

$$(E_{ел.і} = P_{вст.і} \times k_{в.і} \times t_і \quad (3.1)$$

де $P_{вст.і}$ — встановлена потужність і-го електроприводу, кВт;

$k_{в.і}$ — коефіцієнт використання потужності (враховує завантаження двигуна);

$t_і$ — тривалість роботи обладнання протягом доби, год.



Рис 3.1 Приклад розташування ВРХ за схемою “Ялинка”

1) Вакуумна доїльна система: Для механізованого доїння 100 голів ВРХ в існуючих умовах застосовується доїльна установка (наприклад, типу «Ялинка» 2х4). Система комплектується двома вакуумними агрегатами потужністю $P_{вст}$ = 4,0 кВт кожен. Процес доїння відбувається двічі на добу (ранкове та вечірнє), тривалість кожного циклу з урахуванням підготовчих операцій становить 2,5 години. Коефіцієнт використання потужності $k_в$ = 0,85.

Добова тривалість роботи розраховується за формулою 3.2:

$$t = 2 \times 2{,}5 = 5{,}0 \text{ год. } E_{ел.доїння} = 2 \times 4{,}0 \times 0{,}85 \times 5{,}0 = 34{,}0 \text{ кВт·год/добу} \qquad (3.2)$$

2) Холодильне обладнання (танк-охолоджувач молока): Відповідно до санітарних вимог, видоєне молоко з початковою температурою +35 ºС необхідно протягом двох годин охолодити до температури +4 °С для пригнічення розвитку бактерій та збереження сортності. Для об'єму молока від 100 корів (при середньому добовому надої 25 л на корову загальний об'єм становить близько 2500 л) застосовується танк-охолоджувач із компресорно-конденсаторним агрегатом встановленою потужністю $P_{вст}$ = 4,5 кВт. Компресор працює в циклічному режимі за сигналами термодатчиків.

Сумарний чистий час роботи компресора на добу становить t = 6,0 год, коефіцієнт використання $k_в$ = 0,9 тож використовуємо формулу 3.3.

$$E_{ел.охолодження} = 4,5 \times 0,9 \times 6,0 = 24,3 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.3)$$

3) Система механізованого гноєвидалення: Видалення гною з корівника здійснюється за допомогою двох скребкових транспортерів ТСН-160А. Встановлена потужність електродвигуна одного транспортера становить $P_{вст}$ = 5,5 кВт. Очищення приміщень проводиться тричі на добу, тривалість одного циклу очищення — 1,0 година.

Коефіцієнт використання потужності $k_в$ = 0,75 (через нерівномірність навантаження по довжині контуру). Добова тривалість роботи: t = 3 × 1,0 = 3,0 год, отже використовуємо формулу 3.4

$$E_{ел.гній} = 2 \times 5,5 \times 0,75 \times 3,0 = 24,75 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.4)$$

4) Електроприводи систем вентиляції та освітлення корівника: Для забезпечення оптимального мікроклімату та світлового дня (16 годин) на фермі експлуатуються енергоефективні світлодіодні світильники та осьові вентилятори загальною встановленою потужністю $P_{вст}$ = 3,0 кВт.

Вентиляція працює автоматично, сумарний еквівалентний час роботи на номінальній потужності протягом доби приймаємо t = 12,0 год, $k_в$ = 0,85., тож використовуємо формулу 3.5:

$$E_{ел.осв.вент} = 3,0 \times 0,85 \times 12,0 = 30,6 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.5)$$

5) Насосна станція водопостачання та допоміжні споживачі: Подача води для напування тварин та технологічних потреб здійснюється свердловинним насосом потужністю Рвст = 2,2 кВт.

Еквівалентний час роботи на добу t = 4,5 год, $k_в$ = 0,8 отже доцільно обчислити за формулою 3.6:

$$E_{ел.насос} = 2,2 \times 0,8 \times 4,5 = 7,92 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.6)$$

Обчислимо сумарне добове споживання електричної енергії фермою без урахування додаткових будівель господарства(будівля для обмивки устаткування, ветеринарний пункт на 5 ВРХ) за формулою 3.7:

$$E_{ел.ферма.заг} = E_{ел.ферма.заг} = E_{ел.доїння} + E_{ел.охолодження} + E_{ел.гній} + E_{ел.осв.вент} + E_{ел.насос} = 34,0 + 24,3 + 24,75 + 30,6 + 7,92 = 121,57 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.7)$$

3.1.2. Розрахунок теплових навантажень господарства

Теплові потреби ферми ($Q_{ферма.заг}$) складаються з витрат на гаряче водопостачання для санітарних потреб та опалення приміщень у зимовий період. У обрахунку використано наступні формули: 3.8; 3.9; 3.10; 3.11

1) Потреби в теплі на гаряче водопостачання (ГВС): Для якісного миття молочного обладнання та ємностей необхідна вода з температурою $T_{гв}$ = 70 °С. Нормативна добова витрата гарячої води на фермі зі 100 головами ВРХ становить $V_{гв}$ = 1200 л/добу = 1,2 м3/добу (або маса $m_в$ = 1200 кг). Температура вихідної холодної води з артезіанської свердловини Тхв = 8 °С. Питома теплоємність води $c_в$ = 4,187 кДж/(кг·ºС).

$$Q_{ГВС} = m_в \times c_в \times (T_{гв} - T_{хв}) \; Q_{ГВС} = 1200 \times 4,187 \times (70 - 8) = 1200 \times 4,187 \times 62 = 311512,8 \text{ кДж/добу} \quad (3.8)$$

2) Переведемо в кВт·год (ділимо на 3600):

$$Q_{ГВС}.кВт = 311512,8 / 3600 \approx 86,53 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.9)$$

3) Потреби в теплі на опалення адміністративних та допоміжних приміщень: Розрахункові втрати тепла через огороджувальні конструкції побутових приміщень, кабінету ветеринара та молочного блоку для умов зими ($T_{зовн}$ = -20 °С) складають 4,5 кВт. Тоді добові витрати енергії на опалення становлять:

$$Q_{опал} = 4,5 \text{ кВт} \times 24 \text{ год} = 108,0 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.10)$$

4) Сумарна добова потреба господарства в тепловій енергії у зимовий період:

$$Q_{ферма.заг} = Q_{ГВС}.кВт + Q_{опал} = 86,53 + 108,0 = 194,53 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.11)$$

3.2. Розрахунок енергетичного потенціалу біогазу та підбір когенераційної установки

У розділі 2 було визначено, що добовий об'єм генерації біогазу в метантенку становить $V_{доб} = 200,64$ м3/добу з повною хімічною енергією $E_{хім} = 1203,84$ кВт·год/добу. Цей енергетичний потік виступає в ролі палива для когенераційного модуля.

3.2.1. Обґрунтування вибору та технічні характеристики когенераційної установки

Для ефективного перетворення низькокалорійного біогазу в електричну та теплову енергію з високим ККД та з урахуванням заборони на використання обладнання російського, китайського чи іранського походження, до впровадження обрано існуючу когенераційну установку мікро-класу європейського виробництва — TEDOM Micro 21 (виробник — TEDOM a.s., Чеська Республіка).



Рис. 3.2 TEDOM Micro 21 у розрізі

Дана установка побудована на базі надійного чотирициліндрового промислового газового двигуна внутрішнього згоряння, оптимізованого для довготривалої безперервної роботи на біологічному газі з об'ємним вмістом метану від 50%.

Номінальні технічні характеристики КГУ TEDOM Micro 21 (при роботі на біогазі):

- Номінальна електрична потужність: $P_{ел.ном}$ = 21 кВт.
- Номінальна теплова потужність: $P_{тепл.ном}$ = 43 кВт.
- Електричний коефіцієнт корисної дії: $ККД_{ел}$ = 32,3%.
- Тепловий коефіцієнт корисної дії: $ККД_{тепл}$ = 66,2%.
- Загальний коефіцієнт використання палива: $ККД_{заг}$ = 98,5%.
- Номінальна витрата газу (метан 60%) при 100% навантаженні: $В_{ном}$ ≈ 8,5 м3/год.

3.2.2. Розрахунок фактичної генерації енергії когенераційною установкою

Оскільки добовий об'єм газу становить 200,64 м^3, когенераційна установка працюватиме не на повну номінальну потужність цілодобово, а в модульованому (дросельованому) режимі, або з накопиченням газу в газгольдері та роботою на номіналі протягом визначеного часу.

Розрахуємо фактичну кількість електричної та теплової енергії, яку згенерує установка за добу з наявного об'єму палива:

1. Фактична генерація електричної енергії ($Е_{ел.ген}$):

$$Е_{ел.ген} = Е_{хім} \times (ККД_{ел} / 100) = 1203,84 \times 0,323 = 388,84 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.12)$$

2. Фактична генерація теплової енергії ($Е_{тепл.ген}$):

$$Е_{тепл.ген} = Е_{хім} \times (ККД_{тепл} / 100) = 1203,84 \times 0,662 = 796,94 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.13)$$

3.2.3. Синхронізація КГУ з локальною електромережею та якість енергії

Інтеграція когенераційної установки TEDOM Micro 21 до внутрішньої електричної мережі фермерського господарства вимагає ретельного дотримання технічних регламентів. Генератор установки має виробляти електроенергію, параметри якої жорстко відповідають вимогам ДСТУ EN 50160:2014 щодо якості електричної енергії.

Для забезпечення роботи генератора паралельно із зовнішньою мережею (режим Grid-tied) використовується інверторний або контакторний блок синхронізації. Процес автоматичної синхронізації включає підгонку трьох ключових параметрів:

1) Напруга: Амплітуда напруги на клемах генератора має дорівнювати амплітуді мережі (380/400 В).

2) Частота: Частота обертання валу газопоршневого двигуна регулюється електронним актуатором дросельної заслінки так, щоб частота струму генератора точно відповідала частоті мережі (50 Гц).

3) Фазовий кут: Кут зсуву фаз між напругою генератора та мережі повинен наближатися до нуля в момент замикання головного контактора.

4) Система автоматичного резервного введення відіграє критичну роль. У разі раптового зникнення напруги в зовнішній мережі (блекауту), контролер КГУ зобов'язаний за мілісекунди відключити ферму від загальної мережі (щоб уникнути подачі струму на пошкоджену лінію і не травмувати ремонтні бригади РЕМ) та перевести генератор у так званий «Острівний режим» (Island mode). В острівному режимі установка продовжує живити критичні навантаження ферми (вакуумні насоси доїльних апаратів, вентиляцію та охолоджувачі молока), автоматично змінюючи потужність двигуна залежно від поточного споживання.

3.3. Енергетичний баланс та інтеграція системи

Для підтвердження автономності та енергетичної спроможності розробленого комплексу зведемо всі показники генерації та споживання у єдиний енергетичний баланс.

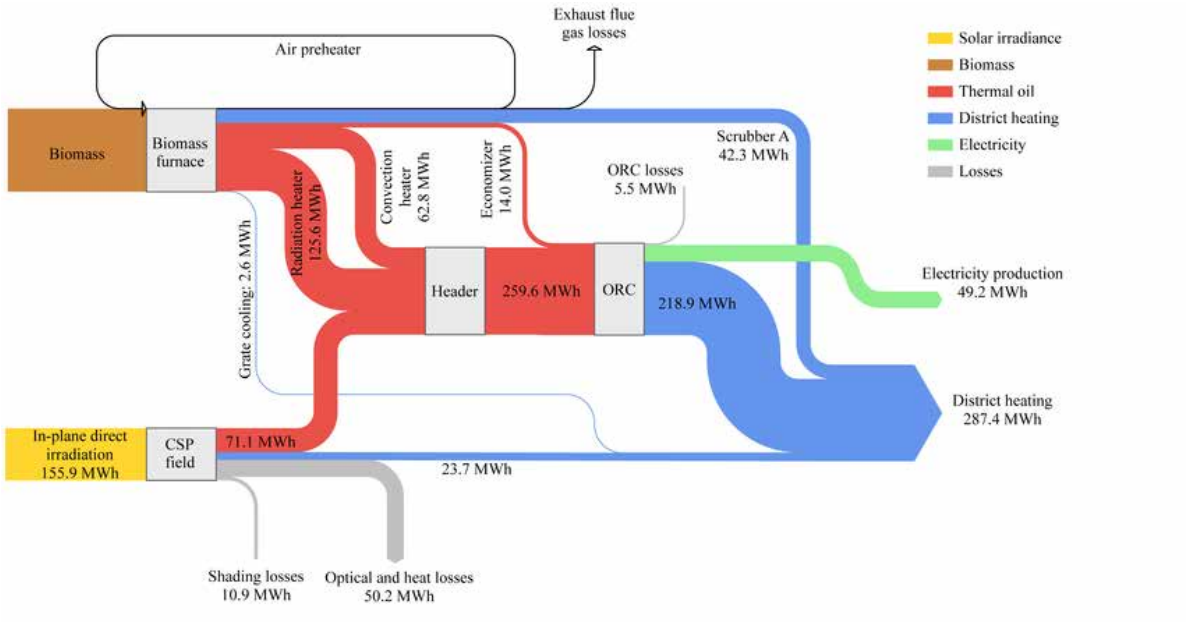


Рис. 3.3 Схематика втрат

3.3.1. Баланс електричної енергії

- Загальна генерація електроенергії когенераційним модулем: +388,84 кВт·год/добу.
- Власні потреби технологічного обладнання ферми 121,57 кВт·год/добу.
- Будівля для обмивки устаткування($E_{обм.}$):Електроенергія (мийки високого тиску, насоси, освітлення): ≈12 кВт·год/добу
- Ветеринарний пункт на 5 ВРХ($E_{вет.п.}$):Електроенергія (спецосвітлення, стерилізатори, підігрів інструментів, холодильники):≈12,5 кВт·год/добу.
- Власні потреби допоміжних вузлів біогазової установки (живлення мішалки метантенка потужністю 1,5 кВт, яка працює циклічно 15 хвилин кожної години, тобто 6 годин на добу, та насоса перекачування субстрату 2,2 кВт, 1 година):

$$E_{ел.БГУ} = (1{,}5\ кВт \times 6\ год) + (2{,}2\ кВт \times 1\ год) = 9{,}0 + 2{,}2 = 11{,}2\ кВт·год/добу \quad (3.14)$$

- Сумарне споживання електроенергії додатковими будівлями($E_{вет.п}$; $E_{обм.}$):

$$E_{дод.буд.} = E_{вет.п} + E_{обм} = 24,5 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.15)$$

- Визначимо чистий сальдо-баланс електричної енергії без урахування додаткових будівель господарства(будівля для обмивки устаткування, ветеринарний пункт на 5 ВРХ) (Дельта $E_{ел}$):

$$\Delta E_{ел} = E_{ел.ген} - E_{ел.ферма.заг} - E_{ел.БГУ} \text{ Дельта } E_{ел} = 388,84 - 121,57 - 11,2 = +256,07 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.16)$$

- Обчислення з урахуванням усіх будівель господарства:

$$\Delta E_{ел} - E_{дод.буд.} = 256,07 - 24,5 = 231,57 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.17)$$

Висновок що стосується електробалансу: Проектована система не лише повністю (на 100%) покриває власні потреби тваринницької ферми та біогазового комплексу в електроенергії, але й створює стабільний добовий надлишок у розмірі 231,57 кВт·год/добу. Цей надлишок спрямовується у загальну зовнішню електричну мережу, що генерує прямий додатковий прибуток для підприємства.

3.3.2. Баланс теплової енергії (для зимового періоду)

- Загальна генерація теплової енергії від КГУ TEDOM Micro 21: +796,94 кВт·год/добу.

- Технологічні потреби біореактора-метантенка на підігрів субстрату та компенсацію тепловтрат через стінки взимку (розрахунок 2.3): -297,45 кВт·год/добу.
- Опалення та ГВС тваринницької ферми (розрахунок 3.1.2): -194,53 кВт·год/добу.
- Будівля для обмивки устаткування:

Опалення (підтримка +15°C на площі ≈ 30 м²): ≈ 72 кВт·год/добу.
Гаряча вода (500 л/добу при 60°C): Q = 500 × 4.187 × 50 = 104675 кДж ≈ 29,1 кВт·год/добу.

- Ветеринарний пункт (на 5 ВРХ):
- *Опалення* (підтримка комфортних +18°C на площі ≈ 50 м²): ≈ 120 кВт·год/добу.
- *Гаряча вода* (100 л/добу на санітарні потреби): Q = 100 × 4.187 × = 20935 кДж ≈ 5,8 кВт·год/добу
- Сумарна потреба теплової енергії додаткових будівель(ветеринарний пункт, будівля для обмивки устаткування):

$$Q_{дод.буд.} = 120 + 5,8 + 72 + 29,1 = 226,9 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.18)$$

Визначимо чистий сальдо-баланс теплової енергії корівника ($\Delta Q^{ферми}$):

$$\Delta Q^{ферми} = 796,94 - 297,45 - 194,53 = +304,96 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.19)$$

Визначимо чистий сальдо-баланс теплової енергії господарства, де усі будівлі включені в обрахунок($\Delta Q_{ГОСП}$):

$$\Delta Q_{ГОСП} = \text{Дельта } Q^{ферми} - Q_{дод.буд.} = 304,96 - 226,9 = +78,06 \text{ кВт·год/добу} \quad (3.20)$$

3.3.3. Технологічна схема підігріву питної води для ВРХ із використанням обладнання HERZ

Завдяки раціональному використанню вторинного тепла когенераційної установки TEDOM Micro 21, після повного забезпечення потреб метантенка та систем опалення господарства взимку залишається стабільний тепловий надлишок у кількості 78,06 кВт·год/добу. Цей енергетичний потенціал пропонується спрямувати на підігрів питної води для дійного стада у зимовий період, що дозволяє уникнути температурного стресу у тварин та підвищити надої молока.

Споживання питної води 100 коровами становить m = 6000 кг/добу. Розрахуємо величину підвищення температури води (ΔT) за рахунок залишку хімічної теплоти (Qнадл = 78,06 × 3600 = 281 016 кДж/добу) при питомій теплоємності води св = 4,187 кДж/(кг·°C):

$$\Delta T = Q_{надл} / (m \times c_в) = 281\,016 / (6000 \times 4{,}187) = 11{,}2\ °C \quad (3.21)$$

Таким чином, температура води підвищується з початкових +8 °C (зі свердловини) до фізіологічно оптимальних +19,2 °C.

Технічна реалізація даного вузла базується на використанні високонадійної енергоефективної арматури компанії HERZ Armaturen (Австрія):

1. Гідравлічна розв'язка: Тепло від контуру КГУ передається через швидкісний пластинчастий теплообмінник. На лініях підведення теплоносія встановлюються фланцеві запірні кульові крани HERZ MODUL та сітчасті фільтри HERZ для захисту від механічних домішок.

2. Акумуляція та змішування: Холодна вода нагрівається всередині буферної ємності об'ємом 1500 л. Для запобігання перегріву води (вище +22 °C) та виключення ризику розвитку бактерій, на виході в магістраль монтується триходовий термостатичний змішувальний клапан HERZ Teplomix (або

серія HERZ TMV). Він в автоматичному режимі підмішує холодну воду зі свердловини, підтримуючи стабільні +19 °C.

3. Гідравлічне балансування кільця: Роздача води в корівнику виконується за кільцевою схемою із безперервною циркуляцією. Для точного налаштування витрат води та виключення гідравлічного розбалансування системи на відгалуженнях до групових напувалок встановлюються ручні балансувальні клапани HERZ Stromax 4117 D із вбудованими вимірювальними клапанами для контролю перепаду тиску.

Технологічний ефект: Ліквідація споживання холодної води взимку забезпечує приріст продуктивності стада на 5%. При базовому надої 7500 кг/рік на корову, додатковий валовий збір молока зі 100 голів становить: 100 × 7500 × 0,05 = 37 500 кг молока на рік.

3.4. Автоматизована система управління технологічним процесом (АСУ ТП) біогазової установки

Сучасний біогазовий комплекс є високотехнологічним об'єктом, де ефективність роботи залежить від точності дотримання параметрів термодинамічного циклу. Вручну керувати таким комплексом неможливо, тому АСУ ТП є "інтелектуальним ядром" всієї установки.

3.4.1. Структура багаторівневої системи керування

АСУ ТП комплексу побудована за трирівневою ієрархічною архітектурою:

1) Нижній рівень (Польовий): Складається з первинних датчиків (термопари Pt100 для вимірювання температури в метантенку, датчики тиску газу, витратоміри біогазу, датчики рівня та датчики концентрації CH_4, CO_2 та H_2S). Також на цьому рівні розташовані виконавчі механізми: частотні

перетворювачі двигунів мішалок, електромагнітні клапани подачі субстрату та насоси системи опалення.

2) Середній рівень (Контролерний): Представлений промисловим логічним контролером. Саме тут відбувається обробка сигналів від датчиків та прийняття рішень за алгоритмами ПІД-регулювання (пропорційно-інтегрально-диференціальне регулювання). Наприклад, якщо температура в реакторі падає нижче 38°C, контролер автоматично відкриває триходовий клапан подачі гарячого теплоносія від КГУ.

3) Верхній рівень (HMI/SCADA**):** Графічний інтерфейс оператора. За допомогою сенсорної панелі або комп'ютера оператор може відстежувати графіки зміни температури, обсяги генерації газу в реальному часі та отримувати аварійні сповіщення (SMS або E-mail) у разі виходу параметрів за межі допуску.

3.4.2. Алгоритми аварійної безпеки (Safety Instrumented Systems)

Критично важливим елементом автоматизації є підсистема протиаварійного захисту. У випадку виявлення витоку метану (концентрація понад 10% від нижньої межі вибуховості) датчиками загазованості, система автоматично:

- Перекриває головні запірні клапани на лінії подачі біогазу до когенератора.
- Активує систему аварійної вентиляції приміщення КГУ.
- Відключає електроживлення всіх споживачів, що не мають вибухозахищеного виконання.
- Надсилає сигнал тривоги на центральний пульт охорони ферми.

РОЗДІЛ 4
ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ТА ОКУПНІСТЬ ОБ’ЄКТУ

Впровадження біогазової установки та когенераційного модуля на базі існуючої молочно-товарної ферми на 100 голів ВРХ є капіталомістким інженерним проектом. Оцінка його доцільності базується на зіставленні початкових інвестиційних витрат (капітальних вкладень) із прогнозованим операційним прибутком, який формується за рахунок заміщення власних енергетичних потреб господарства (електрики та тепла), продажу надлишків електроенергії та використання органічного дигестату замість покупних мінеральних добрив.

4.1. Розрахунок капітальних вкладень (CAPEX)

У зв'язку з додаванням підсистеми підігріву питної води для ВРХ та застосуванням арматури преміум-класу HERZ, загальний обсяг CAPEX було перераховано. Кошторисна вартість капітальних витрат наведена у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

Структура капітальних витрат (CAPEX) проєкту

№ з/п	**Найменування елементу витрат / обладнання**	**Вартість, EUR**
1	Когенераційна установка TEDOM Micro 21 (Чехія) в захисному кожусі з вбудованою системою утилізації тепла	32 000
2	Комплект обладнання для залізобетонного метантенка (внутрішній змійовик AISI 316L, мішалка, гідроізоляція, утеплення пінополістиролом 100 мм)	18 500

Продовження таблиці 4.1.

№ з/п	Найменування елементу витрат / обладнання	Вартість, EUR
3	Будівельні роботи (земляні роботи, заливка фундаменту, зведення залізобетонного резервуара метантенка, монтаж проміжного приймача субстрату)	14 000
4	Газгольдер (буферна ємність для біогазу низького тиску, 50 м3) та система біологічного очищення газу від сірководню	8 500
5	Трубопроводи, запірно-регулююча арматура контурів теплоносія та субстрату, кабельно-провідникова продукція та щити автоматики (АСУ ТП)	6 000
6	Вартість пусконалагоджувальних процесів (ПНР), режимне налагодження ДВЗ та первинне завантаження активного мулу	5 000
7	CAPEX теплопостачання допоміжних будівель (МАБ, ветпункт, мийка)	2 075
8	Комплект обладнання HERZ для підсистеми підігріву питної води ВРХ (клапани Teplomix, Stromax, крани MODUL, ємність 1500 л, монтаж)	3 500
	РАЗОМ КАПІТАЛЬНИХ ВКЛАДЕНЬ (CAPEX)	89 575

Для забезпечення передачі теплової енергії від когенераційної установки до молочно-адміністративного блоку необхідно передбачити прокладання локальної теплотраси та облаштування внутрішньої системи опалення.

Капітальні витрати на цю підсистему складаються з вартості обладнання, матеріалів та будівельно-монтажних робіт. Розрахунок виконано за укрупненими показниками для поточних ринкових цін:

1. Тепловий пункт та вузол підключення Оскільки контур охолодження когенератора та контур опалення будівлі потребують гідравлічного розділення, передбачається встановлення пластинчастого теплообмінника та циркуляційної насосної групи.

- Пластинчастий теплообмінник (потужність до 10 кВт) — 8 500 грн
- Циркуляційний насос із частотним регулюванням — 4 500 грн
- Запірно-регулююча арматура (фільтри, крани, манометри) — 5 000 грн
- Разом по розділу 1: 18 000 грн

2. Зовнішня теплова мережа (Теплотраса) Для передачі теплоносія від технічного приміщення БГУ до МАБ використовується попередньо ізольована труба. Орієнтовна довжина траси становить 30 метрів.

- Попередньо ізольована труба (подаюча та зворотна лінії, 30 м х 900 грн/м) — 27 000 грн
- Земляні роботи (траншея, піщана подушка, зворотна засипка) — 8 000 грн
- Разом по розділу 2: 35 000 грн

3. Внутрішня система опалення МАБ Для компенсації тепловтрат у 4,5 кВт передбачено встановлення 5 сталевих панельних радіаторів (середня потужність 900-1000 Вт кожен).

- Сталеві панельні радіатори з термостатичними головками (5 шт. х 4 200 грн) — 21 000 грн
- Поліпропіленові труби та фітинги для внутрішньої розводки — 9 000 грн

- Разом по розділу 3: 30 000 грн

4. Будівельно-монтажні та пусконалагоджувальні роботи Вартість монтажних робіт та гідравлічних випробувань приймається на рівні 25% від загальної вартості обладнання та матеріалів.

- Базова вартість матеріалів та обладнання: 18 000 + 35 000 + 30 000 = 83 000 грн
- Монтажні роботи: 83 000 × 0,25 = 20 750 грн
- Загальні витрати на усі будівлі молочно-адміністративного блоку ($CAPEX_{теплопостачання}$):
- $CAPEX_{теплопостачання}$ = 83 000 грн + 20 750 грн = 103 750 грн.≈ 2075 EUR

4.2 Розрахунок операційних витрат (OPEX)

Річні операційні витрати на утримання енергетичного комплексу складаються з витрат на сервісне обслуговування КГУ та амортизаційних відрахувань (3% від загального CAPEX): Амортизація = 89 575 × 0,03 = 2 687 EUR/рік. Планове ТО двигуна TEDOM (регламентна заміна мастила, фільтрів, свічок) = 1 500 EUR/рік. Загальні річні операційні витрати: OPEX = 1 500 + 2 687 = 4 187 EUR/рік.

4.3 Розрахунок річного економічного ефекту (доходів та заощаджень)

Економічний ефект формується за рахунок 5 ключових факторів споживання та генерації:

1. *Заощадження на власному споживанні електроенергії:* Сумарне споживання ферми та будівель становить 146,07 кВт·год/добу. За рік: 146,07 ×

365 = 53 315,5 кВт·год. При комерційному тарифі 0,188 EUR/кВт·год, заощадження становлять: 53 315,5 × 0,188 = 10 023 EUR/рік.

2. *Дохід від реалізації надлишку електроенергії:* Чистий надлишок у мережу становить 231,57 кВт·год/добу. За рік: 231,57 × 365 = 84 523 кВт·год. Продаж за механізмом Net Billing (тарифікація 0,125 EUR/кВт·год): 84 523 × 0,125 = 10 565 EUR/рік.

3. *Заощадження на опаленні та ГВС:* Повне заміщення теплової потреби будівель (421,43 кВт·год/добу) покупним паливом еквівалентно заощадженню 4 700 EUR/рік.

4. *Заощадження на добривах:* Використання мінералізованого дигестату замість купівлі селітри та суперфосфатів дає чисте заощадження 4 500 EUR/рік.

5. *Додатковий дохід від реалізації молока (ефект підігріву води HERZ):* Отримані додатково 37 500 кг молока на рік при закупівельній ціні сировини 0,40 EUR/кг формують прямий дохід: 37 500 × 0,40 = 15 000 EUR/рік.

Сумарний річний дохід та заощадження проєкту (Дохід.заг): Дохід.заг = 10 023 + 10 565 + 4 700 + 4 500 + 15 000 = 44 788 EUR/рік.

4.4 Розрахунок терміну окупності проекту (Simple Payback Period)

Чистий річний прибуток підприємства після вирахування операційних витрат становить: Прибуток.чистий = Дохід.заг - OPEX = 44 788 - 4 187 = 40 601 EUR/рік.

Простий термін окупності інвестицій (PBP) обчислюється як відношення повних капітальних вкладень (CAPEX) до чистого річного прибутку: PBP = CAPEX / Прибуток.чистий = 89 575 / 40 601 = 2,21 роки.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано інженерний, теплотехнічний та економічний розрахунок впровадження біогазової когенераційної установки для молочно товарної ферми на 100 голів ВРХ.

Встановлено, що добовий вихід гною в обсязі 5,5 т забезпечує виробництво близько 200 м³ біогазу на добу за умови підтримання мезофільного режиму бродіння при температурі 38 °С та використання метантенка об'ємом 140 м³.

Проведено розрахунок теплових втрат реактора. Визначено, що в зимовий період при температурі зовнішнього повітря мінус 20 °С витрати теплової енергії на підігрів сировини та компенсацію втрат через огороджувальні конструкції становлять 297,45 кВт·год на добу.

Обґрунтовано вибір когенераційної установки TEDOM Micro 21 електричною потужністю 21 кВт. Розрахунок енергетичного балансу показав, що установка повністю забезпечує власні потреби господарства в електроенергії на рівні 121,57 кВт·год на добу та формує надлишок 256,07 кВт·год на добу для передачі в мережу.

Тепловий розрахунок підтвердив можливість повного покриття потреб комплексу в тепловій енергії за рахунок утилізації тепла когенераційної установки. Отримане тепло може використовуватися для підтримання необхідного режиму роботи метантенка, опалення виробничих приміщень, підігріву води для ВРХ та гарячого водопостачання ветеринарного пункту.

Використання теплообмінного та розподільчого обладнання HERZ дозволяє підвищити надійність і енергоефективність системи завдяки оптимізації теплових і гідравлічних режимів роботи. Економічний аналіз підтвердив доцільність реалізації проєкту. Загальні капітальні витрати становлять 89 575 євро. За рахунок заміщення традиційних енергоносіїв та ефективного використання виробленої енергії розрахунковий термін окупності проєкту становить 2,2 року, що свідчить про високу інвестиційну привабливість запропонованого рішення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ВНТП-АПК-01.05. Скотарські підприємства (включаючи ферми для виробництва молока, яловичини та вирощування молодняку). Норми технологічного проектування. Київ : Мінагрополітики України, 2005. 86 с. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0044259-05

2. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А., Драгнєв С. В. Перспективи виробництва та використання біометану в Україні : аналітична записка. Київ : Біоенергетична асоціація України (UABIO), 2024. 45 с. URL: https://uabio.org/materials/

3. Голубець В. О. Теплотехніка та теплоенергетика : підручник. Львів : Новий Світ-2000, 2019. 312 с. URL:https://scholar.google.com/scholar?q=Голубець+В.+О.+Теплотехніка+та+теплоенергетика

4. Горобець В. Г., Троханяк В. І. Теплообмін та гідродинаміка в теплообмінниках біогазових установок. Промислова теплотехніка. 2021. Т. 43, № 2. С. 34–41. URL: https://pt.ittf.kiev.ua/

5. ДСТУ EN 16325:2022. Гарантії походження енергії, пов’язані з відновлюваними джерелами. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 24 с. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98888

6. Маляренко В. А. Енергетичні установки. Когенерація. Солідифікація. Екологія : навчальний посібник. Харків : САГА, 2018. 280 с. URL:https://scholar.google.com/scholar?q=Маляренко+В.+А.+Енергетичні+установки.+Когенерація

7. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів, сільськогосподарської техніки та об'єктів тваринництва. Київ : Міндовкілля України, 2020. 52 с. URL: https://mepr.gov.ua/

8. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2017. № 27-28. Ст. 312.
URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19

9. Розрахунок систем мікроклімату тваринницьких приміщень : методичні вказівки / уклад. О. В. Сидорчук та ін. Київ : НУБіП, 2021. 68 с.
URL: https://dspace.nubip.edu.ua/

10. Gorobets V., Bohdan Y., Trokhaniak V., Antypov I. Investigations of heat transfer and hydrodynamics in heat exchangers with compact arrangements of tubes. Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 151. P. 46–54.
URL: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.104

11. TEDOM Micro 21 Biogas CHP Unit. Technical Specification Sheet. Výčapy : TEDOM a.s., 2024. 4 p.
URL: https://www.tedom.com/chp-units/micro/

12. VDI 4630:2016. Fermentation of organic materials. Characterisation of the substrate, sampling, collection of substrate data, fermentation tests. Düsseldorf : VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, 2016. 92 p.
URL: https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4630

13. ДБН В.2.2-1:2021. Будівлі і споруди. Будівлі і споруди для тваринництва. Київ: Мінрегіон України, 2021. 42 с.
URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3233856272993096055

14. Норми технологічного проектування ветеринарних об'єктів для тваринницьких підприємств (ВНТП-СГіП-46в). Київ: Мінагрополітики України, 2016. 38 с.
URL: https://minagro.gov.ua/

15. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. Відомості Верховної Ради України. 2003. № 24. С. 155.
URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15

16. ДБН В.2.5-39:2008. Теплові мережі. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 84 с.

URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=24729

17. ДСТУ EN 12831-1:2017. Енергоефективність будівель. Метод розрахунку проєктного теплового навантаження. Частина 1. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 102 с.

URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=75630

18. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 35 с.

URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58330

19. НПАОП 0.00-1.76-15. Правила безпеки систем газопостачання. Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2015. 120 с.

URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0674-15

20. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1998. 386 с.

URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98

21. TEDOM a.s. Технічна документація та настанова з експлуатації когенераційних установок серії Micro (Micro 21). Hořovice, Czech Republic, 2024. 88 с.

URL: https://www.tedom.com/download/

22. Басок Б. І., Недбайло О. М., Ткаченко В. А. Теплоенергетика та теплопостачання: сучасний стан і перспективи розвитку в Україні. Теплофізика та теплоенергетика. 2021. Т. 43, № 2. С. 12–21.

URL: https://doi.org/10.31472/ttpe

23. Гелетуха Г. Г., Залізна Т. А., Желєзна Т. А. Перспективи виробництва та використання біометану в Україні. Київ : Біоенергетична асоціація України, 2022. 45 с.

URL: https://uabio.org/materials/

24. Голуб Г. А., Скібчик В. І. Агропромислові біогазові установки : проєктування та експлуатація. Київ : Аграрна наука, 2019. 256 с.

URL:https://scholar.google.com/scholar?q=Голуб+Г.+А.,+Скібчик+В.+І.+Агропромислові+біогазові+установки

25. Долінський А. А., Басок Б. І. Енергозбереження та екологія в теплоенергетиці. Київ : Наукова думка, 2018. 320 с.
URL:https://scholar.google.com/scholar?q=Долінський+А.+А.,+Басок+Б.+І.+Енергозбереження+та+екологія

26. Економіка енергетичного підприємства : підручник / за ред. О. В. Новосельцева. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 415 с.
URL: https://ela.kpi.ua/

27. Желібо Є. П., Заверуха Н. М., Зацарний В. В. Безпека життєдіяльності : навчальний посібник. 6-те вид. Київ : Каравела, 2020. 344 с.
URL:https://scholar.google.com/scholar?q=Желібо+Є.+П.+Безпека+життєдіяльності+Каравела

28. Калетнік Г. М. Розвиток ринку біопалив в Україні : монографія. Київ : Аграрна наука, 2018. 386 с.
URL:https://scholar.google.com/scholar?q=Калетнік+Г.+М.+Розвиток+ринку+біопалив+в+Україні

29. Кучерявий В. П. Екологія : підручник. Львів : Світ, 2019. 500 с.
URL: https://scholar.google.com/scholar?q=Кучерявий+В.+П.+Екологія

30. Маляренко В. А. Енергетичні установки. Загальний курс : навчальний посібник. Харків : ХНАМГ, 2017. 320 с.
URL:https://scholar.google.com/scholar?q=Маляренко+В.+А.+Енергетичні+установки.+Загальний+курс

31. Радченко А. М., Труш О. В. Когенераційні системи в комунальній теплоенергетиці : монографія. Миколаїв : НУК, 2021. 198 с.
URL:https://scholar.google.com/scholar?q=Радченко+А.+М.,+Труш+О.+В.+Когенераційні+системи

32. Ройзман В. П. Тепломасообмін у технологічних процесах : підручник. Хмельницький : ХНУ, 2018. 315 с.

URL: https://scholar.google.com/scholar?q=Ройзман+В.+П.+Тепломасообмін

33. Системи виробництва та споживання енергії : навчальний посібник / за ред. В. Г. Демченка. Дніпро : НТУ «ДП», 2022. 278 с.
URL:https://scholar.google.com/scholar?q=Системи+виробництва+та+споживання+енергії+Демченко

34. Ткачук В. І., Мазур М. П. Теплотехнічні розрахунки біогазових реакторів: методичні вказівки. Вінниця : ВНТУ, 2020. 85 с.
URL: https://ir.vntu.edu.ua/

35. Al Seadi T., Rutz D., Prassl H. Biogas Handbook. Esbjerg : University of Southern Denmark, 2008. 126 p.
URL: https://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf

36. Deublein D., Steinhauser A. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. 2nd Edition. Wiley-VCH, 2011. 578 p.
URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527632794

37. European Biogas Association (EBA). Statistical Report 2023. Brussels, Belgium, 2023. 64 p.
URL: https://www.europeanbiogas.eu/statistical-report-2023/

38. Wellinger A., Murphy J., Baxter D. The Biogas Handbook: Science, Production and Applications. Woodhead Publishing, 2013. 512 p.
URL: https://www.sciencedirect.com/book/9780857094988/the-biogas-handbook