

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

проф., д.т.н. Віктор КАПЛУН
(підпис)

доц., к.т.н. Євген АНТИПОВ
(підпис)

« ____ » _____ 2025 р.

« ____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ СВИНАРНИКА-ВІДГОДІВЕЛЬНИКА ВП
НУБІП УКРАЇНИ «АГРОНОМІЧНА ДОСЛАДНА СТАНЦІЯ» НА БАЗІ
КОГЕНЕРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ»**

Спеціальність 144 – «Теплоенергетика»

Освітня програма Інженерія відновлювальних джерел енергії та енергоменеджмент

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Валерій ГОРОБЕЦЬ
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Віктор ТРОХАНЯК
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Владислав БІЛЮЗОР
(ПІБ)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
к.т.н., доцент **Є.О. АНТИПОВ**
(підпис)
« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ
Білозору Владиславу Ігоровичу

Спеціальність 144 – «Теплоенергетика»

Освітня програма Інженерія відновлювальних джерел енергії та енергоменеджмент

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Енергопостачання свинарника-відгодівельника ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» на базі когенераційних технологій»

затверджена наказом ректора НУБіП України від 18.11.2024 № 2060”С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14.11.2025

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: Технічна документація, нормативно – правова література.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Проаналізувати системи енергопостачання тваринницьких комплексів.
2. Розрахувати систему опалення та визначити потребу в тепловій енергії.
3. Виконати розрахунок вентиляції та визначити параметри повітрообміну.
4. Розрахувати та підібрати регенеративний теплообмінник для утилізації теплоти.
5. Обрати оптимальну когенераційну установку для теплового й електричного забезпечення об'єкта.

Дата видачі завдання «20» 11. 2024 р.

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

(підпис)

Троханяк В.І.

(ПІБ)

Білозор В.І.

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: пояснювальна записка – **60 сторінок, 3 таблиці, 10 рисунків, 21 джерело.**

У першому розділі виконано аналіз сучасних систем енергопостачання тваринницьких приміщень, розглянуто особливості енергоспоживання свинарників-відгодівельників та визначено основні напрями підвищення їх енергоефективності. Окрему увагу приділено огляду сучасних когенераційних технологій, принципам їх роботи та можливостям використання у тваринництві.

У другому розділі подано детальний опис системи вентиляції свинарника. Розглянуто типи вентиляційних систем, визначено теплотехнічні характеристики будівлі, виконано розрахунки для холодного і теплого періодів року, а також визначено енергетичні витрати на вентиляцію.

У третьому розділі розроблено систему опалення свинарника-відгодівельника, проведено розрахунок теплових втрат через огорожувальні конструкції, визначено необхідну теплову потужність і обґрунтовано вибір системи опалення для холодного періоду року.

У четвертому розділі виконано розрахунок регенеративного теплообмінника, призначеного для утилізації теплоти відпрацьованого повітря. Подано загальні відомості про теплообмінні апарати, виконано тепловий і гідравлічний розрахунки, а також оцінено підвищення енергоефективності системи за рахунок рекуперації тепла.

У п'ятому розділі узагальнено результати розрахунків систем опалення та вентиляції, наведено критерії вибору когенераційної установки, проведено порівняльний аналіз можливих варіантів і виконано обґрунтований вибір оптимальної установки типу Micro 30. Визначено її енергетичні показники, потужність, ефективність роботи та доцільність застосування для забезпечення теплової та електричної енергії свинарника-відгодівельника.

У висновках узагальнено результати проведених розрахунків і досліджень, підтверджено доцільність використання когенераційних технологій для енергопостачання тваринницьких приміщень та окреслено економічні переваги їх впровадження.

Ключові слова: енергопостачання, свинарник-відгодівельник, когенерація, система опалення, вентиляція, теплообмінник, енергоефективність, Micro 30.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ.....	5
1.1. Особливості енергоспоживання свинарників-відгодівельників ...	5
1.2. Види систем енергопостачання в тваринництві	7
1.3. Огляд когенераційних технологій та принципи їх роботи	10
РОЗДІЛ 2 СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦІЇ СВИНАРНИКА	13
2.1. Види систем вентиляції	13
2.2. Теплотехнічні характеристики свинарника-відгодівельника.....	16
2.3. Розрахунок в холодний період року	17
2.4. Розрахунок в теплий період року	19
2.5. Енергетичні витрати на вентиляцію	23
РОЗДІЛ 3 СИСТЕМА ОПАЛЕННЯ СВИНАРНИКА	25
3.1. Система опалення	25
3.2. Розрахунок системи опалення в холодний період року.....	26
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМІННИКА	34
4.1. Загальні відомості про теплообмінні апарати.....	34
4.2. Розрахунок теплообмінника	38
4.2.1. Тепловий розрахунок.....	39
4.3. Гідравлічний розрахунок	47
РОЗДІЛ 5 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ	51
5.1. Узагальнення результатів розрахунків систем опалення та вентиляції	51

5.2. Критерії вибору когенераційної установки.....	51
5.3. Аналіз можливих варіантів когенераційних установок.....	53
5.4. Вибір оптимальної когенераційної установки.....	55
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- C_1 – гранично допустимий вміст CO_2 у повітрі приміщення, л/м³;
- C_2 – концентрація CO_2 у зовнішньому повітрі, л/м³;
- c – кількість CO_2 , що виділяється однією твариною, л/год;
- n – кількість тварин;
- k – коефіцієнт, який враховує зміну об'єму газу, водяної пари та теплоти, що виділяється твариною залежно від температури приміщення;
- γ_B – густина повітря при температурі всередині приміщення;
- W – загальна кількість вологи, що виділяється;
- W_{TB} – кількість вологи, що виділяється безпосередньо тваринами;
- $W_{вип}$ – об'єм вологи, який утворюється внаслідок випаровування з вологих поверхонь приміщення;
- ω – об'єм водяної пари, що виділяється однією твариною;
- Φ_{TB} – тепловий потік, що виділяється тваринами;
- $\Phi_{ог}$ – тепловтрати через зовнішні огорожі;
- t_B – температура повітря всередині приміщення;
- t_3 – температура зовнішнього повітря;
- α – коефіцієнт температурного розширення повітря;
- $R_{о.з.с}$ – опір теплопередачі зовнішніх стін;
- $R_{о.в}$ – опір теплопередачі вікон;
- $R_{о.дв}$ – опір теплопередачі дверей;
- $F_{з.с}$ – площа зовнішніх стін;
- F_B – площа вікон;
- $F_{дв}$ – площа дверей.
- R_B – опір теплопередачі внутрішньої поверхні тваринницького приміщення;
- R_3 – опір теплопередачі зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції;

$\delta_{\text{ц.}}$ – товщина шару цементного розчину;
 $\lambda_{\text{ц.}}$ – коефіцієнт теплопровідності цементного розчину;
 $\delta_{\text{шт.}}$ – товщина шару штукатурки;
 $\lambda_{\text{шт.}}$ – коефіцієнт теплопровідності штукатурного шару.
 $\delta_{\text{дощ.}}$ – товщина шару дощок;
 $\lambda_{\text{дощ.}}$ – коефіцієнт теплопровідності деревини (дощок);
 $\delta_{\text{руб.}}$ – товщина шару рубероїду;
 $\lambda_{\text{руб.}}$ – коефіцієнт теплопровідності рубероїду;
 $\delta_{\text{мін.в}}$ – товщина шару мінеральної вати;
 $\lambda_{\text{мін.в}}$ – коефіцієнт теплопровідності мінеральної вати.

Скорочення:

ТЕЦ – теплоелектроцентрально.

КГУ – когенераційна установка.

ККВП – коефіцієнт корисного використання палива;

ВСТУП

Актуальність: сучасний стан енергетичного комплексу України характеризується підвищенням вартості традиційних енергоносіїв, високим рівнем енергозалежності від імпорту та зростанням потреби у впровадженні енергоефективних технологій. Особливо гостро ці проблеми проявляються в аграрному секторі, де значна частина енергоресурсів витрачається на технологічні потреби тваринницьких комплексів, зокрема на опалення, вентиляцію, освітлення, водопостачання та приготування кормів.

В умовах переходу України до політики сталого розвитку та інтеграції в європейський енергетичний простір актуальним завданням стає створення систем енергопостачання, здатних забезпечити автономну або комбіновану роботу на базі відновлюваних і вторинних енергоресурсів. Одним із найефективніших шляхів досягнення цієї мети є застосування когенераційних технологій, які дозволяють одночасно виробляти електричну та теплову енергію з високим коефіцієнтом корисного використання палива.

Використання когенераційних установок, що працюють на біогазі, утвореному під час переробки гною та органічних відходів тваринництва, забезпечує не лише енергетичну, але й екологічну ефективність. Це сприяє зниженню викидів метану в атмосферу, покращенню санітарного стану господарства та утворенню додаткового ресурсу — біодобрив. Тому розробка системи енергопостачання свинарника-відгодівельника ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» на базі когенераційних технологій є важливим науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення енергоефективності, екологічної безпеки та економічної стабільності аграрного виробництва.

Мета: метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення енергоефективності системи енергопостачання свинарника-відгодівельника шляхом впровадження когенераційної установки, що забезпечує комплексне забезпечення об'єкта тепловою та електричною енергією.

Об'єкт дослідження: система енергопостачання свинарника-відгодівельника ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція».

Предмет дослідження: методи підвищення енергоефективності систем енергопостачання тваринницьких комплексів на основі когенераційних технологій.

Завдання дослідження: для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі основні завдання:

1. Провести аналіз сучасних систем енергопостачання тваринницьких комплексів та визначити основні напрямки підвищення їх енергоефективності.
2. Виконати розрахунок системи опалення та визначити потребу в тепловій енергії для підтримання нормативного мікроклімату.
3. Провести розрахунок системи вентиляції та визначити необхідні параметри повітрообміну.
4. Розробити розрахунок і підібрати регенеративний теплообмінник для утилізації теплоти відпрацьованого повітря.
5. Виконати вибір оптимальної когенераційної установки для забезпечення потреб об'єкта в електричній та тепловій енергії.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ

Розвиток тваринництва в сучасних умовах вимагає забезпечення стабільного та надійного енергопостачання виробничих процесів, адже енергозабезпечення є одним із ключових факторів, що визначає ефективність функціонування тваринницьких комплексів. Системи енергопостачання впливають не лише на продуктивність тварин, а й на комфортні мікрокліматичні умови в приміщеннях, рівень автоматизації технологічних процесів, витрати на виробництво та екологічну безпеку господарства.

Сучасні тваринницькі підприємства використовують різноманітні джерела енергії — електричну, теплову, механічну, а також альтернативні види енергії, такі як біогаз, сонячна та вітрова енергія. Зростання вартості традиційних енергоресурсів та необхідність зниження викидів парникових газів стимулюють пошук нових, більш ефективних і екологічно безпечних способів енергозабезпечення. Особливого значення набувають когенераційні системи, що дозволяють одночасно виробляти теплову та електричну енергію з високим коефіцієнтом корисного використання палива.

Метою даного розділу є проведення аналізу сучасних систем енергопостачання тваринницьких приміщень, визначення їх основних типів, принципів роботи, переваг та недоліків, а також оцінка можливостей застосування інноваційних технологій, спрямованих на підвищення енергоефективності та зменшення експлуатаційних витрат. Аналіз існуючих рішень стане основою для розроблення раціональної системи енергопостачання свинарника-відгодівельника на базі когенераційних технологій.

1.1. Особливості енергоспоживання свинарників-відгодівельників

Енергоспоживання свинарників-відгодівельників є складним і багатокомпонентним процесом, який визначається технологічними потребами утримання тварин, мікрокліматичними умовами, рівнем механізації та автоматизації виробничих процесів. У таких приміщеннях енергія використовується для забезпечення обігріву, вентиляції, освітлення, водопостачання, приготування та роздачі кормів, а також для роботи допоміжного обладнання.

Основна частка енергоспоживання у свинарниках припадає на теплову енергію, що необхідна для підтримання оптимального мікроклімату. Свині, особливо молодняк та тварини на відгодівлі, чутливі до температурних коливань. Недостатнє або нерівномірне опалення може призвести до зниження приростів живої маси, підвищення споживання кормів та погіршення загального стану здоров'я тварин.

Опалювальні системи можуть базуватись на різних джерелах енергії: традиційних (газ, електроенергія, дизельне паливо) та альтернативних (біогаз, теплові насоси, сонячні колектори). У сучасних свинарниках все частіше застосовуються системи променевого обігріву, інфрачервоні лампи або підлогове опалення з використанням водяних контурів, що дозволяє рівномірно розподіляти тепло в зоні перебування тварин.

Електрична енергія забезпечує роботу всього технологічного обладнання свинарника: систем вентиляції, освітлення, автоматики, дозаторів кормів, насосів та систем подачі води. Значна частка електроенергії витрачається на роботу вентиляторів, які підтримують необхідний рівень вологості, температури та вмісту шкідливих газів у приміщенні.

Системи вентиляції споживають значну кількість енергії, особливо у великих тваринницьких комплексах. Основне завдання вентиляції — видалення надлишкової вологи, шкідливих газів (аміаку, вуглекислого газу, сірководню) та подача свіжого повітря. Залежно від кліматичних умов, конструкції приміщення та технологічного рівня, застосовують природну, механічну або комбіновану вентиляцію.

Для зниження енергоспоживання у вентиляційних системах дедалі частіше використовуються частотні перетворювачі для вентиляторів, рекуператори тепла та системи автоматичного керування мікрокліматом.

Рівень енергоспоживання свинарників значною мірою залежить від кліматичних умов регіону, теплоізоляційних характеристик будівельних конструкцій, орієнтації будівлі та якості систем управління мікрокліматом. У північних та центральних регіонах України витрати енергії на опалення можуть сягати 60–70 % від загальних енергетичних потреб господарства, тоді як у південних регіонах більшу частку займає енергія на вентиляцію та охолодження приміщень.

За результатами досліджень, питомі витрати енергії на утримання однієї голови свиней на відгодівлі коливаються в межах 250–500 кВт·год на рік, залежно від технології утримання, віку тварин, клімату та рівня енергоефективності обладнання. Оптимізація цих показників є ключовим завданням для підвищення економічної ефективності виробництва.

Таким чином, енергоспоживання свинарників-відгодівельників характеризується значною питомою інтенсивністю та високим рівнем залежності від мікрокліматичних і технологічних параметрів. Раціональне управління енерговитратами, впровадження автоматизованих систем контролю та використання відновлюваних джерел енергії дозволяють не лише знизити собівартість продукції, а й підвищити енергоефективність усього тваринницького комплексу.

1.2. Види систем енергопостачання в тваринництві

Енергопостачання тваринницьких приміщень є однією з ключових складових забезпечення продуктивності та здоров'я тварин. Від стабільності та надійності подачі теплової та електричної енергії залежить підтримання оптимального мікроклімату, що включає контроль температури, вологості, швидкості повітряних потоків та концентрації шкідливих газів. В умовах

сучасного тваринництва енергетичне забезпечення має не лише задовольняти базові потреби у теплі та електриці, а й забезпечувати економічну та екологічну ефективність виробництва.

Системи енергопостачання в тваринництві можна класифікувати за способом виробництва енергії та джерелом палива. Традиційні підходи включають використання котлів на твердому, рідкому або газоподібному паливі. Газові та дизельні котли виробляють теплову енергію для опалення приміщень та підігріву води, при цьому їх основними перевагами є простота конструкції, доступність палива та відносна надійність. Однак ці системи характеризуються обмеженим коефіцієнтом корисної дії та неможливістю одночасного виробництва електроенергії, що робить їх менш ефективними для великих або енергозалежних тваринницьких об'єктів.

Електричне опалення, що реалізується за допомогою електрокалориферів, теплових вентиляторів або інфрачервоних обігрівачів, дозволяє досягати високого ступеня контролю температури та швидкої реакції на зміни зовнішніх умов. Проте використання електричної енергії для нагріву є економічно затратним, особливо при великих об'ємах приміщень, і робить ферму залежною від стабільності зовнішньої електромережі.

Сучасні агропідприємства все частіше застосовують автономні джерела енергопостачання, серед яких генератори на природному газі або дизелі, що можуть забезпечувати як виробництво електроенергії, так і підігрів теплоносія через окремі теплообмінники. Використання автономних систем дозволяє зменшити залежність від зовнішніх енергомереж, підвищує надійність енергопостачання та забезпечує резервні можливості у випадку перебоїв з основним джерелом. Додатково в окремих господарствах інтегрують відновлювані джерела енергії, такі як сонячні колектори та теплові насоси, що дозволяє частково покривати потребу у теплі та гарячій воді, підвищуючи енергоефективність та знижуючи експлуатаційні витрати. Ефективність таких рішень значною мірою залежить від кліматичних умов, сезонності та специфіки

виробництва, що потребує комплексного підходу до проектування системи енергопостачання.

Найбільш перспективним і ефективним підходом є застосування когенераційних систем, які дозволяють одночасно виробляти електричну та теплову енергію з одного джерела палива, такого як природний газ або біогаз. Завдяки високому сумарному коефіцієнту корисної дії (до 85–90%) когенераційні установки забезпечують ефективне покриття потреби ферми в обох видах енергії, оптимізуючи витрати палива та зменшуючи експлуатаційні витрати у порівнянні з традиційними котельними системами. Крім того, когенераційні установки можна інтегрувати з буферними накопичувачами тепла та системами рекуперації відпрацьованого повітря, що додатково підвищує ефективність та економічність енергопостачання.

Важливим аспектом підвищення ефективності енергопостачання є використання вторинних джерел енергії, таких як відпрацьоване повітря або тепло від органічних відходів тваринництва. Застосування регенеративних теплообмінників або котлів на біогазі дозволяє значно знизити споживання основного палива, одночасно підтримуючи стабільний мікроклімат. Рекуперація тепла від вентиляції особливо ефективна у великих свинарниках та пташниках, де вона здатна передавати до 20–40% теплової енергії від вихідного повітря свіжому повітрю, знижуючи енергетичні витрати на опалення та кондиціювання повітря.

Таким чином, сучасні системи енергопостачання тваринницьких об'єктів поєднують у собі різні джерела та технології: традиційні котельні, автономні генератори, відновлювані джерела енергії та когенераційні установки. Оптимальне поєднання цих елементів дозволяє забезпечити надійне та економічно ефективно енергопостачання, підтримку стабільного мікроклімату та зниження витрат на експлуатацію господарства, що є критично важливим для сучасного тваринництва.

1.3. Огляд когенераційних технологій та принципи їх роботи

Когенераційні технології (КГУ) реалізують процес комбінованого виробництва електричної та теплової енергії з єдиного первинного джерела палива, що забезпечує суттєве підвищення загальної енергетичної ефективності системи.

Фундаментальний принцип функціонування КГУ полягає у використанні енергії, вивільненої в результаті спалювання палива (зокрема, природного газу або біогазу) у робочому тілі теплового двигуна (поршневого двигуна внутрішнього згорання або газової турбіни). Цей процес генерує механічну енергію, яка конвертується в електричну за допомогою інтегрованого генератора.

Одночасно відбувається утилізація скидної теплоти, що є побічним продуктом роботи двигуна. Ця тепла енергія рекуперується за допомогою теплообмінних апаратів та спрямовується на задоволення потреб у теплопостачанні (опалення, гаряче водопостачання) або використовується у технологічних процесах промислового призначення.

Під поняттям «когенераційна установка» розуміють енергетичний комплекс, який забезпечує одночасне виробництво теплової та електричної енергії в межах єдиного технологічного циклу. Основою таких систем є теплові двигуни — поршневі або газотурбінні, що працюють у діапазоні малої (0,5–2 МВт) та середньої (до 30–40 МВт) електричної потужності.

На відміну від традиційних теплоелектроцентралей (ТЕЦ), де значна частина тепла відпрацьованих газів втрачається в атмосферу, когенераційні установки використовують цю теплоту повторно. Відпрацьована тепла енергія спрямовується в котел-утилізатор, який забезпечує нагрів води для систем опалення, гарячого водопостачання або для технологічних потреб підприємства. У деяких схемах ця теплота може безпосередньо застосовуватись у виробничих процесах, наприклад, для сушіння сировини чи підігріву повітря, що підвищує загальний коефіцієнт корисної дії системи.

Таким чином, когенераційна технологія дозволяє комплексно використовувати паливо, перетворюючи його енергію як в електричну, так і в теплову з мінімальними втратами. Це забезпечує високу енергоефективність (до 85–90%), зменшує витрати палива та сприяє зниженню негативного впливу на довкілля.

За своєю структурою та принципом роботи когенераційні установки багато в чому подібні до паротурбінних теплоелектроцентралей (ТЕЦ). Вони також включають комплекси з виробництва теплової та електричної енергії, мережі для транспортування енергії споживачам, системи розподілу, а також вузли автоматизованого контролю та керування технологічними процесами.

Основна різниця між цими двома типами енергетичних об'єктів полягає у масштабах виробництва та визначенні пріоритетного виду енергії. Для традиційних паротурбінних ТЕЦ головним продуктом, як правило, є електрична енергія, тоді як теплова енергія використовується переважно як побічний продукт, що підвищує загальну ефективність установки. У випадку ж когенераційних систем, навпаки, основним є виробництво теплоти, а електроенергія виступає супутнім продуктом.

Потужність когенераційної установки визначається відповідно до існуючого теплового навантаження об'єкта, що забезпечує максимальний коефіцієнт корисного використання палива (ККВП) протягом усього року. Такий підхід дозволяє оптимізувати роботу енергосистеми, мінімізувати втрати енергії та досягти найвищої економічної ефективності при забезпеченні потреб споживачів у теплі та електриці.

Використання когенераційних систем енергопостачання є одним із найбільш ефективних напрямів підвищення енергоефективності в сучасній енергетиці. Їх впровадження забезпечує низку вагомих переваг як з технічної, так і з економічної точки зору.

Однією з головних переваг є високий загальний коефіцієнт корисної дії (ККД). Завдяки одночасному виробництву теплової та електричної енергії в межах єдиного технологічного циклу, ефективність когенераційних установок

може досягати 85–90%, що значно перевищує показники традиційних енергетичних систем. У звичайних електростанціях значна частина теплоти відпрацьованих газів втрачається в навколишнє середовище, тоді як у когенераційних системах ця енергія ефективно утилізується для опалення, вентиляції, підігріву води або технологічних потреб.

Другою суттєвою перевагою є економічна доцільність. Власне виробництво енергії дозволяє суттєво знизити витрати на електроенергію та тепло, зменшити залежність від коливань тарифів енергопостачальних компаній і скоротити експлуатаційні витрати підприємства. Крім того, надлишкову електроенергію, отриману від когенераційної установки, у деяких випадках можна передавати в загальну енергомережу, що створює додаткове джерело прибутку.

Ще однією важливою перевагою є мінімізація енергетичних втрат. На відміну від централізованих енергетичних систем, де значна частина енергії втрачається під час транспортування по магістральних мережах, когенераційні установки працюють безпосередньо біля споживача, що дозволяє майже повністю усунути ці втрати.

Існує низка конфігурацій когенераційних систем, серед яких домінуючою є система, що використовує природний газ (або біогаз) як основне паливо.

РОЗДІЛ 2

СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦІЇ СВИНАРНИКА

2.1. Види систем вентиляції

На сучасному етапі ефективність свинарства значною мірою визначається впровадженням інноваційних технологій, які забезпечують комфортні умови утримання тварин. Комфорт свиней є ключовим фактором підвищення їх продуктивності в умовах промислового вирощування, як на окремих господарствах, так і в масштабі всієї галузі. Для отримання високоякісної продукції свинарства сучасні ферми повинні відповідати низці вимог щодо утримання тварин, включаючи дотримання санітарних норм, правильно складені раціони годування та врахування ергономічних показників приміщень.

Необхідний обсяг припливного повітря змінюється залежно від температури навколишнього середовища: із підвищенням температури він збільшується, тоді як взимку знижується до рівня мінімальної вентиляції, достатньої для підтримання концентрації шкідливих речовин нижче допустимого рівня. При виборі типу вентиляційної системи слід враховувати не лише обсяг припливного повітря, а й його циркуляцію у приміщенні, а також швидкість повітряних потоків у місцях утримання тварин. Рекомендовані значення швидкості повітря складають не більше 0,1 м/с у зимовий період і 0,2 м/с у літній. При температурі повітря понад 22 °С швидкість повітряних потоків слід збільшити до 0,5–1,0 м/с.

Шахтна вентиляція є однією з найбільш поширених систем у свинарниках середньої та великої потужності. У цій системі приплив свіжого повітря здійснюється через регульовані припливні клапани, які забезпечують рівномірний розподіл повітря по всьому об'єму приміщення. Витяжка проводиться через вертикальні вентиляційні шахти, що дозволяє ефективно видаляти тепле, забруднене повітря, а також гази та запахи. Така схема

вентиляції характеризується відносно простим технічним виконанням і високою надійністю в експлуатації, проте її ефективність зменшується при значній ширині приміщення.

Поперечна вентиляція реалізується за рахунок подачі свіжого повітря через регульовані припливні клапани, розташовані на одній стіні, та видалення відпрацьованого повітря через стінові вентилятори на протилежній стороні будівлі. Цей вид вентиляції особливо ефективний при ширині приміщень до 12 м, оскільки забезпечує рівномірний повітрообмін по всьому об'єму без утворення застійних зон. Поперечна вентиляція також дозволяє краще контролювати швидкість руху повітря, що є важливим для підтримки оптимальної температури та мінімізації стресу у тварин.

Вентиляція з підпільних каналів використовує систему витяжки через гнойові канали, розташовані під ґратчастою підлогою. Свіже повітря надходить у приміщення зверху або через припливні клапани, а забруднене повітря і гази безпосередньо видаляються з-під підлоги. Така схема забезпечує інтенсивне видалення шкідливих газів, зменшує накопичення аміаку та сприяє покращенню мікроклімату в зоні утримання тварин.

Стельова вентиляція передбачає подачу свіжого повітря через перфоровану підшивну стелю, тоді як витяжка здійснюється через низько розташовану витяжну вежу або стінові вентилятори. Цей тип вентиляції забезпечує рівномірне охолодження та прогрівання приміщення, зменшує утворення зон турбулентності та дозволяє контролювати температурний режим у різних частинах свинарника.

Коридорна вентиляція базується на подачі свіжого повітря з опалювального коридору, який розташований вздовж приміщення. Витяжка проводиться через витяжну вежу або стінові вентилятори. Така система дозволяє ефективно контролювати температуру та повітрообмін у довгих приміщеннях, а також зменшує витрати тепла на обігрів припливного повітря.

Розподільна вентиляція є модифікацією коридорної системи та передбачає подачу повітря з опалювального коридору через нагнітальний розподільний

рукав за допомогою вентилятора. Ця схема забезпечує рівномірний розподіл свіжого повітря по всьому об'єму приміщення, усуває застійні зони та дозволяє більш точно регулювати температурний і газовий режим у зоні утримання тварин.

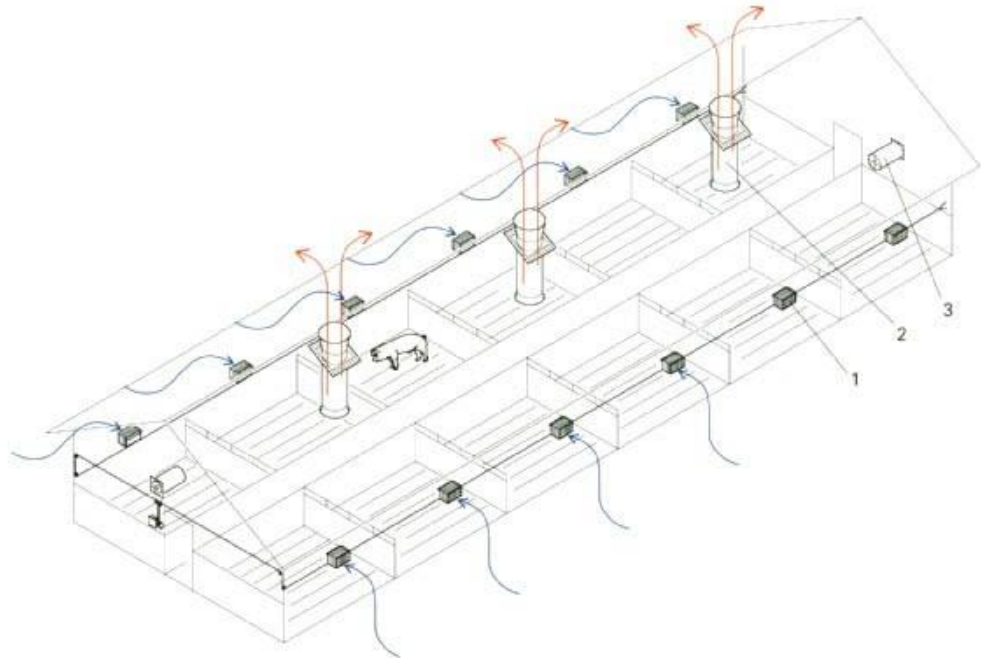


Рис. 2.1. Схема вентиляції свиноферми

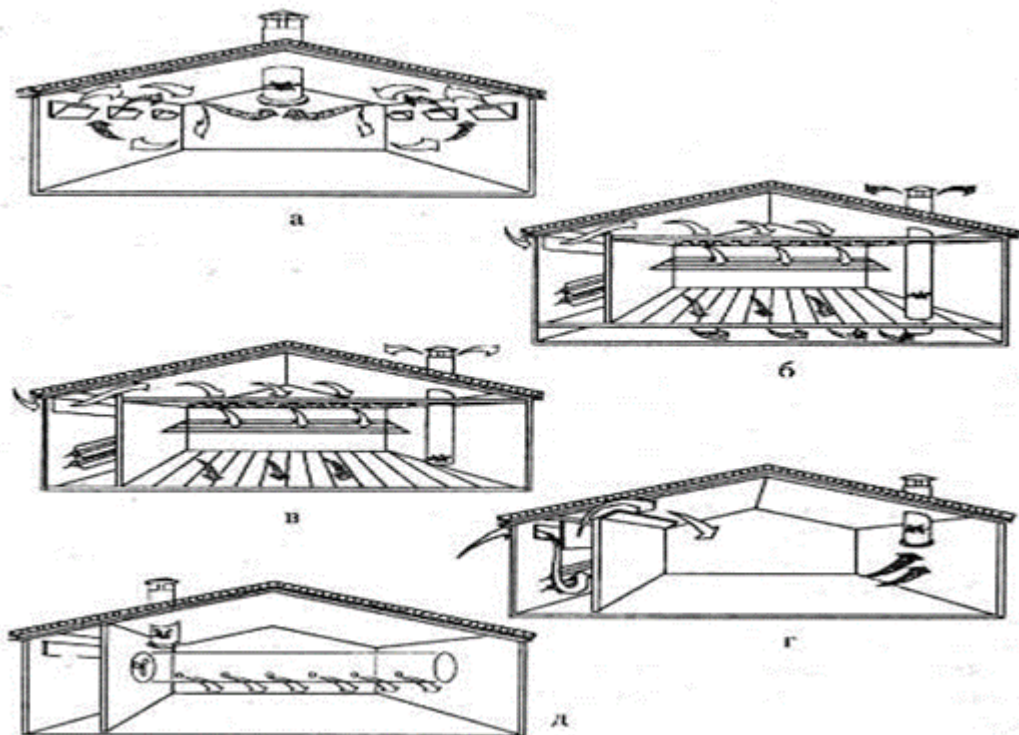


Рис. 2.2. Види систем вентиляції (а — шахтна; б — з підпільних каналів; в — стельова; г — коридорна; д — розподільна).

2.2. Теплотехнічні характеристики свинарника-відгодівельника

Розрахунок теплопостачання та вентиляції свинарника-відгодівельника на 430 голів: Розміри ферми 460x20x4 м. Теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій будівлі свинарника-відгодівельника: зовнішня стіна кладка в 2 цегли на важкому цементному розчинні $\delta=0,510$ м, $\lambda=0,810$ Вт/(м·К); внутрішня штукатурка товщиною $\delta=0,015$ м, $\lambda=0,930$ Вт/(м·К);). перекриття: залізобетонна плита $\delta=0,035$ м; $\lambda=1,630$ Вт/(м·К); настил дощок $\delta=0,035$ м, $\lambda=0,170$ Вт/(м·К); пароізоляцією (один прошарок рубероїду $\delta=0,0015$ м, $\lambda=0,170$ Вт/(м·К) та утеплювачем (мінеральна вата $\delta=0,140$ м, $\lambda=0,070$ Вт/(м·К); підлога: плита керамзитбетонна товщиною 0,150м. вікно у дерев'яній коробці (1x2) 40 шт. $R=0,050$ Вт/(м²·К); двері розміром 4x3, $R=0,36$ Вт/(м²·К).

Розрахунок систем теплопостачання та вентиляції свинарника-відгодівельника на 430 голів. Планується розміщення свиней у приміщенні розмірами 460 × 20 × 4 м. Для розрахунку теплотехнічних показників використано такі характеристики огорожувальних конструкцій будівлі.

Зовнішні стіни — виконані з цегляної кладки в дві цеглини на важкому цементному розчині. Товщина стіни становить $\delta = 0,510$ м, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,810$ Вт/(м·К). З внутрішнього боку нанесено шар штукатурки товщиною $\delta = 0,015$ м, з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 0,930$ Вт/(м·К).

Перекриття — складається із залізобетонної плити товщиною $\delta = 0,035$ м ($\lambda = 1,630$ Вт/(м·К)), настилу з дощок товщиною $\delta = 0,035$ м ($\lambda = 0,170$ Вт/(м·К)), шару пароізоляції (один прошарок рубероїду товщиною $\delta = 0,0015$ м, $\lambda = 0,170$ Вт/(м·К)) та теплоізоляційного шару з мінеральної вати товщиною $\delta = 0,140$ м, з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 0,070$ Вт/(м·К).

Підлога — виконана з керамзитобетонної плити товщиною 0,150 м, що забезпечує достатню теплоізоляцію та механічну міцність конструкції.

Віконні прорізи — встановлено 40 вікон розміром 1×2 м у дерев'яних рамах, з опором теплопередачі $R = 0,050$ Вт/(м²·К).

Дверні прорізи — одна дверна конструкція розміром 4×3 м, з опором теплопередачі $R = 0,36$ Вт/(м²·К).

2.3. Розрахунок в холодний період року

Годинний обсяг припливного повітря, необхідний для зниження концентрації CO₂, у приміщенні, розраховується за наступною формулою:

$$Q_{CO_2} = \frac{c \cdot n \cdot k}{C_1 - C_2}, \quad (2.1)$$

де $C_1 = 1,8$ л/м³ – гранично допустимий вміст CO₂ у повітрі приміщення;

$C_2 = 0,3$ л/м³ – концентрація CO₂ у зовнішньому повітрі;

$c = 44$ л/год – кількість CO₂, що виділяється одією твариною;

n – кількість тварин;

$k = 1,2$ – коефіцієнт, який враховує зміну об'єму газу, водяної пари та теплоти, що виділяється твариною залежно від температури приміщення.

$$Q_{CO_2} = \frac{44 \cdot 430 \cdot 1,2}{1,8 - 0,3} = 15136 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (2.2)$$

Годинний обсяг витяжного повітря, потрібний для видалення водяної пари, обчислюють за такою формулою:

$$Q_w = \frac{W}{(d_b - d_z) \cdot \gamma_v}, \quad (2.3)$$

де $d_b = 7,9$ та $d_z = 0,9$ – відносні вологості, що визначаються за допомогою діаграми Hd для тварин;

γ_B – густина повітря при температурі всередині приміщення ($t_B = +16^\circ\text{C}$);

W – загальна кількість вологи, що виділяється.

$$Q_w = \frac{132018,7}{(7,9-0,9) \cdot 1,19} = 15848,6 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (2.4)$$

Розрахунок густини повітря при температурі, за якої здійснюється видалення пари, проводиться за формулою:

$$\gamma_B = \frac{346}{273+t_B} \cdot \frac{P}{99,3}, \quad (2.5)$$

де $t_B = +16^\circ\text{C}$ – температура повітря всередині приміщення;

$P = 98$ кПа — барометричний тиск, прийнятий для даного району, 99,3 — середній розрахунковий барометричний тиск, характерний для території України.

$$\gamma_B = \frac{346}{273+16} \cdot \frac{98}{99,3} = 1,19 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (2.6)$$

Розрахунок загальної кількості вологи, що виділяється в телятнику, здійснюється за формулою:

$$W = W_{\text{ТВ}} + W_{\text{Вип}}, \quad (2.7)$$

де $W_{\text{ТВ}}$ – кількість вологи, що виділяється безпосередньо тваринами;

$W_{\text{Вип}}$ – об'єм вологи, який утворюється внаслідок випаровування з вологих поверхонь приміщення.

$$W = 120017 + 12001,7 = 132018,7 \frac{\text{г}}{\text{год}} \quad (2.8)$$

Кількість вологи, що виділяється тваринами, розраховують за формулою:

$$W_{\text{ТВ}} = n \cdot \omega \cdot k, \quad (2.9)$$

де n – кількість тварин;

ω – об'єм водяної пари, що виділяється однією твариною;

k – коефіцієнт, який враховує зміну тепловиділення тварини залежно від температури повітря.

$$W_{\text{ТВ}} = 430 \cdot 247 \cdot 1,13 = 120017 \frac{\text{г}}{\text{год}} \quad (2.10)$$

Волога, що випаровується з вологих поверхонь приміщення:

$$W_{\text{Вип}} = 0,1 \cdot W_{\text{ТВ}}, \quad (2.11)$$

$$W_{\text{Вип}} = 0,1 \cdot 120017 = 12001,7 \frac{\text{г}}{\text{год}}, \quad (2.12)$$

$$Q_{\text{В}} = 1,1 \cdot Q_{\text{CO}_2}, \quad (2.13)$$

де 1,1 – поправковий коефіцієнт, що враховує втрати повітря у повітропроводах.

$$Q_{\text{В}} = 1,1 \cdot 15136 = 16650 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (2.14)$$

2.4. Розрахунок в теплий період року

Годинний обсяг припливного повітря, необхідний для зниження концентрації CO_2 , у приміщенні, розраховується за наступною формулою:

$$Q_{CO_2} = \frac{c \cdot n \cdot k}{C_1 - C_2}, \quad (2.15)$$

де $C_1 = 1,8 \text{ л/м}^3$ – гранично допустимий вміст CO_2 у повітрі приміщення;

$C_2 = 0,3 \text{ л/м}^3$ – концентрація CO_2 у зовнішньому повітрі;

$c = 40 \text{ л/год}$ – кількість CO_2 , що виділяється одією твариною;

n – кількість тварин;

$k = 1,1$ – коефіцієнт, який враховує зміну об'єму газу, водяної пари та теплоти, що виділяється твариною залежно від температури приміщення.

$$Q_{CO_2} = \frac{40 \cdot 430 \cdot 1,1}{1,8 - 0,3} = 13875 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (2.16)$$

Годинний обсяг витяжного повітря, потрібний для видалення водяної пари, обчислюють за такою формулою:

$$Q_w = \frac{W}{(d_b - d_3) \cdot \gamma_B}, \quad (2.17)$$

де $d_b = 9,5$ та $d_3 = 1$ – відносні вологості, що визначаються за допомогою діаграми Hd для тварин;

γ_B – густина повітря при температурі всередині приміщення ($t_B = +28^\circ\text{C}$);

W – загальна кількість вологи, що виділяється.

$$Q_w = \frac{132018,7}{(9,5 - 1) \cdot 1,09} = 14249 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (2.18)$$

Розрахунок густини повітря при температурі, за якої здійснюється видалення пари, проводиться за формулою:

$$\gamma_B = \frac{346}{273+t_B} \cdot \frac{P}{99,3}, \quad (2.19)$$

де $t_B = +28^\circ\text{C}$ – температура повітря всередині приміщення;

$P = 98$ кПа — барометричний тиск, прийнятий для даного району, 99,3 — середній розрахунковий барометричний тиск, характерний для території України.

$$\gamma_B = \frac{346}{273+28} \cdot \frac{98}{99,3} = 1,09 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad (2.20)$$

Розрахунок загальної кількості вологи, що виділяється в телятнику, здійснюється за формулою:

$$W = W_{\text{ТВ}} + W_{\text{Вип}}, \quad (2.21)$$

де $W_{\text{ТВ}}$ – кількість вологи, що виділяється безпосередньо тваринами;

$W_{\text{Вип}}$ – об'єм вологи, який утворюється внаслідок випаровування з вологих поверхонь приміщення.

$$W = 120017 + 12001,7 = 132018,7 \frac{\text{г}}{\text{год}} \quad (2.22)$$

Кількість вологи, що виділяється тваринами, розраховують за формулою:

$$W_{\text{ТВ}} = n \cdot \omega \cdot k, \quad (2.23)$$

де n – кількість тварин;

ω – об'єм водяної пари, що виділяється однією твариною;

k – коефіцієнт, який враховує зміну тепловиділення тварини залежно від температури повітря.

$$W_{\text{ТВ}} = 430 \cdot 247 \cdot 1,13 = 120017 \frac{\text{г}}{\text{год}} \quad (2.24)$$

Волога, що випаровується з вологих поверхонь приміщення:

$$W_{\text{вип}} = 0,1 \cdot W_{\text{ТВ}}, \quad (2.25)$$

$$W_{\text{вип}} = 0,1 \cdot 120017 = 12001,7 \frac{\text{г}}{\text{год}} \quad (2.26)$$

Для забезпечення належного повітрообміну в приміщенні свинарника-відгодівельника на 430 голів необхідно забезпечити обсяг повітрообміну 16650 м³/год. Для цього обираємо 14 вентиляторів типу Shuft CFK 250 Мах, технічні характеристики яких наведені в Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики Shuft Cfk 250 Мах

Повітрообмін, м ³ /год	Дж. тепла	Напруга, В	Тиск, Па	Потуж. двигуна, кВт	Струм, А
1200	електрика	230	590	0,22	1,7

Нижче подано графік, що відображає основні технічні характеристики обраного вентилятора:

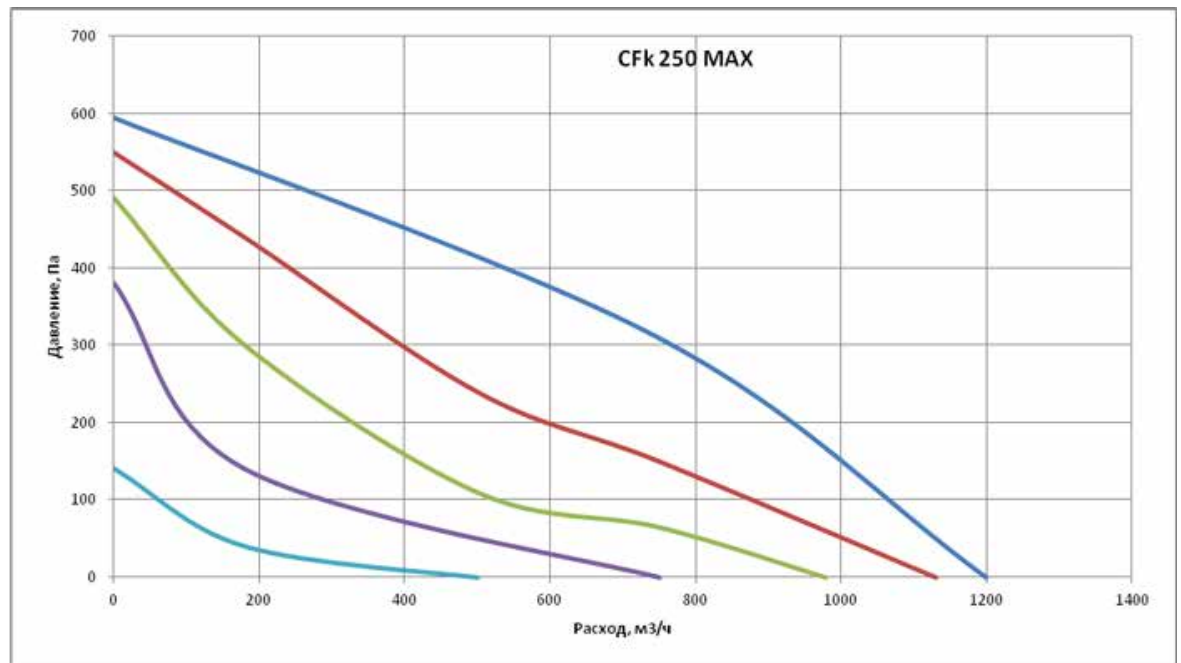


Рис. 2.3. Графік, що відображає основні технічні характеристики обраного вентилятора

2.5. Енергетичні витрати на вентиляцію

Вентиляція тваринницьких приміщень є одним із основних факторів забезпечення оптимального мікроклімату, оскільки вона впливає на температуру, вологість, швидкість руху повітря та концентрацію шкідливих газів, таких як аміак та вуглекислий газ. Ефективна вентиляційна система дозволяє підтримувати здоров'я та продуктивність тварин, запобігає накопиченню шкідливих речовин та знижує ризик розвитку захворювань.

Для приміщення свинарника-відгодівельника на 430 голів за розрахунковими даними необхідний обсяг повітрообміну становить 16650 м³/год. Забезпечення такого повітрообміну передбачає використання механічної вентиляції з високим ступенем регульованості, що дозволяє підтримувати стабільний мікроклімат незалежно від зовнішніх умов.

Для реалізації зазначеного обсягу повітрообміну було обрано 14 вентиляторів типу Shuft CFK 250 Max. Кожен вентилятор забезпечує повітрообмін у розмірі 1200 м³/год при номінальному тиску 590 Па та споживає

електричну потужність 0,22 кВт. Напруга живлення вентиляторів складає 230 В, а споживаний струм — 1,7 А. Технічні характеристики вентиляторів наведені у Таблиці 1.

Сумарна електрична потужність, необхідна для роботи 14 вентиляторів, становить:

$$P_{\text{загл}} = 14 \cdot 0,22 = 3,08 \text{ кВт} \quad (2.27)$$

Таким чином, обрана вентиляційна система поєднує високу продуктивність і економічну ефективність, забезпечуючи необхідний обсяг повітрообміну для 430 голів свиней і визначаючи одну з основних статей енергетичних витрат у системі мікроклімату свинарника.

РОЗДІЛ 3

СИСТЕМА ОПАЛЕННЯ СВИНАРНИКА

3.1. Система опалення

Для забезпечення високої ефективності утримання свиней необхідно створювати оптимальні кліматичні умови в приміщеннях. Однією з найважливіших складових є підтримка оптимальних тепло-вологісних характеристик повітря у свинарнику-відгодівельнику. Ідеальною температурою для свиней вважається така, при якій вони не витрачають значної кількості енергії на підтримку сталої температури тіла. У холодних приміщеннях підвищуються витрати корму, тоді як надмірно висока температура знижує апетит тварин і призводить до втрати маси.

Сучасні системи обігріву та опалення свинарників дозволяють підтримувати оптимальний тепло-вологісний режим у приміщеннях та створювати комфортні умови для різних груп свиней.

Інфрачервоні обігрівачі працюють за принципом променевого тепловиділення, подібного до сонячного випромінювання, коли тепло передається безпосередньо у робочу зону. Їх можна використовувати як для локального, так і для основного обігріву. Особливо ефективні для поросят, оскільки допомагають підтримувати стабільну температуру тіла, що є критичним для росту та розвитку.

Опалювальні труби є універсальними системами опалення свинарників. Вони відрізняються простотою обслуговування та високою тепловіддачею при мінімальних витратах енергії. Такі системи можуть бути встановлені безпосередньо в бетонні підлоги на невелику глибину, що забезпечує ефективний обігрів приміщення та оптимальний розподіл тепла.

Сучасні системи опалення дозволяють підтримувати оптимальний тепло-вологісний режим і створювати комфортні умови для різних вікових та

продуктивних груп свиней. В рамках даного дослідження передбачено застосування водяних калориферів, які працюють на гарячій воді, виробленій когенераційною установкою. Використання когенерації дозволяє інтегрувати виробництво електроенергії та тепла, що підвищує загальний коефіцієнт корисної дії енергетичної системи та знижує витрати на паливо.

Водяні калорифери функціонують у складі циркуляційної системи гарячої води, яка підключена до теплообмінника когенераційної установки. Така схема забезпечує рівномірний розподіл тепла по приміщенню та гнучке регулювання температури в залежності від потреб тварин різного віку. Зокрема, оптимальна температура для новонароджених поросят протягом перших днів життя складає близько 30 °С, поступово знижуючись до 18 °С протягом перших чотирьох тижнів. Ремонтний молодняк, підсисні свиноматки та важко супоросні свиноматки комфортно почуваються при температурі близько 20 °С, тоді як для відгодівельного поголів'я рекомендована температура на рівні 16 °С.

Водяні калорифери мають ряд переваг у порівнянні з традиційними системами опалення на основі прямого нагріву. Вони дозволяють рівномірно розподіляти тепло, підтримувати стабільний мікроклімат без локальних перегрівів, не виділяють продукти згоряння у робочу зону, що позитивно впливає на якість повітря і зменшує стрес для тварин.

Впровадження водяних калориферів на базі когенераційної установки забезпечує оптимальні кліматичні умови для всіх вікових груп тварин, підвищує енергоефективність господарства та сприяє раціональному використанню виробленої електроенергії для потреб об'єкта. Такий підхід дозволяє поєднувати високий рівень комфорту для тварин із економічною ефективністю та екологічною безпекою експлуатації опалювальної системи.

3.2. Розрахунок системи опалення в холодний період року.

Розрахунок теплової потужності системи опалення виконуємо за формулою:

$$\Phi_{\text{оп.}} = \Phi_{\text{ог.}} + \Phi_{\text{вент.}} + \Phi_{\text{вип.}} + \Phi_{\text{інф.}} - \Phi_{\text{тв}}, \quad (3.1)$$

де $\Phi_{\text{ог.}}$ – втрати теплоти через огорожувальні конструкції;

$\Phi_{\text{вент.}}$ – втрати теплоти, необхідні для нагрівання припливного повітря;

$\Phi_{\text{вип.}}$ – втрати теплоти, пов'язані з випаровуванням вологи;

$\Phi_{\text{інф.}}$ – втрати теплоти на нагрів інфільтраційного повітря;

$\Phi_{\text{тв}}$ – кількість теплоти, що виділяється однією твариною.

$$\Phi_{\text{оп.}} = 85702 + 25711 + 8305 + 153380 - 16271 = 256827 \text{ Вт} \quad (3.2)$$

Розрахунок втрат теплоти через зовнішні огорожувальні конструкції здійснюється за формулою:

$$\Phi_{\text{ог}} = \Phi_{\text{з.с}} + \Phi_{\text{ст}} + \Phi_{\text{під}}, \quad (3.3)$$

де $\Phi_{\text{з.с}}$ – втрати теплоти через зовнішні стіни;

$\Phi_{\text{ст}}$ – втрати теплоти через стелю;

$\Phi_{\text{під}}$ – втрати теплоти через підлогу.

$$\Phi_{\text{ог}} = 8680 + 64335 + 12687 = 85702 \text{ Вт} \quad (3.4)$$

Розрахунок тепловтрат через зовнішні стіни виконується за формулою:

$$\Phi_{\text{з.с}} = \Phi_{\text{з.с}}^* + \Phi_{\text{дод}}, \quad (3.5)$$

де $\Phi_{\text{з.с}}^*$ – втрати теплоти через зовнішні стіни;

$\Phi_{\text{дод}}$ – додаткові тепловитрати.

$$\Phi_{3.c} = 58486 + 5848,6 = 64335 \text{ Вт} \quad (3.6)$$

Втрати теплоти через зовнішні стіни визначають за формулою:

$$\Phi_{3.c}^* = \left(\frac{1}{R_{0.3.c}}\right) \cdot F_{3.c} \cdot (t_B - t_3) + \left(\frac{1}{R_{0.B}}\right) \cdot F_B \cdot (t_B - t_3) + \left(\frac{1}{R_{0.дв}}\right) \cdot F_{дв} \cdot (t_B - t_3), \quad (3.7)$$

де $R_{0.3.c}$ – опір теплопередачі зовнішніх стін;

$R_{0.B}$ – опір теплопередачі вікон;

$R_{0.дв}$ – опір теплопередачі дверей;

$F_{3.c}$ – площа зовнішніх стін;

F_B – площа вікон;

$F_{дв}$ – площа дверей;

t_B – температура всередині приміщення (+16°C);

t_3 – температура зовнішнього повітря (-15°C).

$$\begin{aligned} \Phi_{3.c}^* = & \left(\frac{1}{0,9}\right) \cdot 228 \cdot (16 + 15) + \left(\frac{1}{0,050}\right) \cdot 80 \cdot (16 + 15) + \left(\frac{1}{0,36}\right) \cdot 12 \cdot \\ & \cdot (16 + 15) = 58486 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Розрахунок площі зовнішніх стін, дверей та вікон:

$$F_B = (1 \cdot 2) \cdot 40 = 80 \text{ м}^2, \quad (3.9)$$

$$F_{дв.} = (4 \cdot 3) = 12 \text{ м}^2, \quad (3.10)$$

$$F_{3.c} = ((20 \cdot 4) \cdot 4) - (12 + 80) = 228 \text{ м}^2 \quad (3.11)$$

Розрахунок опору теплопередачі зовнішніх стін здійснюється за формулою:

$$R_{o.z.c} = R_B + \frac{\delta_{ц.}}{\lambda_{ц.}} + \frac{\delta_{шт.}}{\lambda_{шт.}} + R_3, \quad (3.12)$$

де R_B – опір теплопередачі внутрішньої поверхні тваринницького приміщення;

R_3 – опір теплопередачі зовнішньої поверхні огороження;

$\delta_{ц.}$ – товщина шару цементного розчину;

$\lambda_{ц.}$ – коефіцієнт теплопровідності цементного розчину;

$\delta_{шт.}$ – товщина шару штукатурки;

$\lambda_{шт.}$ – коефіцієнт теплопровідності штукатурного шару.

$$R_{o.z.c} = 0,115 + \frac{0,510}{0,810} + \frac{0,015}{0,930} + 0,043 = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (3.13)$$

Розрахунок додаткових тепловтрат проводиться за формулою:

$$\Phi_{\text{дод}} = 0,1 \cdot \Phi_{3.c}^*, \quad (3.14)$$

де 0,1 – додаткові 5% основних втрат теплоти

$$\Phi_{\text{дод}} = 0,1 \cdot 58486 = 5848,6 \text{ Вт} \quad (3.15)$$

Розрахунок втрат теплоти через стелю здійснюється за формулою:

$$\Phi_{\text{ст.}} = \left(\frac{1}{R_{o.ст.}} \right) \cdot F_{\text{ст.}} \cdot (t_B - t_3), \quad (3.16)$$

де $R_{o.ст.}$ – опір теплопередачі стелі, $F_{\text{ст.}}$ – площа стелі.

$$\Phi_{\text{ст.}} = \left(\frac{1}{2,4} \right) \cdot 700 \cdot (16 + 15) = 8680 \text{ Вт} \quad (3.17)$$

Розраховуємо опір теплопередачі стелі:

$$R_{o.ст} = R_B + \frac{\delta_{з.б}}{\lambda_{з.б}} + \frac{\delta_{дощ.}}{\lambda_{дощ.}} + \frac{\delta_{руб.}}{\lambda_{руб.}} + \frac{\delta_{мін.в}}{\lambda_{мін.в}} + R_3, \quad (3.18)$$

де R_B – опір теплопередачі внутрішньої поверхні тваринницького приміщення;

R_3 – опір теплопередачі зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції;

$\delta_{з.б}$ – товщина шару залізобетону;

$\lambda_{з.б}$ – коефіцієнт теплопровідності залізобетону;

$\delta_{дощ.}$ – товщина шару дощок;

$\lambda_{дощ.}$ – коефіцієнт теплопровідності деревини (дощок);

$\delta_{руб.}$ – товщина шару рубероїду;

$\lambda_{руб.}$ – коефіцієнт теплопровідності рубероїду;

$\delta_{мін.в}$ – товщина шару мінеральної вати;

$\lambda_{мін.в}$ – коефіцієнт теплопровідності мінеральної вати.

$$R_{o.ст} = 0,115 + \frac{0,035}{1,630} + \frac{0,025}{0,170} + \frac{0,0015}{0,170} + \frac{0,140}{0,070} + 0,043 = 2,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (3.19)$$

Розрахувати площу стелі:

$$F_{ст.} = 35 \cdot 20 = 700 \text{ м}^2 \quad (3.20)$$

Розраховуємо тепловтрати через підлогу за формулою:

$$\Phi_{підл.} = 2 \cdot \left(\left(\frac{1}{R_{у.п1}} \right) \cdot F_1 + \left(\frac{1}{R_{у.п2}} \right) \cdot F_2 + \left(\frac{1}{R_{у.п3}} \right) \cdot F_3 \right) \cdot (t_B - t_3), \quad (3.21)$$

де $R_{у.п1}$, $R_{у.п2}$, $R_{у.п3}$ – пір теплопередачі першої, другої та третьої зон відповідно, F_1 , F_2 , F_3 – площі першої, другої та третьої зони відповідно.

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{підл.}} &= 2 \cdot \left(\left(\frac{1}{2,31} \right) \cdot 283,2 + \left(\frac{1}{4,3} \right) \cdot 283,2 + \left(\frac{1}{8,76} \right) \cdot 141,6 \right) \cdot (16 + 15) = \\ &= 12687 \text{ Вт}\end{aligned}\quad (3.22)$$

Знаходимо площі зон підлоги:

$$F_1 = F_2 = 70,8 \cdot 4 = 283,2 \text{ м}^2, \quad (3.23)$$

$$F_3 = 70,8 \cdot 2 = 141,6 \text{ м}^2 \quad (3.24)$$

Визначаємо опори теплопередачі першої, другої та третьої за формулами:

$$R_{у.п1} = 2,15 + \frac{0,15}{0,92} = 2,31, \quad (3.25)$$

$$R_{у.п2} = 4,3 + \frac{0,15}{0,92} = 4,46, \quad (3.26)$$

$$R_{у.п3} = 8,6 + \frac{0,15}{0,92} = 8,76, \quad (3.27)$$

Розрахунок теплового потоку вільної теплоти, що виділяється тваринами, проводимо за формулою:

$$\Phi_{\text{ТВ}} = n \cdot q \cdot k, \quad (3.28)$$

де n – кількість тварин;

q - тепловий потік, що виділяється однією твариною;

$k = 0,86$ коефіцієнт, який враховує зміну тепловиділення тварини залежно від температури повітря всередині приміщення.

$$\Phi_{\text{ТВ}} = 430 \cdot 44 \cdot 0,86 = 16271 \text{ Вт} \quad (3.29)$$

Розрахунок втрат теплоти на нагрів інфільтруючого повітря проводиться за формулою:

$$\Phi_{\text{інф.}} = 0,3 \cdot \Phi_{\text{ог.}}, \quad (3.30)$$

$$\Phi_{\text{інф.}} = 0,3 \cdot 85702 = 25711 \text{ Вт} \quad (3.31)$$

Розрахунок втрат теплоти, пов'язаних з випаровуванням вологи, проводиться за формулою:

$$\Phi_{\text{вип.}} = 0,692 \cdot W_{\text{вип.}}, \quad (3.32)$$

$$\Phi_{\text{вип.}} = 0,692 \cdot 12001,7 = 8305 \text{ Вт} \quad (3.33)$$

Розрахунок втрат теплоти на нагрів припливного повітря здійснюється за формулою:

$$\Phi_{\text{вент.}} = 0,278 \cdot Q_{\text{CO}_2} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{з}}), \quad (3.34)$$

де Q_{CO_2} – годинний об'єм припливного повітря, необхідний для зниження концентрації CO_2 , ρ – густина повітря, c – теплоємність повітря.

$$\Phi_{\text{вент.}} = 0,278 \cdot 15136 \cdot 1,17 \cdot 1,005 \cdot (16 + 15) = 153380 \text{ Вт} \quad (3.35)$$

Для обігріву приміщення свинарника на 430 голів у холодний період року необхідна сумарна теплова потужність близько 257 кВт. Для забезпечення цього показника було обрано водяні калорифери SALDA AVS 100. Для досягнення необхідної теплової потужності рекомендується встановити 79 одиниць цих калориферів, рівномірно розподіливши їх по площі свинарника, технічні характеристики яких подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Технічні характеристики водяного калорифера SALDA AVS 100

Параметр	Значення
Тип нагрівача	водяний каналний
Потужність нагріву, кВт	3,27
Робочий теплоносій	гаряча вода (макс. 100 °С)
Матеріал корпусу	оцинкована сталь
Матеріал теплообмінника	мідні трубки з алюмінієвими ребрами
Максимальний тиск теплоносія, бар	10
Діаметр підключення, мм	100
Наявність термостату	так
Рекомендовані умови експлуатації	температура повітря +5...+40 °С, відносна вологість ≤ 70 %

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНОК РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМІННИКА

4.1. Загальні відомості про теплообмінні апарати

Теплообмінні апарати — це пристрої для передачі теплоти від гарячого теплоносія до холодного. Вони широко застосовуються у промисловості, зокрема на атомних електростанціях для відведення тепла в реакторах.

За принципом роботи теплообмінники поділяються на змішувальні, де середовища контактують, та поверхневі (рекуператори), у яких теплота передається через роздільну стінку.

За конструкцією виділяють три основні типи:

- Кожухотрубні — мають кожух і систему тонких трубок, що забезпечують велику площу теплообміну;
- Пластинчасті — складаються з набору тонких пластин; гофровані зварні моделі забезпечують значно вищу ефективність;
- Об'ємні — резервуари зі змійовиками, де теплота передається через стінки між середовищами.

Теплоносії (гази, рідини, пари) виступають робочими середовищами теплообмінних апаратів. Залежно від схеми руху теплоносіїв, апарати поділяють на чотири типи:

- Прямоточні — гарячий і холодний потоки рухаються паралельно в одному напрямку;
- Протиточні — обидва потоки рухаються паралельно, але у протилежних напрямках;
- Перехресні — потоки рухаються під кутом один до одного, зазвичай під прямим;
- Складні — холодний теплоносіє протікає всередині труб, а гарячий омиває їх зовні як уздовж, так і поперек.

За характером теплового режиму теплообмінники поділяють на періодичної дії та безперервної дії.

У теплообмінниках періодичної дії відбувається нестационарний тепловий процес, під час якого певна порція продукту нагрівається або охолоджується. Через зміну властивостей і об'єму продукту параметри процесу постійно змінюються з часом.

Для виконання конкретного завдання застосовують різні типи теплообмінників. Вибір конструкції здійснюють відповідно до основних вимог, що висуваються до теплообмінного обладнання.

Головною вимогою є відповідність апарата технологічному процесу, що забезпечується за умови:

- підтримання потрібної температури;
- можливості регулювання температурного режиму;
- забезпечення необхідного часу перебування продукту в апараті;
- вибору матеріалу з урахуванням хімічних властивостей продукту;
- здатності апарата витримувати робочі тиски.

Другою важливою вимогою є висока ефективність та економічність роботи, що досягається підвищенням інтенсивності теплообміну при оптимальних гідравлічних опорах.

Усі ці вимоги є основою для проектування та вибору теплообмінного обладнання, головною метою якого є стабільний та ефективний перебіг технологічного процесу.

До найпоширеніших типів теплообмінників належать кожухотрубні апарати. Вони використовуються для теплообміну та термохімічних процесів між різними рідинами, парами та газами — як без зміни, так і зі зміною їх агрегатного стану.

Проте, незважаючи на широке застосування та конструктивне різноманіття кожухотрубних теплообмінників, не слід обмежуватися лише цим типом апаратів. У певних випадках доцільно розглядати альтернативні рішення — наприклад, використання пластинчастих, спіральних або компактних

теплообмінників, якщо їхні технічні параметри відповідають вимогам процесу і забезпечують економічно ефективніше використання ресурсів.

Кожухотрубний теплообмінник складається з трубного пучка, закріпленого у трубних дошках, а також кожуха, кришок, камер, патрубків і опор.

Трубний та міжтрубний простори апарата ізолювані один від одного й можуть бути розділені перегородками для створення кількох ходів потоку. Типова схема конструкції кожухотрубного теплообмінника наведена на рисунку 4.1.

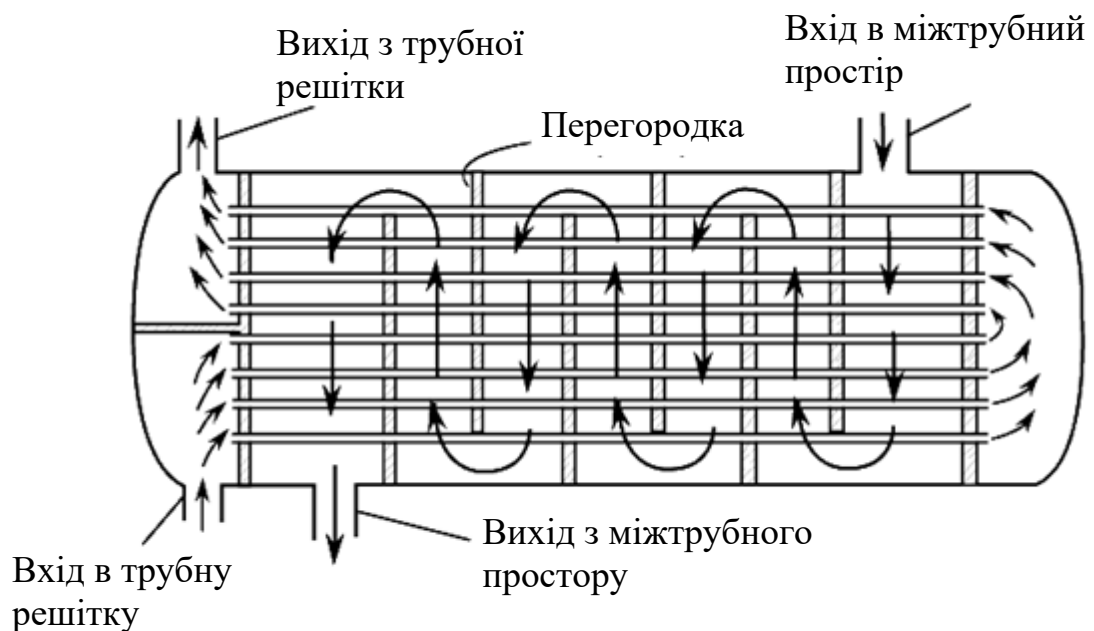


Рис. 4.1. Конструкція кожухотрубного теплообмінника.

Теплопередаюча поверхня теплообмінних апаратів може варіюватися від кількох сотень квадратних сантиметрів до кількох тисяч квадратних метрів. Схеми найбільш поширених типів кожухотрубних апаратів наведені на рисунку 4.2.

Корпус (кожух) кожухотрубного теплообмінника виконаний у вигляді труби, звареної з одного або декількох сталевих листів. Основна відмінність кожухів полягає у способі їх з'єднання з трубною дошкою та кришками.

Товщина стінки кожуха визначається тиском робочого середовища та діаметром корпусу, але зазвичай не менше 4 мм.

До циліндричних країв кожуха приварюють фланці для кріплення кришок або днищ, а на зовнішній поверхні монтують опори апарата.

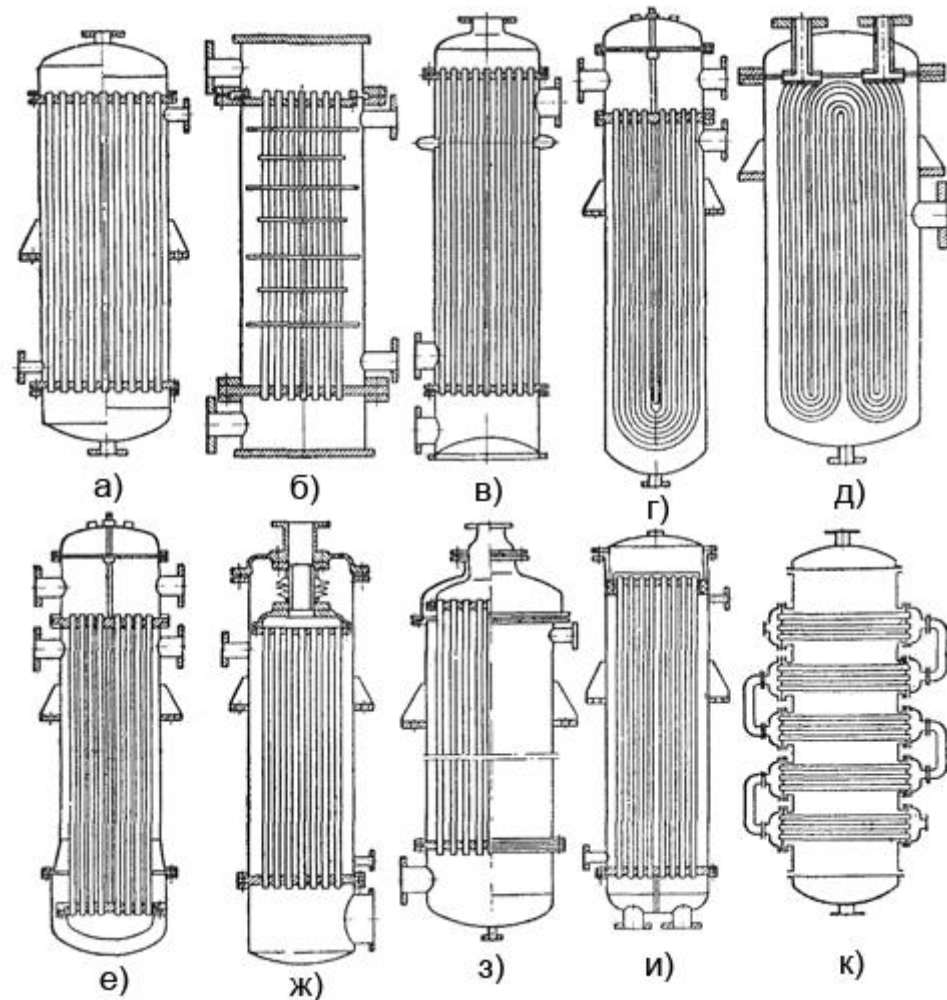


Рис. 4.2. Види кожухотрубних теплообмінників.

Трубна система кожухотрубних теплообмінників складається з прямих або вигнутих труб (U- або W-подібної форми) діаметром від 12 до 57 мм. Перегородки у міжтрубному просторі сприяють збільшенню швидкості теплоносія та підвищують ефективність теплообміну.

Трубні дошки призначені для закріплення пучка труб за допомогою розвальцьовування, розбортовки, зварювання, запаювання або сальникових кріплень. Вони можуть бути:

- привареними до кожуха (рис. 4.2. а, в);

- затиснутими болтами між фланцями кожуха та кришки (рис. 4.2. б, г);
- з'єднаними болтами тільки із фланцем вільної камери (рис. 4.2. д, е).

Кожухотрубні теплообмінники можуть мати конструкцію: тверду (рис. 4.2. а, к), нежорстку (рис. 4.2. г, д, е, з) або напівтверду (рис. 4.2. б, в, ж). Вони бувають одноходові та багатоходові, прямоточні, протиточні або поперечноточні, а також горизонтальні, похилі чи вертикальні.

Для вибору типу теплообмінника відповідно до технологічного процесу та визначення його геометричних параметрів необхідно проводити точні розрахунки, які поділяють на три види:

- Конструктивні – для проектування апаратів, визначення їх габаритів і площі теплообміну;
- Перевірочні – для підтвердження досягнення кінцевих температур теплоносіїв;
- Гідромеханічні – для розрахунку гідравлічного опору апарата.

Для конструктивного розрахунку теплообмінника необхідні наступні вихідні дані:

- витрати гарячого або охолоджуваного теплоносія;
- початкові температури теплоносіїв;
- кінцеві температури теплоносіїв;
- швидкості руху гарячого теплоносія;
- розміри проточної частини охолоджувача.

На основі таких конструктивних розрахунків було налагоджено масове виробництво апаратів цього типу.

4.2. Розрахунок теплообмінника

Розрахувати геометричні параметри горизонтального трубчастого кожухотрубного теплообмінника, призначеного для охолодження гарячого повітря влітку на вході в свинарика, що має витрату G_M^1 з початковою

температурою t_1' та кінцевою t_1'' за допомогою води з масовою витратою G_M^2 , у температурному діапазоні від t_2' до t_2'' .

Значення параметрів першого та другого теплоносіїв наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Параметри теплоносіїв

Теплоносій	Масова витрата G_M , кг/год.	Температура теплоносія		Теплоємність Ср, кДж/(кг·°С)	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м ² ·°С)	Густина ρ , кг/м ³	Коефіцієнт кінематичної в'язкості, м ² /с	Число Прандтля, Pr
		початкова t' , °С	кінцева t'' , °С					
Повітря	1010 00	33	25	1,005	0,0257	1,165	$15,11 \cdot 10^{-6}$	0,713
Вода	1600 0	5	-	4,182 *	0,574*	999,7*	$1,307 \cdot 10^{-6}$ *	7,01*

* - наведені параметри теплоносіїв наведені для середніх температур: для повітря при $t_{M.CEP.} = 29$ °С, для води – $t_{B.CEP.} = 7,5$ °С.

4.2.1. Тепловий розрахунок

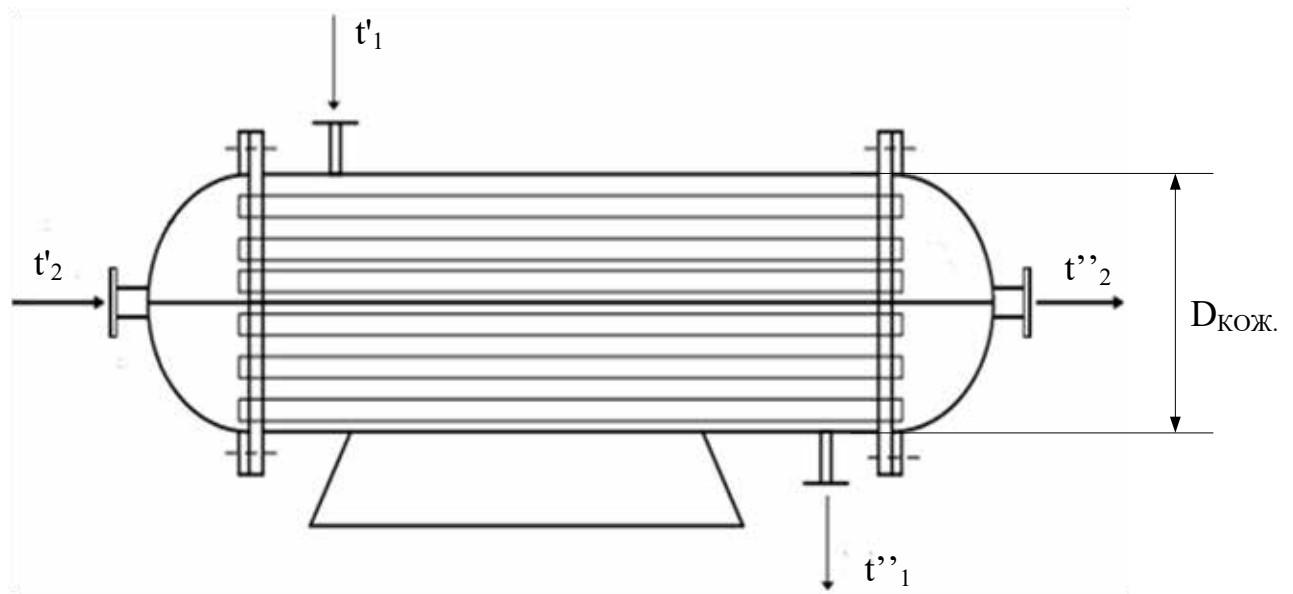


Рис. 4.3. Схема руху теплоносіїв у теплообмінному апараті.

Встановлюємо наступні параметри:

- діаметр кожуха – $D_{\text{кож}} = 1500$ мм;
- зовнішній діаметр труб – $d_{\text{тр.зовн.}} = 8$ мм;
- товщина стінки труб - $\delta_{\text{ст.тр.}} = 1$ мм.

Враховуючи, що труби на трубній дощці розташовані по вершинах рівностороннього трикутника, прийmemo відстань між ними – $S_1 = 13$ мм.

Для визначення кількості труб у пучку спершу необхідно розрахувати величину S_2 . Цю величину обчислюємо за теоремою Піфагора, оскільки S_2 є висотою та медіаною рівностороннього трикутника, утвореного розміщенням труб (див. рис. 4.4.):

$$S_2 = \sqrt{S_3^2 - \left(\frac{S_1}{2}\right)^2} = \sqrt{13^2 - \left(\frac{13}{2}\right)^2} \approx 11 \text{ мм} \quad (4.1)$$

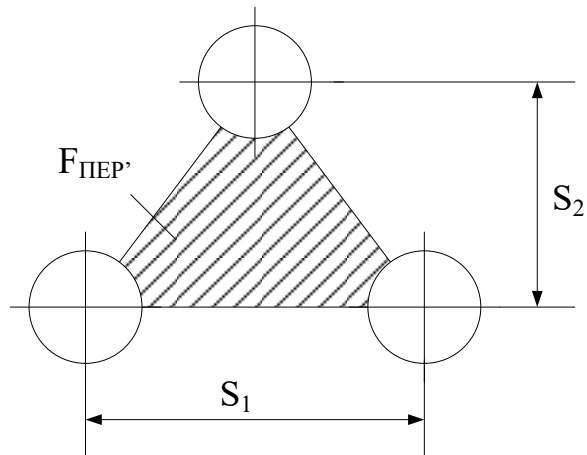


Рис. 4.4. Схематичне розміщення труб та розміри між ними.

Визначаємо кількість труб, що припадають на центральний горизонтальний ряд, використовуючи формулу:

$$n_{\text{ТР.1}} = \frac{D_{\text{КОЖ}}}{(d_{\text{ТР.ЗОВН.}} + \frac{1}{2} \cdot (S_1 - d_{\text{ТР.ЗОВН.}}))} = \frac{1,5}{0,008 + \frac{1}{2} \cdot (0,013 - 0,008)} = 157,9 \text{ шт} \quad (4.2)$$

Приймаємо $n_{\text{ТР.1}} = 158$ шт

Обчислюємо загальне число рядів труб (включаючи центральний горизонтальний ряд), шт.:

$$n_{\text{Р}} = \frac{0,5 \cdot D_{\text{КОЖ}}}{S_2} = \frac{0,5 \cdot 1,5}{0,011} = 68,18 \text{ шт} \quad (4.3)$$

Приймаємо $n_{\text{Р}} = 67$ шт, оскільки кількість рядів повинна бути непарною, і округлення виконуємо вниз.

Щоб визначити повну кількість труб у трубному пучку, необхідно просумувати число труб у кожному ряду, коригуючи (зменшуючи на одиницю) у разі потреби. Формула для цього розрахунку являє собою суму двох арифметичних прогресій:

$$N_{\text{ТР.}} = \frac{n_{\text{ТР.1}} + n_{\text{ТР.2}}}{2} \cdot (d + 1) + \frac{(n_{\text{ТР.1}} - 1) + n_{\text{ТР.2}}}{2} \cdot d, \quad (4.4)$$

де d – кількість членів арифметичної прогресії, рівна:

$$d = \frac{n_{\text{P}} - 1}{2} = \frac{67 - 1}{2} = 33 \text{ шт}, \quad (4.5)$$

$$n_{\text{TP.2}} = n_{\text{TP.1}} - d = 158 - 33 = 125 \text{ шт} \quad (4.6)$$

Тоді отримаємо:

$$N_{\text{TP.}} = \frac{158 + 125}{2} \cdot (33 + 1) + \frac{(158 - 1) + 125}{2} \cdot 33 = 9464 \text{ шт} \quad (4.7)$$

Розраховуємо об'ємну витрату першого теплоносія (повітря) та другого теплоносія (води):

- повітря:

$$G_{1\text{V}} = \frac{G_{1\text{M}}}{\rho_1 \cdot 3600} = \frac{101000}{1,165 \cdot 3600} = 24,08 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right), \quad (4.8)$$

- вода:

$$G_{2\text{V}} = \frac{G_{2\text{M}}}{\rho_2 \cdot 3600} = \frac{16000}{999,7 \cdot 3600} = 4,446 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^3/\text{с)} \quad (4.9)$$

Обчислюємо кількість теплоти, переданої від повітря до води:

$$Q_1 = G_{M1} \cdot C_{P1} \cdot (t'_1 - t''_1) = \frac{101000}{3600} \cdot 1,005 \cdot (33 - 25) = 225,6 \text{ (кВт)}, \quad (4.10)$$

де G_{M1} - масова витрата повітря, $G_{M1} = 28,05 \text{ кг/с}$;

C_{P1} - теплоємність повітря, $C_{P1} = 1,005 \text{ кДж/(кг } ^\circ\text{C)}$;

t'_1 – температура повітря на вході до теплообмінника, $t'_1 = 33 \text{ } ^\circ\text{C}$;

t_1'' - температура повітря на виході з теплообмінника, $t_1'' = 25$ °С.

Розраховуємо t_2'' за виразом:

$$t_2'' = \frac{Q_1}{G_{M2} \cdot C_{P2}} = \frac{225,6}{4,44 \cdot 4,182} = 12,1 \text{ °С} \quad (4.11)$$

Приймаємо $t_2'' = 12$ °С.

1. Визначаємо швидкість руху повітря, м/с

$$W_1 = \frac{G_{1V}}{F_{\text{ПЕР}1}}, \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right), \quad (4.12)$$

де $F_{\text{ПЕР}1}$ - площа перерізу міжтрубного каналу, м²:

$$F_{\text{ПЕР}1} = \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{КОЖ}}^2}{4} \right) - N_{\text{ТР}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ТР.ЗОВН}}^2}{4}, \quad (4.13)$$

$$F_{\text{ПЕР}1} = \left(\frac{3,14 \cdot 1,5^2}{4} \right) - 9464 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,008^2}{4} = 1,291 \text{ (м)}. \quad (4.14)$$

Після підстановки значень отримаємо:

$$W_1 = \frac{24,08}{1,291} = 18,65 \text{ (м/с)}. \quad (4.15)$$

2. Розраховуємо число Рейнольдса:

$$Re_1 = \frac{w_1 \cdot d_{\text{ЕКВ.1}}}{\nu_1}, \quad (4.16)$$

де $d_{\text{ЕКВ.1}}$ – еквівалентний діаметр трубного пучка, м²:

$$d_{\text{ЕКВ.1}} = \frac{4 \cdot F'_{\text{ПЕР.1}}}{P_{\text{ПЕР}}}, \quad (4.17)$$

де $F'_{\text{ПЕР.1}}$ - площа перерізу міжтрубного простору на трубній дошці, м²:

$$F'_{\text{ПЕР.1}} = \frac{S_1 \cdot S_2}{2} - 0,5 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ТР.ЗОВН.}}^2}{4}, \quad (4.18)$$

$$F'_{\text{ПЕР.1}} = \frac{0,013 \cdot 0,011}{2} - 0,5 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,008^2}{4} = 4,638 \cdot 10^{-5} (\text{м}^2), \quad (4.19)$$

$P_{\text{ПЕР}}$ – периметр, що обмежує міжтрубний простір на площині трубної дошки, м:

$$P_{\text{ПЕР}} = 3 \cdot (S_1 - d_{\text{ТР.ЗОВН.}}) + \frac{\pi \cdot d_{\text{ТР.ЗОВН.}}}{2}, \quad (4.20)$$

$$P_{\text{ПЕР}} = 3 \cdot (0,013 - 0,008) + \frac{3,14 \cdot 0,008}{2} = 0,028 (\text{м}) \quad (4.21)$$

Діаметр, еквівалентний трубному пучку, становитиме:

$$d_{\text{ЕКВ.1}} = \frac{4 \cdot 4,638 \cdot 10^{-5}}{0,013} = 0,014 (\text{м}). \quad (4.22)$$

Розрахуємо число Рейнольдса:

$$Re_1 = \frac{18,65 \cdot 0,011}{15,11 \cdot 10^{-6}} = 13577 \quad (4.23)$$

Порівняємо отриманий результат із критичним значенням им:

$$Re_1 = 13577 > Re_{\text{кр}} = 2300. \quad (4.24)$$

Таким чином, оскільки розраховане число Рейнольдса перевищує критичне, рух повітря є турбулентним.

3. Визначаємо число Нуссельта, враховуючи турбулентний режим руху газу:

$$Nu_1 = 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} = 0,021 \cdot 13577^{0,8} \cdot 0,713^{0,43} = 36,753. \quad (4.25)$$

4. Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі, що стосується повітряного потоку:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_{\text{ЕКВ.1}}} = \frac{36,753 \cdot 0,0257}{0,011} = 85,87 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}} \right). \quad (4.26)$$

5. Обчислюємо швидкість потоку другого теплоносія, м/с:

$$W_2 = \frac{G_{2v}}{F_{\text{ПЕР.2}}}, \quad (4.27)$$

де $F_{\text{ПЕР.2}}$ - площа поперечного перерізу міжтрубного каналу, м²:

$$F_{\text{ПЕР.2}} = N_{\text{тр}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ТР.ВН}}^2}{4}, \quad (4.28)$$

$$F_{\text{ПЕР.2}} = 9464 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,006^2}{4} = 0,268 \text{ (м)} \quad (4.29)$$

Після підстановки значень отримаємо:

$$W_2 = \frac{4,45 \cdot 10^{-3}}{0,268} = 0,017 \text{ (м/с)}. \quad (4.30)$$

6. Визначаємо число Рейнольдса:

$$Re_2 = \frac{w_2 \cdot d_{\text{ТР.ВН.}}}{\nu_2} = \frac{0,017 \cdot 0,006}{1,307 \cdot 10^{-6}} = 78,05. \quad (4.31)$$

Оскільки розраховане число Рейнольдса нижче критичного, режим руху рідини є ламінарним.

7. Визначаємо число Нуссельта, використовуючи формулу для ламінарного потоку рідини:

$$Nu_2 = 0,66 \cdot Re_2^{0,5} \cdot Pr_2^{0,43} = 0,66 \cdot 78,05^{0,5} \cdot 7,01^{0,43} = 13,47. \quad (4.32)$$

8. Визначаємо величину коефіцієнта теплообміну:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_{\text{ТР.ВН.}}} = \frac{13,47 \cdot 0,574}{0,006} = 1288,63 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}} \right). \quad (4.33)$$

9. Визначаємо загальний коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ТР}}}{\lambda_{\text{ТР}}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{85,87} + \frac{0,001}{0,4} + \frac{1}{1288,63}} = 67 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}} \right). \quad (4.34)$$

10. Визначаємо величину ефективного коефіцієнта теплопередачі:

$$K_{\text{ЕФ}} = 0,8 \cdot K = 0,8 \cdot 67 = 53,6 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}} \right). \quad (4.35)$$

11. Знаходимо площу теплообмінної поверхні пучка:

$$F_{\text{Пуч}} = \frac{Q_1}{K_{\text{ЕФ}} \cdot \Delta T_{\text{ЛОГ}}}, (\text{м}^2). \quad (4.36)$$

де $\Delta T_{\text{ЛОГ}}$ - значення середньологарифмічної температури, °C:

$$\Delta T_{\text{ЛОГ}} = \frac{\Delta T_{\text{МАХ}} - \Delta T_{\text{МИН}}}{\ln \frac{\Delta T_{\text{МАХ}}}{\Delta T_{\text{МИН}}}}, \quad (4.37)$$

де $\Delta T_{\text{МАХ}}$ – максимальні температурні межі, що досягаються в теплообмінному апараті, °С:

$$\Delta T_{\text{МАХ}} = t'_1 - t'_2 = 33 - 5 = 28(^\circ\text{C}); \quad (4.38)$$

де $\Delta T_{\text{МИН}}$ – мінімальні температурні межі, що реєструються в теплообмінному апараті, °С:

$$\Delta T_{\text{МИН}} = t''_1 - t''_2 = 25 - 12 = 13(^\circ\text{C}). \quad (4.39)$$

Після підстановки значень отримаємо:

$$\Delta T_{\text{ЛОГ}} = \frac{28-13}{\ln \frac{28}{13}} = 19,55(^\circ\text{C}). \quad (4.40)$$

Тоді:

$$F_{\text{ПУЧ}} = \frac{225,6 \cdot 10^3}{53,6 \cdot 19,55} = 215,29(\text{м}^2) \quad (4.41)$$

12. Визначаємо довжину кожної труби, м:

$$L_{\text{ТР}} = \frac{F_{\text{ПУЧ}}}{N_{\text{ТР}} \cdot \pi \cdot d_{\text{ТР.ЗОВН.}}} = \frac{215,29}{9464 \cdot 3,14 \cdot 0,008} = 0,905(\text{м}). \quad (4.42)$$

4.3. Гідравлічний розрахунок

Для розрахунку сумарних втрат напору використовується така формула:

$$\Delta P = \Delta p_{\text{М}} + \Delta p_{\text{Т}}, \quad (4.43)$$

де Δp_M – місцеві гідравлічні втрати, спричинені звуженнями, розширеннями та поворотами труб, Па:

$$\Delta p_M = \xi_M \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2}, \quad (4.44)$$

де ξ_M – коефіцієнт місцевих втрат;

Δp_T – Втрати тиску (напору) на тертя вздовж трубопроводу, Па:

$$\Delta p_T = \xi_T \cdot \frac{L_{TP}}{d_{ЕКВ.}} \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2}, \quad (4.45)$$

де ξ_T – коефіцієнт тертя обчислюється за такою формулою:

Для умов ламінарного потоку:

$$\xi_T = \frac{64}{Re} \quad (4.46)$$

Для умов турбулентного потоку:

$$\xi_T = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \quad (4.47)$$

Гідравлічні втрати для повітря та води розраховуємо окремо.

Для повітря враховуємо втрати на вході та виході з міжтрубного простору:

$$\xi_{M1} = 1,5 + 1,5 = 3,0, \quad (4.48)$$

$$\Delta p_{M1} = \xi_{M1} \cdot \frac{\rho_1 \cdot W_1^2}{2} = 3,0 \cdot \frac{1,165 \cdot 8,604^2}{2} = 129,356 \text{ Па} \quad (4.49)$$

Враховуючи турбулентний режим течії, то:

$$\xi_{T1} = 0,3164 \cdot Re_1^{-0,25} = 0,3164 \cdot 6196^{-0,25} = 0,026, \quad (4.50)$$

$$\Delta p_{T1} = \xi_{T1} \cdot \frac{L_{TP}}{d_{EKB.1}} \cdot \frac{\rho_1 \cdot W_1^2}{2} = 0,026 \cdot \frac{1,48}{0,011} \cdot \frac{1,165 \cdot 8,604^2}{2} = 146,366 \text{ Па}, \quad (4.51)$$

$$\Delta P_1 = \Delta p_{M1} + \Delta p_{T1} = 129,356 + 146,366 = 275,722 \text{ Па} \quad (4.52)$$

Для води: враховуємо втрати при вході в трубний простір і виході з нього, а також опір вхідної та вихідної камер.

$$\xi_{M2} = 1,0 + 1,0 + 1,5 + 1,5 = 5,0, \quad (4.53)$$

$$\Delta p_{M2} = \xi_{M2} \cdot \frac{\rho_2 \cdot W_2^2}{2} = 5,0 \cdot \frac{999,7 \cdot 0,017^2}{2} = 0,69 \text{ Па} \quad (4.54)$$

Враховуючи ламінарний режим течії, то:

$$\xi_{T2} = \frac{64}{Re_2} = \frac{64}{76,269} = 0,839, \quad (4.55)$$

$$\Delta p_{T2} = \xi_{T2} \cdot \frac{L_{TP}}{d_{TP.ВН.}} \cdot \frac{\rho_2 \cdot W_2^2}{2} = 0,839 \cdot \frac{3,66}{0,008} \cdot \frac{999,7 \cdot 0,017^2}{2} = 19,998 \text{ Па}, \quad (4.56)$$

$$\Delta P_2 = \Delta p_{M2} + \Delta p_{T2} = 0,69 + 19,998 = 20,678 \text{ Па} \quad (4.57)$$

Для визначення потужності вентилятора (Вт) використовуємо такий вираз:

$$P_{H1} = \frac{G_{1V} \cdot \Delta P_1}{\eta_{H1}}, \quad (4.58)$$

де η_{H1} – коефіцієнт корисної дії (ККД) вентилятора, $\eta_{H1} = 0,8$.

Після підстановки значень отримаємо:

$$P_{H1} = \frac{11,11 \cdot 275,722 \cdot 10^{-3}}{0,8} = 4,46 \text{ (кВт)}. \quad (4.59)$$

Потужність насоса, Вт:

$$P_{H2} = \frac{G_{2v} \cdot \Delta P_2}{\eta_{H2}}, \quad (4.60)$$

де η_{H2} – коефіцієнт корисної дії (ККД) насоса, $\eta_{H1} = 0,9$.

$$P_{H2} = \frac{4,446 \cdot 10^{-3} \cdot 20,678 \cdot 10^{-3}}{0,9} = 0,102 \text{ (кВт)}. \quad (4.61)$$

РОЗДІЛ 5

ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

5.1. Узагальнення результатів розрахунків систем опалення та вентиляції

Проведені розрахунки систем опалення та вентиляції свинарника-відгодівельника на 430 голів дали змогу визначити необхідні параметри обладнання, яке забезпечує підтримання оптимального мікроклімату в приміщенні протягом року. Сформована система енергопостачання базується на поєднанні теплових і вентиляційних процесів, що сприяє ефективному використанню енергії та стабільним умовам утримання тварин.

Розрахункова теплова потужність системи опалення становить 257 кВт, однак завдяки встановленню регенеративного теплообмінника, який повертає 225,6 кВт вторинного тепла, необхідна додаткова теплова енергія для підтримання мікроклімату зменшується до 31,4 кВт. Це значно знижує навантаження на джерело тепlopостачання та підвищує загальну енергоефективність системи.

Для забезпечення потреб свинарника у холодний період року передбачається використання когенераційної установки, яка одночасно виробляє теплову та електричну енергію. Необхідна потужність установки визначена з урахуванням споживання енергії системами опалення, вентиляції та циркуляції теплоносія:

- Теплова потужність: близько 31,4 кВт (після рекуперації тепла);
- Електрична потужність: близько 3,18 кВт, що покриває потреби вентиляторів і насосів системи.

5.2. Критерії вибору когенераційної установки

Вибір когенераційної установки є одним із ключових етапів формування ефективної системи енергопостачання тваринницького комплексу. Основною метою застосування когенераційних технологій є забезпечення одночасного виробництва теплової та електричної енергії з максимально можливим коефіцієнтом корисного використання палива. При цьому важливим завданням є досягнення енергетичної автономності господарства та зменшення його залежності від зовнішніх джерел постачання енергії.

До основних критеріїв, що визначають вибір типу та параметрів когенераційної установки, належать:

Енергетичні потреби об'єкта. Когенераційна установка повинна забезпечувати покриття базових потреб свинарника-відгодівельника в тепловій енергії для опалення, вентиляції, підігріву води, а також електричній енергії для технологічного обладнання, освітлення та систем автоматики. Визначальним параметром є співвідношення теплового та електричного навантаження, яке має бути максимально наближеним до співвідношення виробітку когенераційної установки.

Тип палива та його доступність. Умови експлуатації господарства передбачають можливість використання як природного газу, так і біогазу, отриманого з відходів тваринництва. Тому при виборі установки необхідно враховувати її адаптованість до роботи на конкретному типі палива або здатність до роботи на змішаному паливі.

Надійність та ремонтпридатність обладнання. Для забезпечення безперебійного енергопостачання тваринницького комплексу установка має характеризуватись високим рівнем надійності, можливістю тривалої безперервної роботи, а також наявністю сервісної підтримки та запасних частин на території України.

Можливість інтеграції з існуючими системами. Вибір установки повинен враховувати можливість її підключення до існуючих мереж теплопостачання та електропостачання комплексу, з урахуванням гідравлічних та електричних характеристик системи.

Таким чином, оптимальна когенераційна установка для свинарника-відгодівельника повинна забезпечувати баланс між тепловим і електричним навантаженнями, мати високу паливну ефективність, працювати на доступному виді палива, бути екологічно безпечною та економічно доцільною. Подальший аналіз можливих варіантів когенераційних установок дозволить обрати найбільш раціональну модель для конкретних умов господарства.

5.3. Аналіз можливих варіантів когенераційних установок

У сучасних умовах підвищених вимог до енергоефективності та екологічної безпеки виробництва питання вибору оптимальної когенераційної установки (КГУ) для тваринницьких комплексів набуває особливого значення. Залежно від типу первинного енергоресурсу, технологічних параметрів і особливостей експлуатації, доцільним є розгляд кількох варіантів когенераційних установок.

Одним із найбільш перспективних напрямів для аграрного сектору є біогазові когенераційні установки. Її робота ґрунтується на процесі анаеробного зброджування — тобто переробки гною та інших органічних решток без доступу повітря. У результаті цього процесу утворюється біогаз, який складається переважно з метану (50–70 %) і вуглекислого газу.

Отриманий біогаз подається на когенераційну установку, де використовується як паливо для двигуна внутрішнього згорання. Двигун приводить у дію генератор, який виробляє електроенергію. Водночас теплота, що утворюється під час роботи двигуна, не втрачається — вона використовується для опалення приміщень ферми, підігріву води або підтримання необхідної температури у біогазовому реакторі.

Перевага біогазової установки полягає в тому, що вона дозволяє господарству стати більш енергонезалежним. Усі відходи, які раніше потрібно було утилізувати, тепер перетворюються на цінний енергетичний ресурс.

Єдиним недоліком можна вважати відносно високу початкову вартість обладнання та необхідність постійного контролю процесу ферментації. Проте в довгостроковій перспективі установка окупається завдяки економії на паливі та електроенергії, а також завдяки можливості продавати надлишки електроенергії в мережу.

Іншим поширеним типом є газові когенераційні установки, що працюють на природному газі або зрідженому вуглеводневому паливі. Газова когенераційна установка — це ефективна енергетична система, яка виробляє одночасно електричну та теплову енергію, використовуючи природний або зріджений газ як паливо. В її основі лежить двигун внутрішнього згорання або газова турбіна, які обертають генератор для виробництва електроенергії. Тепло, що утворюється під час роботи двигуна, не викидається в атмосферу, а відбирається через систему теплообміну й використовується для опалення будівель, підігріву води або технологічних потреб.

Перевага газової когенераційної установки полягає у високому коефіцієнті корисного використання палива — він може сягати 85–90 %, що набагато перевищує ефективність звичайних систем, де електроенергія і тепло виробляються окремо. Таке обладнання забезпечує стабільне та безперебійне постачання енергії, адже природний газ є надійним і прогнозованим джерелом.

Для свинарника або будь-якого іншого тваринницького комплексу газова когенераційна установка може повністю покрити потреби у теплі для опалення, вентиляції та підігріву води, а також забезпечити електроенергією усі системи життєзабезпечення — освітлення, автоматику, вентиляцію, насоси тощо. При цьому, якщо виробляється надлишок електроенергії, його можна передавати у загальну мережу.

Ще однією перевагою є простота експлуатації — газові установки не потребують складної системи підготовки палива, як у випадку з біогазом, і можуть працювати в автоматичному режимі з мінімальним обслуговуванням.

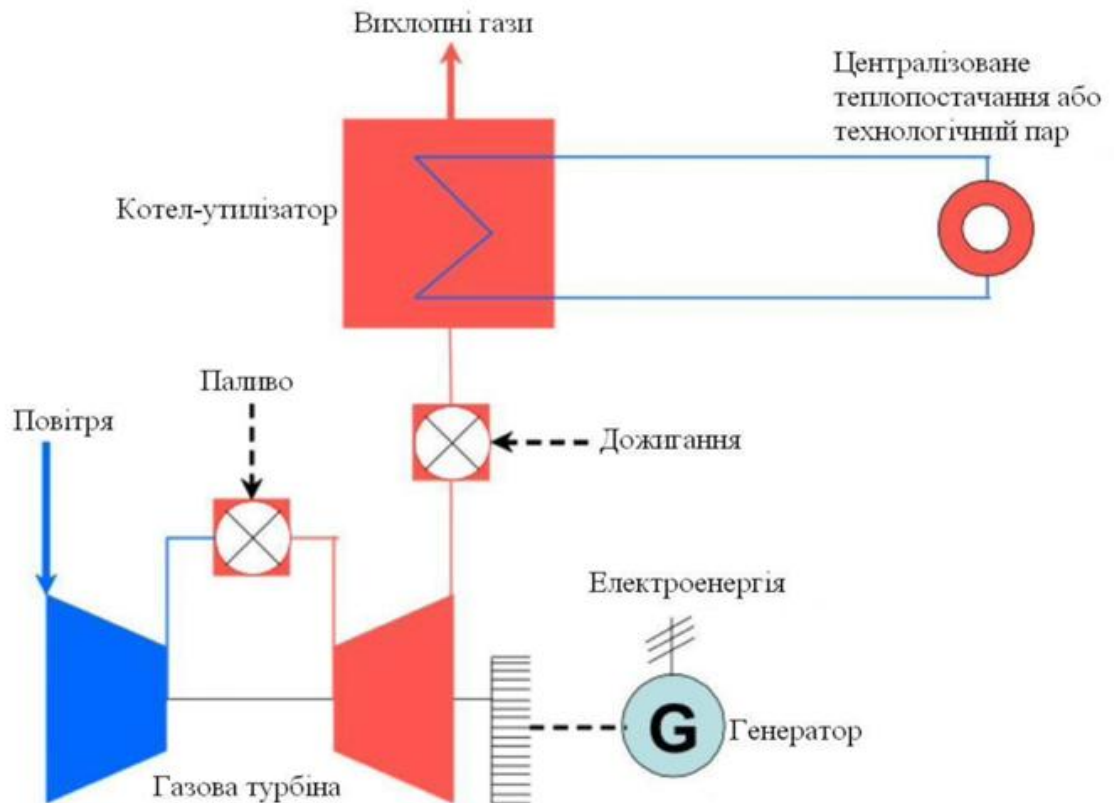


Рис. 5.1. Схема газової когенераційної установки

Також можливим варіантом є дизельні когенераційні установки, що використовуються як резервні або автономні джерела енергії. Вони мають високу надійність і здатність швидко запускатися, однак характеризуються підвищеним рівнем шуму, викидів шкідливих речовин та значними експлуатаційними витратами.

Окрему увагу заслуговують мікротурбінні когенераційні системи, які відзначаються компактністю, низьким рівнем шуму та можливістю використання різних видів палива (природний газ, біогаз, водень). Проте їхня вартість залишається відносно високою, а електричний ККД — нижчим порівняно з поршневыми установками.

5.4. Вибір оптимальної когенераційної установки.

У сучасних системах енергопостачання тваринницьких комплексів доцільним є використання когенераційних технологій, які забезпечують одночасне виробництво електричної та теплової енергії. Такий підхід дозволяє значно підвищити енергоефективність об'єкта, знизити витрати на паливо та зменшити викиди шкідливих речовин у довкілля.

При виборі когенераційної установки враховуються такі критерії:

- стабільність споживання енергії протягом року;
- можливість інтеграції з існуючими системами опалення та вентиляції;
- наявність та вид доступного палива;
- показники ефективності та надійності обладнання.

З урахуванням цих факторів для енергопостачання свинарника-відгодівельника ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» обрано когенераційну установку Micro 30, яка відповідає вимогам щодо рівня теплового навантаження, економічності та екологічності.



Рис. 5.2. Tedom Micro 30

Таблиця 5.1

Характеристика обраної когенераційної установки

Тип когенераційної установки	Електрична потужність, кВт	Максимальна теплова потужність, кВт	Загальний коефіцієнт корисної дії, %
Micro 30	20	48,8	103,2

Когенераційна установка Micro 30 належить до мікро-ТЕЦ (міні-ТЕЦ) і призначена для забезпечення невеликих об'єктів — таких як фермерські господарства, тепличні комплекси, свинарники, невеликі промислові об'єкти — одночасно тепловою та електричною енергією. Установка працює на природному газі.

Когенераційні установки серії Micro мають загальну ефективність понад 95%. Основний вклад вносить генератор з водяним охолодженням. У разі використання додаткового конденсаційного теплообмінника ефективність досягає понад 100%.

Компактні розміри та низька потреба в просторі дозволяють встановлення установки навіть в умовах обмеженого простору і непровітрюваних приміщеннях. Завдяки поворотному розподільчому щиту блоки проходять через більшість дверей, що дозволяє легко встановлювати їх в існуючих будівлях.

Шумозахисний кожух, що легко відкривається, забезпечує легкий доступ до всіх компонентів установки. Ця особливість зменшує час, необхідний для можливого сервісного втручання, що позитивно впливає на його ціну.



Рис. 5.3. Ілюстрація когенераційної установки Micro 30

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження, розрахунок та техніко-економічне обґрунтування системи енергопостачання свинарника-відгодівельника на 430 голів, що функціонує на базі когенераційних технологій із використанням регенеративного теплообмінника. Основною метою роботи було підвищення енергоефективності тваринницького об'єкта за рахунок раціонального використання теплових і електричних ресурсів, а також зменшення експлуатаційних витрат і негативного впливу на довкілля.

У результаті розрахунків системи опалення та вентиляції визначено, що для забезпечення оптимального мікроклімату у свинарнику необхідно підтримувати сумарну теплову потужність 257 кВт. Для реалізації цієї потужності обрано 79 водяних калориферів SALDA AVS 100, кожен з яких має теплову потужність 3,27 кВт, що забезпечує рівномірне прогрівання повітря по всій площі приміщення та стабільність температурного режиму навіть у холодний період року.

Система вентиляції спроектована з урахуванням необхідного обсягу повітрообміну 16 м³/год, що реалізується за допомогою 14 вентиляторів типу Shuft CFK 250 Max. Їх сумарна встановлена електрична потужність становить 3,18 кВт. Така комбінація обладнання гарантує ефективне видалення надлишкової вологи, газів і тепла, забезпечуючи комфортні умови для утримання тварин і підтримання санітарно-гігієнічних норм.

Важливим елементом системи енергозабезпечення є регенеративний теплообмінник, який забезпечує часткове повернення теплової енергії з витяжного повітря у припливне. Розрахункова величина відновленого тепла становить 225,6 кВт, що дозволяє зменшити реальні теплові втрати до 31,4 кВт. Таким чином, завдяки використанню рекуперації суттєво підвищується загальна енергоефективність системи та скорочується споживання палива.

Для забезпечення енергетичних потреб свинарника запропоновано встановлення когенераційної установки типу TEDOM Micro 30, яка одночасно виробляє теплову та електричну енергію. Теплова потужність цієї установки становить 48,8 кВт, а електрична — 20 кВт, що повністю покриває потреби об'єкта в енергоресурсах, з урахуванням відновленого тепла від регенератора. Установка TEDOM Micro 30 є оптимальним рішенням для малих фермерських господарств завдяки високому коефіцієнту корисної дії, надійності та можливості безперервної роботи протягом усього року.

Таким чином, розроблена система енергопостачання свинарника-відгодівельника є комплексним, енергоефективним та екологічно безпечним рішенням, що забезпечує раціональне використання енергетичних ресурсів. Отримані результати можуть бути використані для проектування аналогічних систем у тваринницьких господарствах України з метою зниження енергоспоживання та впровадження сучасних технологій когенерації у сільському господарстві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Енергоефективні технології в аграрному секторі України. – Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2019.
2. Беляєв Н.М., Козирський В.В. Теплоенергетика в агропромисловому комплексі. – Київ: НУБіП України, 2016.
3. Андрощук Л. М. Мікроклімат тваринницьких приміщень : навч. посіб. — Київ : НУБіП України, 2020.
4. Сахно В.П., Кучерявий В.Г. Вентиляція тваринницьких приміщень: навч. посібник. – Київ: НУБіП України, 2015.
5. Мельник О.О. Теплотехнічні розрахунки енергетичних систем: навч. посібник. – Львів: ЛНУ, 2020.
6. Поляков, В.П., Основи проектування систем опалення, вентиляції та кондиціонування. — К.: Каравела, 2016.
7. Дудар І. О., Савчук М. В. Мікроклімат виробничих приміщень у тваринництві : навч. посіб. — Київ : Освіта України, 2021.
8. Калініченко О. О., Гуменюк М. І. Когенераційні та тригенераційні енергетичні установки: теорія і практика. — Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2018.
9. Тарасенко, В.В., Енергетичний менеджмент та енергоаудит у сільському господарстві. — Харків: ХНАУ, 2019.
10. Мельник О.О. Теплотехнічні розрахунки енергетичних систем: навч. посібник. – Львів: ЛНУ, 2020.
11. Шевченко, О.М., Енергозбереження в аграрному секторі України. — Київ: НУБіП України, 2020.
12. Долінський А. А., Басок Б. І. Енергоефективні системи теплопостачання. — Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2017.
13. Тарасенко, В.В., Енергетичний менеджмент та енергоаудит у сільському господарстві. — Харків: ХНАУ, 2019.

14. Поворознюк М. Ю. Енергозабезпечення сільськогосподарських підприємств з використанням відновлюваних джерел енергії. — Вінниця: ВНАУ, 2019.
15. Довідник з теплофізичних властивостей повітря та води / під ред. А.Г. Самойлова. — Київ: Наук. думка, 2010.
16. Плачкова С. Г. Книга 3. Розвиток теплоенергетики та гідроенергетики: [<http://energetika.in.ua/ua/books/book-3>]
17. European Commission. “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Energy Efficiency.” – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022.
18. Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED II). – Official Journal of the European Union, L328/82, 21.12.2018.
19. European Environment Agency (EEA). “Cogeneration and District Heating – European Analysis.” – Copenhagen: EEA Report No 6/2020.
20. Samer, M. “Towards the Integration of Renewable Energy in Livestock Buildings.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 45, 2015, p.
21. Козирський В. В., Беляєв Н. М. Енергетичні системи аграрного виробництва. — Київ: НУБіП України, 2018.
22. Fiala, M., & Vacenetti, J. “Energy and Environmental Performance of Energy Conversion Systems for Livestock Farms.” Journal of Cleaner Production, Vol. 112, 2016, p.
23. Van't Klooster, C. E., Heetkamp, M. J. W. Energy Requirements of Livestock Buildings. — Livestock Production Science, Vol. 67, 2017.
24. International Energy Agency (IEA). Combined Heat and Power: Evaluating the Benefits of Greater Global Investment. — Paris: IEA, 2020.
25. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. — Київ: Мінрегіон України, 2013.
26. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Опалення, вентиляція та кондиціонування.

- 27.Методичні рекомендації з проектування систем вентиляції та опалення тваринницьких приміщень / НУБіП України, кафедра енергетики. — Київ, 2020.
- 28.Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу» від 05.04.2005 № 2509-IV.
- 29.Технічна документація когенераційної установки TEDOM Micro 30: [<https://ua.tedom.com/ua/kogeneracijni-ustanovki/prirodnijj-gaz/>]
- 30.Вентиляційного обладнання Shuft CFK 250 Max: [https://vozduh.com.ua/catalog/kanalnye_ventilyatory/kruglyy-kanalnyy-ventilyator-shuft-cfk-250-max.html?srsltid=AfmBOopI_G7j9Q7Cq3ANJrL10MJFkCwaDRtOdQ7W9THnNgJ0RIJngch-]
- 31.Технічний каталог водяних калориферів: [<https://ventbazar.ua/uk/nagrevatel-vodyanoi-salda-avs-100/>]