

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко – технологічний факультет

ПОГОДЖЕНО
Декан механіко-технологічного
факультету

_____ Братішко В.В.
(підпис) (ПІБ)
“ ___ ” _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
кафедра охорони праці та біотехнічних
систем у тваринництві

_____ Хмельовський В.С.
(підпис) (ПІБ)
“ ___ ” _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему «ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ТА ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ
ВИПАРНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИ УТРИМАННІ КОРІВ»**

Спеціальність – 208 «Агроінженерія»
Освітня програма – Агроінженерія
Орієнтація освітньої програми – освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., с.н.с. _____ В.В. Братішко
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник магістерської роботи

_____ О.О.Заболотько
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав

_____ Д.В. Гаврилюка
.....(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Механіко – технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
кафедра охорони праці та біотехнічних
систем у тваринництві

д.т.н., проф. _____ Хмельовський В.С.
(підпис) (ПІБ)
“ ___ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту

Гаврилюку Дмитру Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність – 208 «Агроінженерія»
Освітня програма – Агроінженерія
Орієнтація освітньої програми – освітньо-професійна
(код і назва)

Тема магістерської роботи: Обґрунтування процесу та параметрів системи
випарного охолодження при утриманні корів.

затверджена наказом ректора НУБіП України від “13” Листопада 2025р. № 2038-с №6
Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру _14.11.2025 року
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи

Перелік питань, які потрібно розробити:

Перелік графічних документів (за потреби) _____

Дата видачі завдання “ _____ ” _____ 20__ р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ О.О. З аболотько
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

Д.В. Гаврилюк

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота – «Обґрунтування процесу та параметрів системи випарного охолодження при утриманні корів» Містить пояснювальну записку, яка складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Пояснювальна записка містить 55 сторінок друкованого тексту, 10 рисунків, 19 таблиць, додатки та 52 літературних джерела.

Метою роботи є підвищення продуктивності тварин шляхом покращення параметрів мікроклімату.

У роботі розглянуто та проаналізовано сучасні засоби для підтримки сталих параметрів вологості та температури на тваринницьких фермах.

Проведено аналіз теоретичних основ системи випарного охолодження. Розроблена схема експериментальної установки та наведені результати випробувань. Наведено аналіз виробничих небезпек при роботі обладнання. Проведена порівняльна характеристика економічної ефективності запропонованих технічних рішень.

ключові слова: КОРОВА, ЗАСОБИ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТВАРИН, КОНДЕНСАЦІЯ, ВИПАРНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ, МІКРОКЛІМАТ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1. Аналіз систем та засобів конденсаційного випаровування при утриманні корів.....	<u>7</u>
1.1. Характеристика господарства.....	7
1.2 Вплив теплового стресу на ВРХ.....	10
1.3 Процес конденсаційного випаровування	12
1.4 Аналіз систем конденсаційного випаровування.....	15
РОЗДІЛ 2 Обґрунтування процесу та параметрів систем конденсаційного випаровування при утриманні корів	17
2.1 Аналіз систем для підтримки мікроклімату.....	17
2.2 Система Rehau Nea Smart 2.0	20
2.3 Типи вентиляційних установок	25
2.4 Типи систем охолодження	27
РОЗДІЛ 3 Дослідження процесу та параметрів системи випарного охолодження при утриманні корів.....	<u>31</u>
3.1 Мета та завдання дослідження	31
3.2. Методика проведення досліджень	32
3.3 Експериментальні дослідження процесу випарного охолодження ...	33
3.4 Оцінка ефективності системи	37
3.5 Моделювання процесу випарного охолодження.....	39
Розділ 4 Економічна оцінка.....	<u>47</u>
4.1 Загальна оцінка ефективності.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	49

ВСТУП

Галузь тваринництва відіграє значну роль в сільському господарстві та є важливою складовою продовольчої безпеки країни. В сучасному світі основним напрямком розвитку є впровадження високотехнологічних систем які сприяють підвищенню продуктивності в тій чи іншій сферах діяльності.

Сучасне тваринництво розвивається в умовах зростання вимог до продуктивності та якості продукції, підвищення рівня енергоефективності виробництва й дотримання стандартів добробуту тварин. Одним із параметрів, що впливає на фізіологічний стан і продуктивність великої рогатої худоби, є мікроклімат у приміщеннях де розміщується ВРХ. Перегрів організму корів у літній період призводить до зниження споживання корму, зменшення надоїв, порушення репродуктивних функцій і відповідно загального зниження економічної ефективності господарства, що утримує тварин.

Одним із перспективних напрямів створення мікроклімату є застосування систем випарного охолодження, які дозволяють ефективно підтримувати потрібну температуру повітря в тваринницьких приміщеннях при відносно низьких енерговитратах. Принцип їх дії базується на фізичному процесі випаровування води, завдяки якому відводиться тепло із повітряного середовища.

В Україні питання впровадження енергоощадних систем мікроклімату набуває особливої актуальності оскільки спостерігається значна зміна клімату, підвищення середньорічних температур і зростання вартості енергоносіїв. Однак ефективність роботи випарних систем залежить від повітря, конструктивних рішень і режимів експлуатації. Тому наукове обґрунтування процесу та параметрів системи випарного охолодження при утриманні корів є актуальним завданням, яке має як теоретичне, так і практичне значення.

Метою даної роботи є обґрунтування процесу та визначення оптимальних параметрів системи випарного охолодження повітря у приміщеннях для утримання корів, що забезпечує створення комфортних мікрокліматичних умов і підвищення продуктивності тварин при мінімальних енерговитратах.

Об'єктом дослідження є процес охолодження повітря у приміщеннях для утримання корів. Предметом дослідження – параметри та ефективність роботи системи випарного охолодження. Наукова новизна роботи полягає у встановленні взаємозв'язку між параметрами випарного охолодження, мікрокліматичними умовами приміщення та показниками теплового комфорту тварин. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розроблених рекомендацій для проектування та оптимізації систем мікроклімату на молочно-товарних фермах, що сприятиме підвищенню продуктивності тварин і зниженню енергоспоживання.

РОЗДІЛ 1. Аналіз систем та засобів конденсаційного випаровування при утриманні корів.

1.1. Характеристика господарства

ТОВ СП «НІБУЛОН» — це одне з провідних аграрних підприємств України, яке здійснює діяльність у сфері виробництва, зберігання та переробки сільськогосподарської продукції. Господарство поєднує сучасні технології, високу культуру землеробства та раціональну організацію виробництва. Основною метою діяльності є отримання високоякісної сільськогосподарської продукції та забезпечення продовольчої безпеки країни.

Господарство розташоване у центральній частині України, має вигідне географічне розташування та зручну логістичну інфраструктуру. Господарство займається вирощуванням зернових, технічних культур і розведенням великої рогатої худоби. Загальна площа земельних угідь становить близько 85 000 га, з яких більшу частину становлять рілля та сіножаті.

Таблиця 1.1.

Земельні ресурси господарства

Вид угідь	Площа, га	Частка, %
Рілля	70 000	82.4
Сіножаті	5 000	5.9
Пасовища	6 000	7.1
Ліси та інші землі	4 000	4.6

Рослинництво є провідною галуззю у структурі виробництва господарства. Основними культурами є пшениця, кукурудза, соняшник, соя та ячмінь. Господарство активно впроваджує інтенсивні технології вирощування, системи точного землеробства та сучасну сівозміну.

Таблиця 1.2.

Структура посівних площ господарства

Культура	Площа, га	Урожайність, ц/га
Пшениця озима	25 000	65
Кукурудза	20 000	95
Соняшник	15 000	32
Соя	10 000	28
Ячмінь ярий	5 000	45

Таблиця 1.3.

Урожайність основних культур за 2022 – 2024 р.

Культура	2022 р.	2023 р.	2024 р.
Пшениця озима	60	63	65
Кукурудза	88	91	95
Соняшник	30	31	32
Соя	26	27	28
Ячмінь ярий	42	44	45

Внаслідок змін ринкової кон'юнктури, зростання виробничих витрат і кадрових проблем у 2024 році підприємство було змушене переглянути структуру свого аграрного комплексу та скоротити напрям тваринництва. Незважаючи на це, «НІБУЛОН» залишається прикладом раціонального ведення агробізнесу, у якому навіть тваринницькі підрозділи протягом багатьох років демонстрували високу продуктивність і відповідність сучасним стандартам утримання тварин.

Таблиця 1.4.

Поголів'я тварин

Вид тварин	Кількість, гол.	Продуктивність
Велика рогата худоба	2000	6500 кг молока на корову
Свині	3500	110 кг середня жива маса
Птиця	12000	280ць на несучку

Господарство має сучасний машинно-тракторний парк, який включає трактори, комбайни, посівну техніку та обприскувачі провідних світових брендів (John Deere, Claas, Lemken, Horsch тощо).

Таблиця 1.5.

Технічне забезпечення

Тип техніки	Кількість, од.	Марка
Трактори	45	John Deere, Case IH
Комбайни	20	Claas Lexion
Сівалки	15	Horsch, Amazone
Обприскувачі	10	John Deere
Плуги, борони	30	Lemken, Köckerling

Економічна ефективність діяльності господарства залишається стабільною завдяки поєднанню ефективного менеджменту, високої культури виробництва та сучасних технологій.

Таблиця 1.6.

Економічні показники

Показник	2022 р.	2023 р.	2024 р.
Виручка, млн грн	1 250	1 370	1 500
Собівартість, млн грн	980	1 050	1 120
Прибуток, млн грн	270	320	380
Рентабельність, %	21.6	23.5	25.3

ТОВ СП «НІБУЛОН» є одним із лідерів аграрного сектору України, що демонструє стабільне зростання виробництва та ефективне використання наявних ресурсів. Господарство поєднує сучасні технології з традиційним досвідом у рослинництві та тваринництві, забезпечуючи високу продуктивність і конкурентоспроможність.

1.2. Вплив теплового стресу на ВРХ

Тепловий стрес — це стан організму, який виникає внаслідок перевищення температури навколишнього середовища над фізіологічною здатністю тварини відводити надлишкове тепло. Для корів комфортна температура повітря становить від +5 до +20 °С, а при показниках вище +25 °С починають проявлятися перші ознаки стресу.

При тепловому стресі організм тварини активує захисні механізми терморегуляції: посилюється потовиділення, частішає дихання, збільшується частота серцевих скорочень. Проте тривале перебування у таких умовах виснажує фізіологічні резерви, призводить до порушення обміну речовин та

пригнічення основних функцій організму. На рис.1.1 зображено вплив теплового стресу на корів в залежності від температури та вологості повітря.

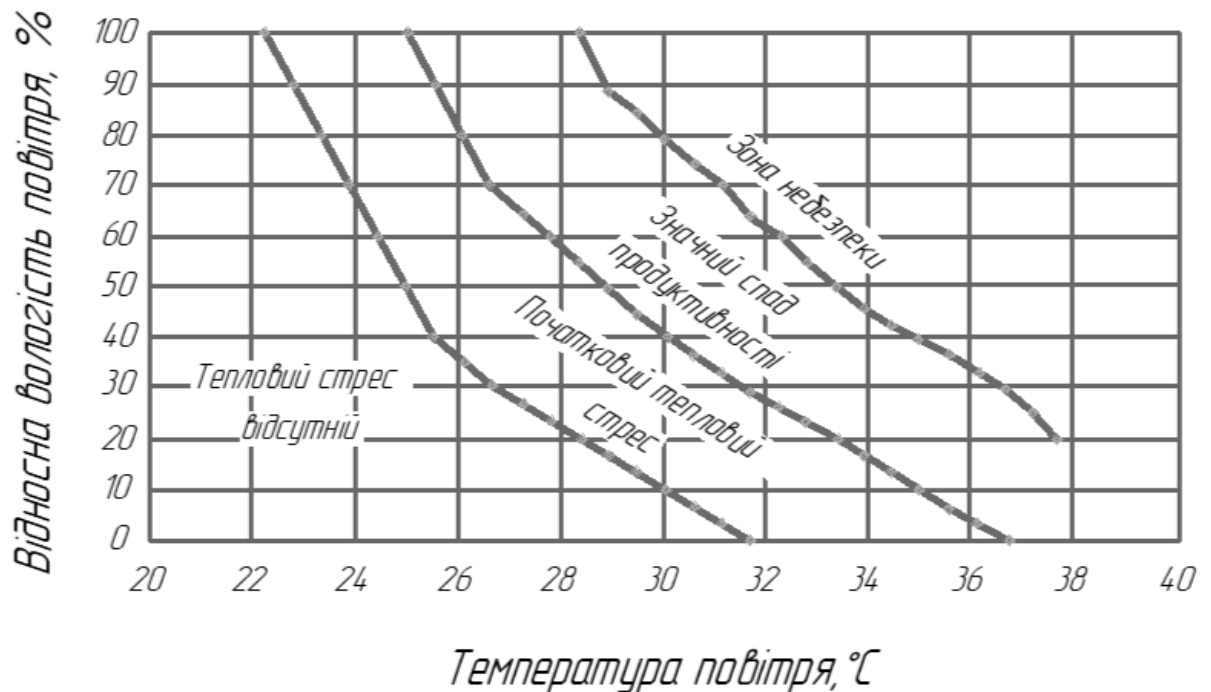


Рис.1.1 Вплив теплового стресу на корів.

Одним із найпомітніших наслідків теплового стресу є зниження молочної продуктивності. Під впливом високих температур корови споживають на 10–30 % менше корму (Рис.1.2), що призводить до дефіциту енергії для синтезу молока. Зазвичай надої знижуються на 10–25 %, а іноді — до 40 %.

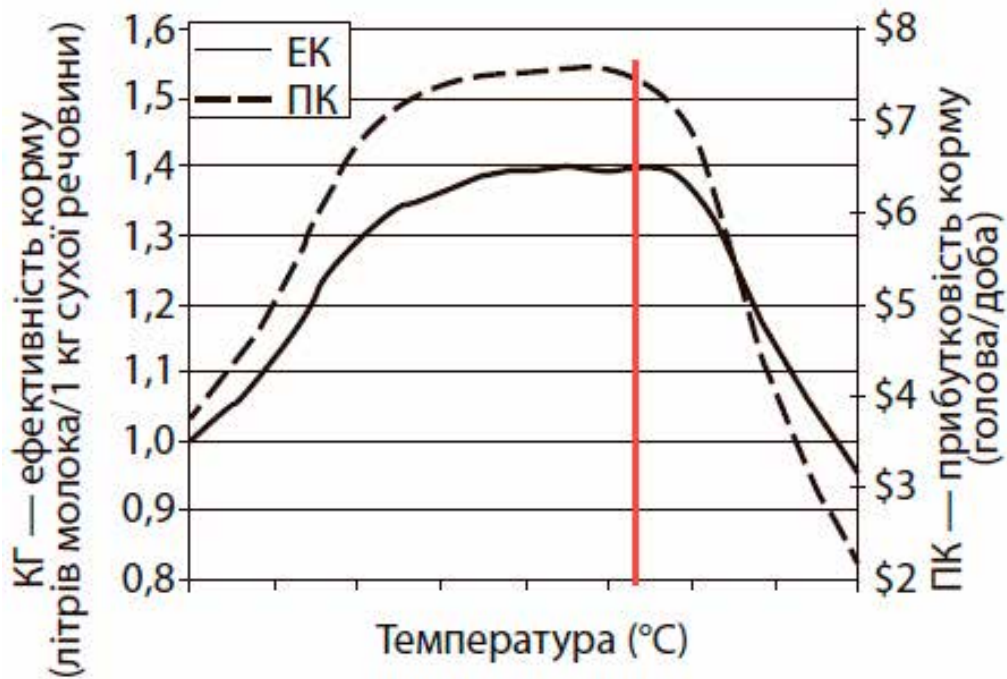


Рис.1.2 Вплив температури на ефективність годівлі

Окрім кількісних втрат, спостерігаються також якісні зміни складу молока: зменшується вміст жиру, білка та лактози. Це пояснюється зміщенням енергетичного балансу на підтримку життєвих процесів замість продукції молока.

Варто зазначити, що навіть після зниження температури наслідки теплового стресу можуть зберігатися протягом кількох днів або тижнів. Організму тварини потрібен час для відновлення нормальної роботи травної системи та метаболічних процесів.

Економічні збитки від теплового стресу в молочному скотарстві можуть бути значними. Вони пов'язані не лише зі зниженням надоїв, але й з падінням запліднюваності, підвищенням смертності телят, збільшенням витрат на ветеринарне обслуговування та охолодження приміщень.

1.3 Процес конденсаційного випаровування.

Процес конденсаційного випаровування полягає у теплообміні між парами та рідиною у системі, де одночасно відбуваються два взаємопов'язані процеси — випаровування (перехід рідини у пару) і конденсація (зворотний процес).

Основна особливість полягає у тому, що теплота, яка виділяється під час конденсації пари, використовується для випаровування іншої частини рідини.

Таким чином, система працює в замкненому тепловому циклі, що суттєво зменшує втрати енергії. Коефіцієнт теплового використання у таких системах може досягати 0,8–0,95, що робить їх набагато ефективнішими за традиційні випарні установки.

Фізично процес можна описати рівнянням теплового балансу:

$$Q_{\text{вип}} = Q_{\text{кон}} - Q_{\text{втр}}_{\text{ат}}$$

Де, $Q_{\text{вип}}$ — теплота, необхідна для випаровування;

$Q_{\text{кон}}$ — теплота, що виділяється при конденсації пари;

$Q_{\text{втр}}_{\text{ат}}$ — теплові втрати в системі.

Якщо система добре ізольована, то $Q_{\text{вип}} \approx Q_{\text{кон}}$, що і визначає високу ефективність процесу.

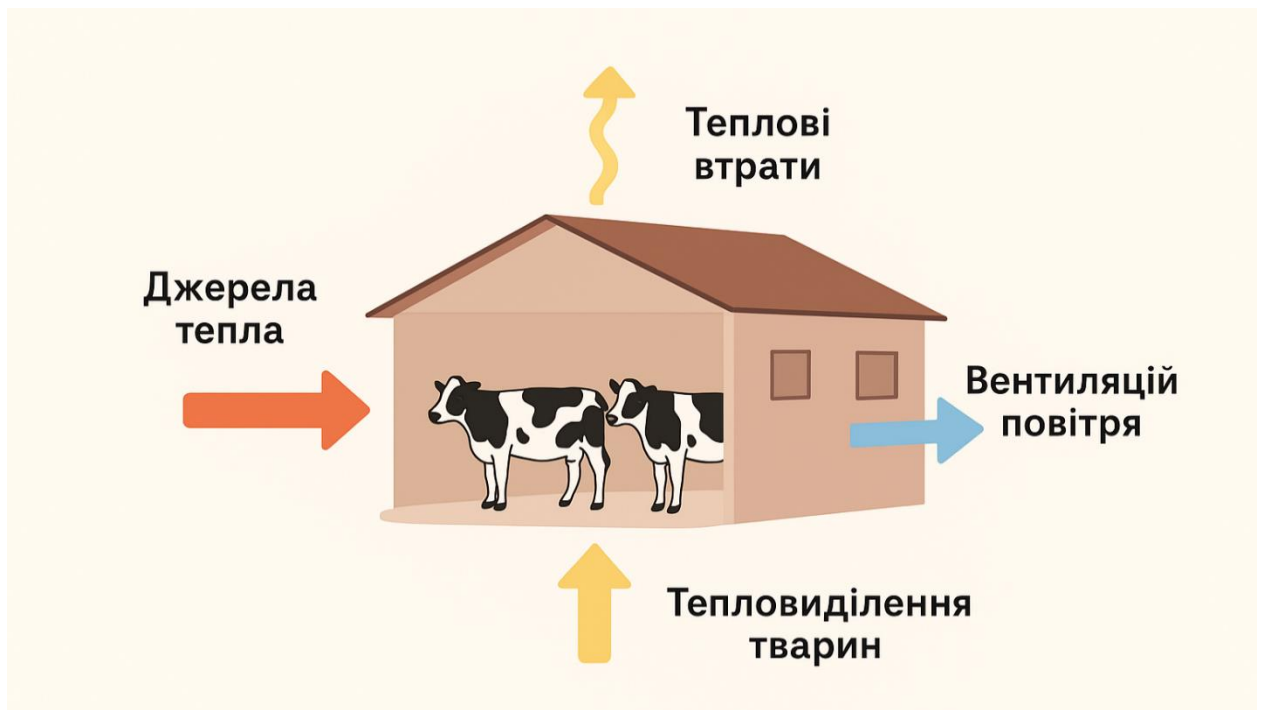


Рис. 1.3 Тепловий баланс корівника.

Конденсаційне випаровування реалізується у спеціальних апаратах — випарних установках. Найпоширенішими є:

Однокорпусні системи — прості у конструкції, використовуються при невеликих об'ємах рідини.

Багатокорпусні випарні системи (МВУ) — теплота пари, що конденсується в одному корпусі, використовується для нагріву рідини в наступному. Це дозволяє скоротити енерговитрати у 3–5 разів.

Системи з тепловими насосами або компресійним перетиском пари (MVR) — тут пара стискається компресором, її температура підвищується, і вона знову використовується для нагріву тієї ж рідини.

У сільському господарстві, зокрема у корівниках, подібні принципи застосовуються в системах випарного охолодження, де вологе повітря проходить через зону випаровування, а конденсаційний ефект використовується для регенерації тепла в холодний період року.

Головною перевагою систем конденсаційного випаровування є економія енергії. Завдяки повторному використанню теплоти конденсації знижується споживання пари або електроенергії.

Основні технічні переваги:

- зниження експлуатаційних витрат;
- можливість утилізації вторинного тепла;
- підвищення ступеня концентрування розчинів;
- зменшення навантаження на холодильні установки;
- екологічна безпечність процесу.

До недоліків належать:

- складність конструкції багатокорпусних систем;
- потреба у точному регулюванні температурних і тискових режимів;
- значні капітальні витрати на встановлення теплообмінного обладнання.

Системи конденсаційного випаровування можуть використовуватися для:

- стабілізації вологості та температури повітря;
- підтримання комфортного мікроклімату в літній період;

- рекуперації тепла видиху та випаровувальної вологи у зимовий період;
- зниження енергоспоживання вентиляційних систем.

Прикладом є системи, де повітря з високою вологістю подається через теплообмінник, де пара конденсується, передаючи тепло припливному потоку. Це дозволяє зменшити витрати на обігрів приміщення до 30–40%.

Сучасні тенденції вказують на необхідність автоматизації процесів конденсаційного випаровування. Використання датчиків температури, вологості, тиску та витрати, інтегрованих у систему управління, дозволяє оптимізувати режими роботи, мінімізувати втрати та забезпечити стабільну якість повітря або продукту.

Перспективними є також гібридні системи, які поєднують випарне охолодження, теплові насоси та сонячні колектори. Такі установки особливо ефективні для автономних господарств, що прагнуть зменшити залежність від традиційних енергоносіїв.

1.4 Аналіз систем конденсаційного випаровування.

Типова система конденсаційного випаровування (Таблиця 1.7) для корівників складається з випарного модуля, конденсатора, вентилятора, насосної станції, автоматичної системи керування та датчиків температури й вологості. Вода подається насосом до випарного модуля, де розпилюється через форсунки. Повітря, проходячи через зону насичення вологою, охолоджується на 6–10 °С, після чого надходить у теплообмінник, де осідає надлишкова волога, і подається до тварин.

Ефективність оцінюють коефіцієнтом зниження температури $\eta = (T_{вх} - T_{вих}) / (T_{вх} - T_{м.п.})$. Для конденсаційних систем η може досягати 0.75–0.85, що відповідає зниженню температури на 8–12 °С. Це усуває тепловий стрес і підвищує надої на 10–20 %.

Системи, що застосовуються у тваринництві, поділяють на прямі, непрямі (конденсаційні) та комбіновані. Для умов корівників найоптимальнішими є

конденсаційно-випарні системи, які дозволяють підтримувати температуру повітря 22–25 °С при відносній вологості 60–70 %.

Переваги: зниження температури повітря без підвищення вологості, зменшення теплового стресу, економічність, простота обслуговування. Недоліки: необхідність стабільного водопостачання, зниження ефективності при високій вологості, потреба очищення панелей.

Ефективність оцінюють коефіцієнтом зниження температури

$$\eta = (T_{вх} - T_{вих}) / (T_{вх} - T_{м.п.}).$$

Для конденсаційних систем η може досягати 0.75–0.85, що відповідає зниженню температури на 8–12 °С. Це усуває тепловий стрес і підвищує надої на 10–20 %.

Таблиця 1.7

Елементи конденсаційної системи випаровування.

№	Елемент системи	Функція
1	Випарний модуль	Охолоджує повітря за рахунок випаровування води
2	Конденсатор	Відводить тепло та конденсує вологу
3	Вентилятор	Забезпечує циркуляцію повітря
4	Насосна станція	Подає воду до системи
5	Автоматика	Регулює температуру і вологість
6	Датчики	Контролюють параметри мікроклімату

РОЗДІЛ 2. Обґрунтування процесу та параметрів систем конденсаційного випаровування при утриманні корів

2.1 Аналіз систем для підтримки мікроклімату.

На сучасних тваринницьких фермах за безприв'язного способу утримання, для створення комфорту, використовують систему охолодження стійл – GEA conductive cooling. Система охолодження забезпечує обмін тепла між теплою і холодною поверхнями. Інноваційний принцип GEA conductive cooling використовується в зоні відпочинку тварин для створення більшого комфорту. Теплообмінники з контуром для циркуляції води розміщені під лежачком у зоні, де відпочивають тварини. Відповідно до цієї технології вим'я і нижня частина черева корови виступають як радіатори для постійного охолодження крові, яка циркулює по усьому тілу тварини. GEA conductive cooling ефективно охолоджує тварин у тому місці, де вони проводять найбільше часу – в зоні відпочинку. Це призводить до зниження стресу, створює комфорт і зміцнює здоров'я тварин. Порівняно із традиційними методами охолодження, такими як вентилятори або система водяного випарювального охолодження, яка дозволяє економити до 75 % електроенергії, підігріта вода може використовуватися після додаткового нагріву для різних цілей на фермі.

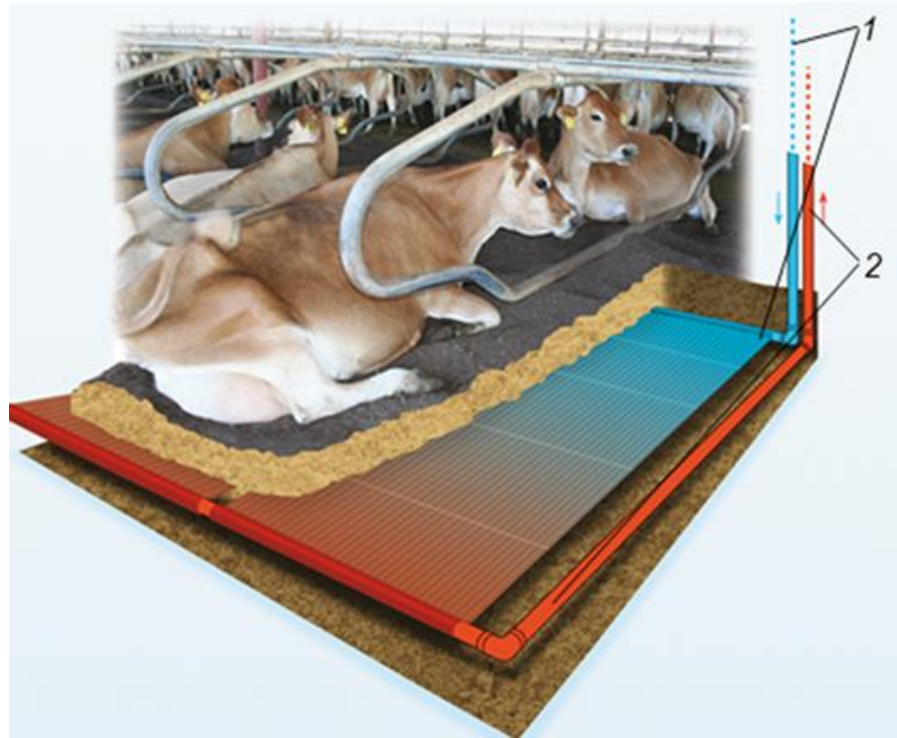


Рис 2.1. Система охолодження стійл GEA conductive cooling

1. Холодна вода.
2. Тепла вода.

Параметри мікроклімату постійно змінюються, т. к. в приміщеннях постійно виділяються ті чи інші шкідливості.

Основними є:

1. Теплота - впливає на зміну температури повітря і відносної вологості;
2. Волога - впливає на зміну температури повітря і відносної вологості;
3. Вуглекислий газ - необхідно видаляти, оскільки шкідливий для здоров'я;

Інші (як правило, технологічні) шкідливості — можуть бути шкідливі для здоров'я.

При розрахунку систем вентиляції і кондиціонування слід враховувати всі ці шкідливості. Однак, основною в них є теплота.

Джерела теплоти в приміщенні поділяються на зовнішні і внутрішні.

До зовнішніх відносяться.

- надходження тепла від сонячної радіації;
- надходження теплоти з інфільтрованим повітрям.

Зовнішні джерела теплоти є найбільш значними в плані обсягів надходжень.

До внутрішніх джерел належать.

— тепловиділення від людей, що знаходяться в приміщенні (кожна людина в процесі життєдіяльності виділяє теплоту, причому, чим активніше вона поводить, тим більше теплоти виділяється);

— тепловиділення від освітлення (кожен освітлювальний прилад, навіть люмінесцентна лампа, виділяє при роботі теплоту);

— тепловиділення від обладнання, що знаходиться в приміщенні (в тому числі — технологічного).

Для правильного забезпечення параметрів мікроклімату необхідно, щоб теплота, що надходить від цих джерел, повністю видалялася з приміщення.

Тварина в процесі життєдіяльності виділяє не тільки тепло, але й вологу і вуглекислий газ. У переважній більшості випадків виділення цих речовин, у порівнянні з виділеннями теплоти, мізерно малі і для їх видалення цілком вистачає провітрювання і природної вентиляції, а розрахунок систем кондиціонування проводиться на вилучення теплоти.

Однак, в деяких випадках, в приміщенні можуть бути присутні значні виділення вологи. У таких випадках необхідно проводити розрахунок систем вентиляції і кондиціонування повітря як на видалення теплоти, так і на видалення вологи і, як основного, вибирати варіант з найбільшим необхідною кількістю повітря, що подається.

Те ж саме можна сказати і про випадки, коли в приміщенні виділяються які-небудь технологічні шкідливості (наприклад, отруйні гази, вибухові речовини тощо).

Норма подачі свіжого повітря для дихання становить 60 м³/год на одну тварину.

Основними завданнями управління мікрокліматом (HVAC) є

- створення і підтримання комфортного мікроклімату в межах будівлі або споруди.
- економія енергії, що витрачається на створення і підтримання мікроклімату.

2.2 Система REHAU NEA SMART 2.0.

Система керування REHAU NEA SMART 2.0 – це сучасна та ефективна система керування променевого опалення та охолодження («тепла підлога», стеля, стіни) з великою кількістю функцій. Вона має модульну структуру, тому цю систему можна налаштувати одразу для декількох систем та підсистем для індивідуального регулювання температури в будівлі, а також для комплексних рішень, що охоплюють до 60 приміщень в ній, включно з інтеграцією осушувачів (див. рис. 1), та взаємодію з іншим інженерним обладнанням. Системою можна зручно керувати за допомогою смартфона, планшета чи з ПК в домі чи за межами дому через мережу LAN / WLAN, що інтегрована в центральні блоки керування одразу в стандартній комплектації. Підключення системи до хмарного сервісу дозволяє користувачеві застосовувати функції оптимізації, аналізу та віддаленого обслуговування. інтерфейс LAN- / WLAN

(вже в стандартній комплектації) для з'єднання системи з роутером та хмарним сервісом

Повністю автоматичний контроль роботи всієї установки.

Стандартне виконання з інтерфейсом LAN / WLAN.

Керування через веб-браузер чи застосунок.

Інтелектуальні функції, що забезпечують високий рівень комфорту та ефективність.

Новий шлюз зв'язку KNX, що дозволяє інтегрувати NEA SMART 2.0 із системами «розумний дім».

Охолодження приміщень комбінованими поверхнями нагрівання / охолодження.

Автоматичне чи ручне перемикання між нагріванням, нейтральним станом та охолодженням.

Контроль оптимальної температури подачі теплоносія до поверхонь нагрівання / охолодження («регулювання температури подачі»).

Висушування приміщень.

За допомогою програм, що працюють «за часом» та функцій, що керують програмним застосунком можна перемикати первинні налаштування кімнатної температури – для опалення та охолодження – поміж комфортною температурою (нормальний режим) та економічною температурою («знижений режим»).

Принцип дії поверхневого охолодження

Підвищення температур у містах та зростання тарифів на енергоносії підштовхують до впровадження альтернативних технологій мікроклімату.

Одним із наявних технічних рішень є поверхнєве (радіантне) охолодження, зокрема стельові, настінні та підлогові рішення, які забезпечують комфорт без потреби в активній подачі охолодженого повітря.

Поверхнєве (радіантне) охолодження — це система, у якій охолодження приміщення відбувається через будівельні конструкції з пониженою температурою (підлога, стеля або стіни), що взаємодіють із внутрішнім середовищем приміщення через випромінювання. В охолоджених конструкціях циркулює холодна вода, яка поглинає надлишкове тепло з приміщення, забезпечуючи комфортний мікроклімат без протягів, шуму і сухого повітря.

У системах поверхнєвого охолодження відсутній процес подачі холодного повітря, натомість вона створює стабільне температурне середовище через випромінювання: охолоджені поверхні «приймають» тепло від предметів, людей та повітря, охолоджуючи їх без відчутної повітряної циркуляції.

Системи з великою активною площею випромінювання забезпечують ефективне охолодження при температурі холодоносія від 15 °С до 17 °С (у поодиноких кейсах — до 14 °С або нижче, за умови надійного контролю «точки роси»), що ідеально підходить для роботи з тепловими насосами. Температура поверхонь у приміщенні зазвичай залишається в межах 18–20 °С, що сприймається комфортно.

Існує два варіанти реалізації стельових систем:

«Мокрий» монтаж — труби закладаються в монолітну плиту або під штукатурку, використовується переважно в новобудовах;

«Сухий» монтаж — стельові панелі з вбудованими трубами, інтегровані в гіпсокартон, які формують готову поверхню для декоративного оздоблення. Такі рішення найчастіше застосовують у реконструкціях або при модернізації приміщень із завершеним інтер'єром.

Стельові панелі забезпечують холодопродуктивність до 65 Вт/м^2 (у TABS-системах із монолітною плитою — до 90 Вт/м^2), забезпечують рівномірний розподіл охолодження по всій площі поверхні та не вимагають монтажу видимих приладів

Оптимальна температура поверхні для комфортного охолодження становить $22\text{--}23 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура холодоносія на старті може бути навіть $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ з поступовим зниженням. Важливо, щоби вся система була відбалансована і працювала в поєднанні з контролем «точки роси».

У типовій квартирі площею близько 100 м^2 була змонтована комбінована система: стельове охолодження в сухому монтажі та стінове охолодження в «мокрому». На етапі проектування виконано розрахунок охолоджувального навантаження приміщення та інсоляційних надходжень, що підтвердило можливість реалізації поверхневого охолодження з урахуванням теплових потоків і без перевантаження системи.

За зовнішньої температури $+31 \text{ }^\circ\text{C}$ у приміщеннях підтримується стабільний режим $+24 \text{ }^\circ\text{C}$. Вода в трубах має температуру $+14 \text{ }^\circ\text{C}$. Система автоматичного регулювання підтримує подачу вище «точки роси» на $1,5\text{--}2 \text{ }^\circ\text{C}$, що повністю виключає появу конденсату.

За 8 місяців експлуатації квартирі площею 100 м^2 загальне споживання електроенергії системи, що працює як на охолодження, так і на опалення, склало лише $1\,554 \text{ кВт}\cdot\text{год}$. Цей показник включає роботу теплового насоса, насосних груп і допоміжного електронагрівача, і дає змогу оцінити ефективність системи в обох режимах.

Системи поверхневого охолодження — це перевірене інженерне рішення, яке забезпечує стабільний комфорт, знижене енергоспоживання та сучасну архітектурну свободу. У поєднанні з автоматикою й вентиляцією вони дають змогу відмовитися від кондиціонерів і радіаторів, залишаючи лише комфорт, естетику та ефективність. Це надійна технологія для житлових і комерційних

об'єктів, що відповідає сучасним вимогам енергоефективності та здорового мікроклімату.

Оскільки всі ми сприймаємо навколишнє середовище по-різному, не існує єдиного визначення комфорту. Однак можливо створити умови в приміщенні, за яких більшість людей почуватимуться добре. Під час планування будівель слід враховувати якість повітря та тепловий комфорт. Тобто концентрацію CO₂, температуру, вологість і рух повітря в приміщенні. Сучасна людина проводить близько двох третин свого життя у приміщенні. Відомо, що якість повітря у приміщенні має великий вплив на наше самопочуття. Щоб забезпечити хорошу якість повітря та приємний мікроклімат у приміщенні в будь-який час, будівлі все частіше оснащуються інтелектуальними системами регулювання мікроклімату. Для забезпечення надійної комунікації між сервомеханізмами та сенсорикою доступні різні системи шин (наприклад, KNX чи BACnet). Також використовуються радіосистеми (включно з ZigBee, Z-Wave, EnOcean та KNX-RF). Вони дають змогу автоматизувати будівлі ретроспективно без потреби у складній кабельній проводці. Система регулювання мікроклімату у приміщенні від GEZE для керованої природної та енергозберігаючої вентиляції доповнює систему віконних приводів та систему димо- та тепловідведення (RWA) GEZE. Системи RWA також можуть бути розширені сенсорикою та елементами управління і можуть бути вбудовані в системи управління будівлею.

Через модуль інтерфейсу KNX IQ GEZE забезпечує просту інтеграцію автоматизованих віконних приводів у оточення KNX для інтелектуальної взаємодії віконних приводів та сенсорики. Інші системи та приводи, що підтримують KNX, або компоненти техніки будівлі, такі як системи захисту від сонця, системи опалення або приладдя для контролю мікроклімату, також можуть бути пов'язані з системою регулювання мікроклімату у приміщенні від GEZE.

Вентиляція має велике значення для створення комфортного та здорового середовища у приміщеннях будь-якого призначення. Вона забезпечує

потрапляння свіжого повітря та видаляє повітря, яке містить в собі вологу, запахи, вуглекислий газ та інші шкідливі речовини. Відсутність циркуляції повітря може призвести до росту бактерій, утворення плісняви та алергенів, які негативно впливають на здоров'я людей у приміщенні. Важливо розуміти які бувають типи вентиляційних систем та як вибрати найбільш ефективну для власного будинку або комерційного приміщення. Принцип функціонування всіх вентиляційних систем полягає на основі переміщення повітря між внутрішнім та зовнішнім середовищем. Основна мета будь-якої вентиляції полягає в забезпеченні свіжого та чистого повітря всередину приміщення та відведення забрудненого повітря. Може бути активною або пасивною. При активному типі використовується вентилятор, пасивний тип працює внаслідок дії природних факторів. Витяжні вентилятори та вентиляційні решітки

Локальні витяжні вентилятори встановлюються у кухні, ванній кімнаті та інших приміщеннях з підвищеним рівнем вологи. Вони ефективно допомагають відвести забруднене повітря та запобігти утворенню конденсату. Прості в установці та експлуатації, але можуть споживати невелику кількість електроенергії. Вентиляційні решітки забезпечують пасивний обмін повітря та декорують витяжні шахти.

Переваги

- Низька вартість: відсутність коштовного обладнання та мінімальні витрати на установку та експлуатацію
- Екологічність: невелике споживання електроенергії
- Просте використання: відсутність потреби у складних налаштуваннях
- Швидке змінення режиму роботи: можливість швидко змінювати інтенсивність вентиляції відкриттям або закриттям вікон, дверей та витяжних вентиляторів відповідно до потреб.

2.3 Типи вентиляційних установок.

Припливно-витяжні установки

Такі системи обладнані рекуперацією тепла та на сьогодні вони є передовим рішенням для ефективного та повноцінного обміну повітря у приміщеннях. Одна установка одночасно забезпечує приплив та видалення повітря. В корпусі установки розміщений рекуператор де ці потоки не змішуються, а взаємодіють між собою. Витяжне повітря з приміщення має більшу температуру ніж припливне. Воно віддає своє тепло через матеріал рекуператора припливному коли проходить через нього.

Переваги

- Висока ефективність: забезпечують постійний та контрольований повітрообмін в усіх приміщеннях
- Енергозбереження: економлять енергію на опаленні, знижуючи витрати на комунальні послуги;
- Очищене повітря: установки обладнані системою фільтрації здатною очищати повітря від пилу, алергенів та інших забруднень.
- Регулювання параметрів повітрообміну: користувач має можливість змінювати продуктивність, температуру та контролювати режими роботи
- Надійність: при виробництві пристроїв використовуються сучасні технології та матеріали для довговічності та ефективності роботи обладнання.

Енергоефективність та використання альтернативних джерел енергії

Сучасні системи вентиляції все більше фокусуються на енергоефективності та використанні альтернативних джерел енергії. Встановлення сонячних панелей або вітрогенераторів для живлення таких інженерних систем може зменшити енергоспоживання та знизити рівень викидів вуглецю.

Нові ЕС-двигуни

Все частіше на ринку пропонують обладнання з вентиляторами нового покоління, які обладнані ЕС-двигунами. Використання електронно-комутованих моторів дозволило зменшити рівень шуму, підвищити продуктивність та ККД. В такому двигуні відсутні щітки та колектор, вони

стійки до зношування та працюють набагато довше. Регулювання продуктивності таких вентиляторів відбувається у всьому діапазоні від 0 до 100%, що дозволяє дуже точно налаштувати систему вентиляції.

Використання нових матеріалів

Вентиляційні установки постійно вдосконалюються завдяки появі нових інноваційних матеріалів. Корпуси агрегатів почали виробляти з поліпропілену, який легкий, знижує рівень шуму, стійкий до корозії та має високу міцність. Нові рекуператори тепла з полімеризованої бумаги стали значним проривом у вентиляційних системах. Ці рекуператори дозволяють передавати не тільки тепло від витяжного повітря припливному, а й ще вологу, що є важливим показником для створення комфорту в холодний період року.

Пристрої для вентиляції одного приміщення

Одним з новітніх рішень у галузі вентиляції є механічні провітрювачі з рекуперацією тепла, які допомагають забезпечити оптимальний повітрообмін для одного приміщення квартири чи офісу. Такі провітрювачі використовують рекуператор для передачі тепла від витяжного повітря до припливного, знижуючи втрати тепла та переміщують в кімнату вже підігріте свіже повітря.

2.4 Типи систем охолодження.

Система охолодження це те, що може стати в нагоді в найрізноманітніших ситуаціях. Ефективних рішень для відводу зайвого тепла дійсно дуже багато, наприклад драйкулер. Ось приклади з життя, де така інформація реально допомагає: Система охолодження це спосіб прибрати зайве тепло з повітря, рідини або обладнання. Тобто – охолодити об'єкт до потрібної температури.

Майже все навколо нас пов'язане з охолодженням: холодильники, кондиціонери, промислові холодильні установки, морозильні камери, чилери, градирні, вентилятори, серверні кімнати і так далі.

Ось як працює система:

1. Повітря або рідина передають тепло холодоагенту.
2. Холодоагент відводить його і скидає назовні.
3. Температура в приміщенні або в процесі знижується.

Типи систем охолодження діляться за принципом роботи і областю застосування.

У побуті найчастіше зустрічаються компресорні і термоелектричні рішення. У промисловості застосовуються водяні, повітряні, випарні, абсорбційні та гібридні конструкції.

Таблиця 2.1

Типи систем охолодження

Тип системи	Де застосовується	Принцип роботи
Повітряне охолодження	Комп'ютери, радіатори, панелі	Вентилятор відводить тепло в повітря
Водяне охолодження	Верстати, чилери, <u>теплообмінники</u>	Вода циркулює і відносить тепло
Компресорна система	Холодильники, морозильники	Холодоагент випаровується і охолоджує
Абсорбційна система	Готелі, виробництво	Працює за рахунок тепла і абсорбції
Випарне охолодження	Градирні, склади	Вода випаровується і охолоджує повітря

Види системи охолодження відрізняються за тим, куди вони віддають тепло.

Якщо це повітря – застосовують вентилятори. Якщо вода – підключають теплообмінники і насоси. В інших випадках тепло може йти в ґрунт або через градирні. Повітряні системи простіші, але гірше справляються в спеку. Рідинні – дорожчі, але стабільніші. А комбіновані рішення дають баланс між ефективністю і гнучкістю.

Нам особливо цікаві гібридні системи. Їх часто використовують в логістиці, на виробництві і в дата-центрах, де навантаження змінюється щогодини.

Види охолодження підбираються залежно від того, що саме потрібно охолодити. Наприклад, холодильні камери для продуктів, кондиціонери для повітря, системи з чилерами для верстатів і виробничих процесів. А для серверних застосовують прецизійні охолоджувачі, які можуть точно підтримувати температуру протягом всього року.

На виробництві ми бачимо такі рішення: рідинне охолодження для реакторів, випарне охолодження для складів, гібридні рішення в агро- і харчовій промисловості.

Що таке система охолодження в плані енергоспоживання? Це джерело постійних витрат. Ось чому важливо розуміти ефективність системи.

Оцінка ефективності системи

Тип системи	COP (коефіцієнт ефективності)	Витрата енергії на 1 кВт холоду
Компресорна	3,0-3,5	0,28-0,33 кВт·год
Абсорбційна	0,6-0,8	вище в 4-5 разів
Випарна	10-12 (по повітрю)	мінімальна витрата

Типи обладнання для систем охолодження

Існує кілька основних рішень, кожне зі своїми перевагами та обмеженнями:

1. Чилери — парокompресорні холодильні машини, основна функція яких — охолодження рідкого середовища;
2. Градирні — системи, які охолоджують теплу воду при використанні навколишнього атмосферного повітря більш низької температури;
3. Теплові насоси — універсальна кліматична техніка, яка залежно від умов може використовуватися і для обігріву приміщень, і для охолодження;
4. Термостати — спеціальні пристрої, призначені для регулювання температури теплоносія;
5. Теплообмінники використовуються для охолодження води або розчинів гліколю;
6. Компактні промислові кондиціонери регулюють температурний режим, мають потужність не нижче 25 кВт.

РОЗДІЛ 3. Дослідження процесу та параметрів системи випарного охолодження при утриманні корів.

3.1 Мета та завдання дослідження.

Раціональні умови мікроклімату у приміщеннях для утримання великої рогатої худоби є одним із ключових чинників, що визначають рівень продуктивності, здоров'я та відтворювальної здатності тварин. У періоди високих температур спостерігається явище теплового стресу, яке призводить до зниження надоїв, погіршення апетиту, порушення водно-сольового балансу та загального фізіологічного стану корів. Традиційні системи вентиляції не завжди забезпечують ефективне зниження температури повітря у тваринницьких приміщеннях, особливо в умовах підвищеної вологості.

Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є застосування систем випарного охолодження, які ґрунтуються на фізичному процесі переходу вологи з рідкої у газоподібну фазу з одночасним відбором теплоти від повітряного потоку. Такі системи дозволяють підтримувати температуру повітря в межах комфортної зони для тварин при відносно невеликих енергетичних витратах.

Мета дослідження полягає у вивченні процесу та визначенні оптимальних параметрів роботи системи випарного охолодження для забезпечення комфортних мікрокліматичних умов у приміщенні для утримання корів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання дослідження:

- Проаналізувати сучасні методи охолодження повітря у тваринницьких приміщеннях та обґрунтувати доцільність використання систем випарного типу.
- Визначити основні параметри, що впливають на ефективність процесу випарного охолодження (температура, відносна вологість, швидкість руху повітря, витрата води).
- Розробити методику проведення експериментальних досліджень із визначення ефективності дії системи в умовах корівника.
- Провести експериментальні вимірювання показників мікроклімату до та після впровадження системи випарного охолодження.
- Проаналізувати вплив параметрів системи охолодження на тепловий стан і поведінку тварин.
- Виконати математичне моделювання процесів тепло- та вологообміну у приміщенні при роботі системи випарного охолодження.

- Визначити оптимальні режими роботи системи, що забезпечують ефективне зниження температури при мінімальних енергетичних та водних витратах.

Реалізація поставлених завдань дозволить отримати практичні рекомендації щодо удосконалення систем мікроклімату у тваринницьких господарствах і підвищення продуктивності молочного скотарства в умовах дії високих температур навколишнього середовища.

3.2 Методика проведення досліджень.

Об'єктом дослідження є процес формування мікроклімату у приміщеннях для утримання великої рогатої худоби за умов дії системи випарного охолодження.

Предметом дослідження виступають закономірності зміни температури, вологості та швидкості руху повітря в корівнику при використанні різних режимів роботи системи охолодження, а також вплив цих параметрів на тепловий стан тварин.

Дослідження проводилися у два етапи:

Підготовчий етап – вибір об'єкта, монтаж системи випарного охолодження, калібрування вимірювального обладнання, визначення точок спостереження.

Експериментальний етап – проведення вимірювань мікрокліматичних параметрів у контрольний період (без охолодження) та дослідний період (з увімкненою системою випарного охолодження).

Схема експерименту передбачала одночасне вимірювання температури, відносної вологості, швидкості руху повітря, витрати води, енергоспоживання системи та поведінкових показників тварин.

Дослідження проводилися в умовах діючого тваринницького господарства в літній період, коли температура зовнішнього повітря коливалася від 26 до 34 °С.

Приміщення для утримання корів — безприв'язного типу, із боковими вентиляційними отворами та системою примусової циркуляції повітря. Система випарного охолодження була змонтована на вхідних отворах вентиляторів і працювала за принципом прямого випаровування.

Кількість дослідних тварин — 20 корів голштинської породи віком 3–5 років, з середньою добовою продуктивністю 22–25 л молока.

Для фіксації параметрів мікроклімату використовувалися:

- цифрові термогігрометри для вимірювання температури та відносної вологості повітря (діапазон 0–60 °С, 0–100 % RH);
- анемометри для визначення швидкості руху повітря (діапазон 0,1–10 м/с);
- витратоміри для контролю подачі води у систему зрошення;
- електролічильники для визначення енергоспоживання системи;
- психрометр для контрольних вимірювань;
- цифровий термометр для вимірювання температури тіла тварин.

Всі прилади проходили попередню перевірку та калібрування відповідно до діючих метрологічних вимог.

Вимірювання здійснювали тричі на добу (о 8:00, 13:00 та 18:00 год) протягом 10 днів у кожному режимі — контрольному та дослідному. Для підвищення достовірності результати усереднювали за трьома повтореннями.

У процесі досліджень контролювали також поведінкові реакції тварин (частоту дихання, активність, час перебування в зоні охолодження).

Паралельно фіксували параметри зовнішнього середовища — температуру та вологість повітря на вулиці, швидкість вітру, сонячну радіацію.

Обробка результатів здійснювалася статистичними методами із застосуванням програмного забезпечення Microsoft Excel та Statistica. Розраховували середні значення параметрів, середньоквадратичні відхилення, коефіцієнти варіації та кореляції між температурою, вологістю, швидкістю повітря та тепловим станом тварин.

Для оцінки ефективності системи використовували показники зниження температури повітря (Δt), зростання відносної вологості ($\Delta \phi$), коефіцієнт ефективності охолодження (η) та питомі енергетичні витрати.

Запропонована методика дослідження дозволяє об'єктивно оцінити вплив параметрів системи випарного охолодження на мікроклімат тваринницьких приміщень і тепловий стан корів, визначити оптимальні режими її роботи та створити основу для подальшого математичного моделювання процесів тепло- та волого обміну.

3.3 Експериментальні дослідження процесу випарного охолодження.

Метою проведення експериментальних досліджень було визначення ефективності роботи системи випарного охолодження у тваринницькому

приміщенні та виявлення впливу основних параметрів її роботи на формування мікроклімату.

Система охолодження складалася з секційного зрошувального блоку з целюлозними панелями типу *cool pad*, через які вентилятори подавали зовнішнє повітря у приміщення. Вода подавалася по замкнутому контуру насосом із резервуара, розташованого біля тваринницького приміщення. Регулювання подачі води здійснювалося автоматично залежно від температури зовнішнього повітря, а швидкість повітряного потоку – зміною обертів вентиляторів.

Під час експерименту досліджували три режими роботи системи:

- Режим I: мінімальна подача води (2 л/хв) і швидкість повітря 2 м/с;
- Режим II: середня подача води (4 л/хв) і швидкість повітря 3 м/с;
- Режим III: максимальна подача води (6 л/хв) і швидкість повітря 4 м/с.

У процесі досліджень проводилося вимірювання температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у контрольний період (без охолодження) та при роботі системи за різних режимів.

Таблиця 3.1

Показники мікроклімату при різних режимах роботи системи випарного охолодження.

Режим	Подача води, л/хв	Швидкість повітря, м/с	Середня температура зовн., °С	Температура в приміщенні, °С	Вологість, %
Без охолодження	–	0,7	33,0	31,8	46
I	2	2,0	33,0	28,2	61
II	4	3,0	33,0	26,5	67
III	6	4,0	33,0	25,8	72

Ефективність оцінюється за коефіцієнтом випарного охолодження:

$$n = \frac{t_{\text{зовн}} - t_{\text{вн}}}{t_{\text{зовн}} - t_{\text{м.т.}}}$$

де:

$t_{\text{зовн}}$ – температура зовнішнього повітря, °С;

$t_{\text{вн}}$ – температура повітря після охолодження, °С;

$t_{\text{м.т.}}$ – температура мокрого термометра, °С (за шкалою психрометра).

Для умов експерименту $t_{\text{м.т.}} = 23,0$ °С.

$$n = \frac{33 - 26,5}{33 - 23} = 0,65$$

Отже, ефективність системи у цьому режимі становить 65 %.

Таблиця 3.2

Режим	$t_{\text{вн}}, \text{°C}$	n
I	28,2	0,48
II	26,5	0,65
III	25,8	0,72

Ентальпія повітря визначається за формулою

$$h = 1,006 * t + d * (2501 + 1,86 * t)$$

де:

t – температура, °С;

d – вологовміст повітря, г водяної пари на 1 кг сухого повітря.

Вологовміст знаходимо з відносної вологості:

$$d = 0,622 * \frac{\varphi * p_{\text{н}}}{P_{\text{атм}} - \varphi * P_{\text{н}}}$$

де:

φ – відносна вологість (у частках);

$p_{\text{н}}$ – тиск насиченої пари при температурі t (кПа);

$P_{\text{атм}}$ – атмосферний тиск (101,3 кПа).

Для $t = 33^\circ\text{C}$, $p_{\text{н}} = 5,0$ кПа, $\varphi = 0,46$:

$$d_{\text{зовн}} = 0,622 * \frac{0,46 * 5}{101,3 - 0,46 * 5} = 0,015$$

Для $t_{\text{вн}} = 26,5^\circ\text{C}$, $\varphi = 0,67$, $p_{\text{н}} = 3,4$ кПа:

$$d_{\text{вн}} = 0,622 * \frac{0,67 * 3,4}{101,3 - 0,67 * 3,4} = 0,014$$

Тоді:

$$h_{\text{зовн}} = 1,006 * 33 + 0,015 * (2501 + 1,86 * 33) = 33,2 + 38,3 = 71,5 \text{ кДж/кг}$$

$$h_{\text{зовн}} = 1,006 * 26 + 0,014 * (2501 + 1,86 * 26) = 26 + 36 = 62,7 \text{ кДж/кг}$$

Зниження ентальпії:

$$\Delta h = h_{\text{зовн}} - h_{\text{вн}} = 71,5 - 62,7 = 8,8 \text{ кДж/кг}$$

Отже, при проходженні через випарний блок повітря охолоджується на 8,8 кДж/кг сухого повітря, що еквівалентно відбору значної кількості теплоти від повітряного потоку.

Теплова потужність охолодження визначається як:

$$Q = L * \rho * \Delta h$$

де:

L – витрата повітря $\text{м}^3/\text{с}$;

ρ – густина повітря ($1,2 \text{ кг/м}^3$);

Δh – зниження ентальпії, кДж/кг.

При витраті повітря $L = 3 \text{ м}^3/\text{с}$:

$$Q = 3 * 1,28 * 8,8 = 31,7 \text{ кВт}$$

Отже, теплова потужність випарного охолодження у режимі II становить близько 32 кВт, що еквівалентно роботі середнього кондиціонера промислового типу при набагато менших енерговитратах.

Масова витрата води на випаровування визначається з рівняння вологообміну:

$$m_v = 3 * 1,2 * (0,014 - 0,015) = -0,0036 \text{ кг/с}$$

Від'ємне значення показує зростання вологості повітря – тобто волога переходить у повітря).

За модулем, це 0,0036 кг/с, або 13 г/с на весь потік, що становить 47 л/год.

Питомі витрати енергії на охолодження визначаються як:

$$E_{\text{пит}} = \frac{P}{Q}$$

де:

P – споживана електрична потужність системи, кВт;

Q – отримана теплова потужність охолодження, кВт.

Для P = 0,55 кВт і Q = 31,7 кВт:

$$E_{\text{пит}} = \frac{0,55}{31,7} = 0,017 \text{ кВт/год}$$

Тобто система витрачає лише 1,7 % електричної енергії від кількості відведеного тепла – що свідчить про високу енергоефективність.

Експериментально встановлено, що за умови роботи системи у режимі II–III:

- температура тіла корів знизилась у середньому на 0,7 °С;
- частота дихання зменшилася з 78 до 52 разів/хв;
- показник теплового комфорту (індекс ТНІ) зменшився з 84 до 73, що відповідає переходу від «теплового стресу» до «комфортної зони».

Індекс теплового комфорту обчислюється за формулою:

$$ТНІ = (1,8t + 32) - (0,55 - 0,0055\varphi) * (1,8t - 26)$$

Для $t = 26,5^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 67\%$

$$ТНІ = (1,8 * 26,5 + 32) - (0,55 - 0,0055 * 67) * (1,8 * 26,5 - 26) = 73$$

3.4 Оцінка ефективності системи.

Встановлено, що застосування системи випарного охолодження забезпечує зниження температури повітря у приміщенні в межах 3,6–6,0 °С залежно від режиму роботи системи. Водночас відносна вологість підвищується на 15–26 %, що сприяє формуванню більш комфортного мікроклімату для корів.

Таблиця 3.3

Зміна параметрів мікроклімату залежно від режиму роботи системи.

Режим	t, °С	Δt, °С	φ, %	Δφ, %	η, %
Без охолодження	31,8	–	46	–	–
I	28,2	3,6	61	+15	48
II	26,5	5,3	67	+21	65
III	25,8	6,0	72	+26	72

Залежність ефективності охолодження від швидкості повітря описується емпіричною формулою:

$$n = 0,18 * v + 0,12 * G_{\omega}$$

де:

n – коефіцієнт ефективності, частки одиниці;

v – швидкість повітря, м/с;

G_{ω} – подача води, л/хв.

Проводимо розрахунок для режиму II:

$$n = 0,18 * 3 + 0,12 * 4 = 0,65$$

Для оцінки рівня теплового стресу побудуємо таблицю температурно - вологісного комфорту (ТНІ):

Таблиця 3.4

Оцінка температурно - вологісного комфорту тварин.

Режим	t, °C	φ, %	ТНІ	Характеристика стану
Без охолодження	31,8	46	84	помірний тепловий стрес
I	28,2	61	78	незначний стрес
II	26,5	67	73	комфортна зона
III	25,8	72	71	комфортна зона

Таким чином, зниження ТНІ на 11–13 одиниць свідчить про усунення теплового навантаження на організм корів.

Енергетична ефективність визначалась за питомими витратами електроенергії на одиницю холоду:

$$E_{\text{пит}} = \frac{P}{Q}$$

де:

P – потужність електроспоживання, кВт;

Q – теплова потужність охолодження, кВт.

Для режиму II:

$$E_{\text{пит}} = \frac{0,55}{31,7} = 0,017 \text{ кВт} * \text{год/кВт холоду}$$

Водоспоживання системи:

$$W = m_{\text{в}} * t$$

де:

$m_{\text{в}}$ – витрата води на випаровування, кг/с;

t – тривалість роботи, с.

Для режиму II:

$$W = 0,0036 * 14400 = 51.8 \text{ кг}$$

Спостереження показали, що після включення системи охолодження:

- частота дихання знизилася з 90 до 63 рухів/хв;
- кількість корів, що стояли біля вентиляторів, зменшилася на 35 %;
- середня тривалість споживання корму зросла на 12 %.

Це свідчить про нормалізацію фізіологічного стану тварин.

3.5 Моделювання процесу випарного охолодження.

Метою моделювання є визначення взаємозв'язку між параметрами повітря (температура, вологість, швидкість руху) та ефективністю системи випарного охолодження з урахуванням тепловиділення від тварин і зовнішніх умов середовища. Математична модель дозволяє прогнозувати мікроклімат у корівнику без проведення тривалих експериментів.

Припустимо:

- швидкість потоку повітря: $\vartheta = 3 \text{ м/с}$;

- площа вихідного отвору: $F = 4 \text{ м}^2$;
- густина повітря: $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$;
- $h_1 = 71,5 \text{ кДж/кг}$, $h_2 = 62,7 \text{ кДж/кг}$.

Тоді масова витрата повітря:

$$m_{\text{пов}} = 1,2 * 4 * 3 = 14,4 \text{ кг/с}$$

Кількість теплоти, що відводиться:

$$Q = 14,4 * (71,5 - 62,7) = 126,7 \text{ кВт}$$

Якщо ефективність системи становить $n = 0,65$, то теплова потужність:

$$Q_{\text{реал}} = 0,65 * 126,7 = 82,4 \text{ кВт}$$

Ця потужність характеризує сумарне охолодження повітря в приміщенні.

Модель зміни температури повітря в приміщенні

Температуру повітря в приміщенні визначимо з рівняння теплового балансу:

$$C_{\text{пов}} = \frac{dT}{dt} = Q_{\text{тв}} - Q_{\text{реал}}$$

де

$C_{\text{пов}}$ – теплоємність повітря в приміщенні, Дж/°С;

$Q_{\text{тв}}$ – сумарне тепловиділення від тварин, Вт.

Для типового приміщення:

$$C_{\text{пов}} = 5,4 * 10^6 \text{ Дж/}^\circ\text{С},$$

$$Q_{\text{тв}} = 65 * 100 = 6500 \text{ Вт}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{6500 - 82400}{5,4 * 10^6} = -0,014 \text{ }^\circ\text{С/с}$$

Отже температура зменшується зі швидкістю 0,014 °С за 1 секунду, тобто за 10 хв зниження температури складе:

$$\Delta T = 0,014 * 600 = 8,4^{\circ}\text{C}$$

3.6 Побудова графіків.

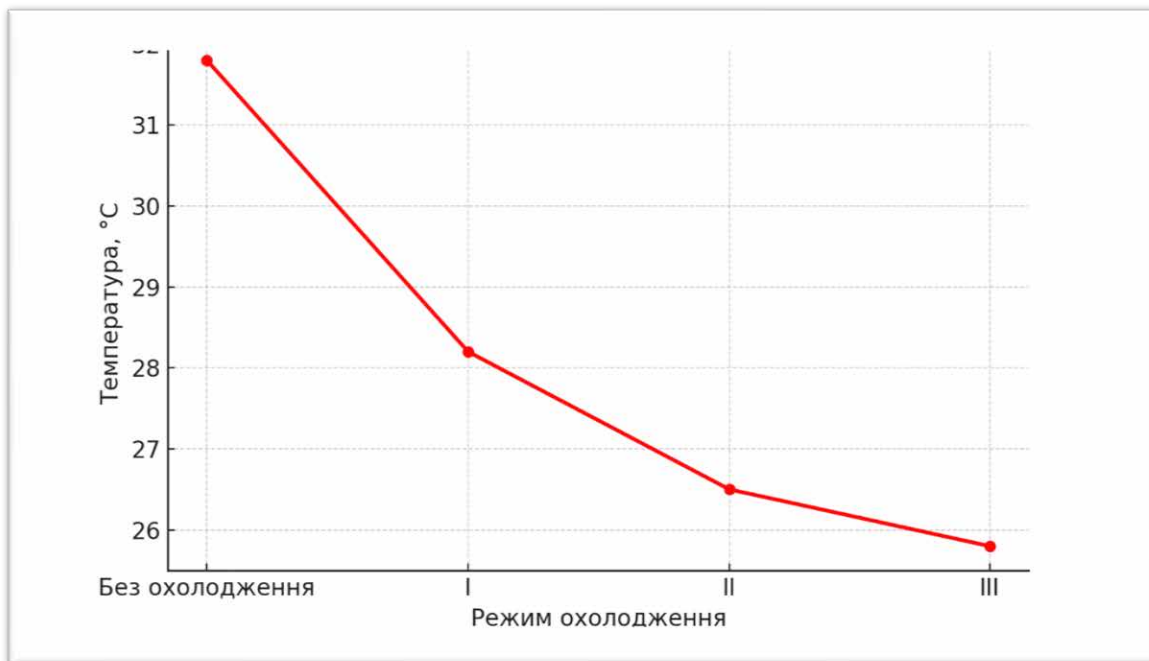


Рис. 3.1 Залежність температури в приміщенні від режиму роботи.

На графіку показано зміну температури повітря в тваринницькому приміщенні при різних режимах роботи системи випарного охолодження:

- без охолодження (природна вентиляція),
- I режим – базова інтенсивність зрошення,
- II режим – підвищена подача води,
- III режим – максимальний режим випарного охолодження.

Із графіка видно, що застосування випарного охолодження суттєво знижує температуру повітря в зоні утримання корів. При максимальному режимі охолодження температура повітря знижується з 31,8 °С (без охолодження) до 25,8 °С, що становить ефект зниження на 6 °С.

Таке зниження температури забезпечує комфортніші мікрокліматичні умови, зменшуючи ризик теплового стресу тварин у літній період.

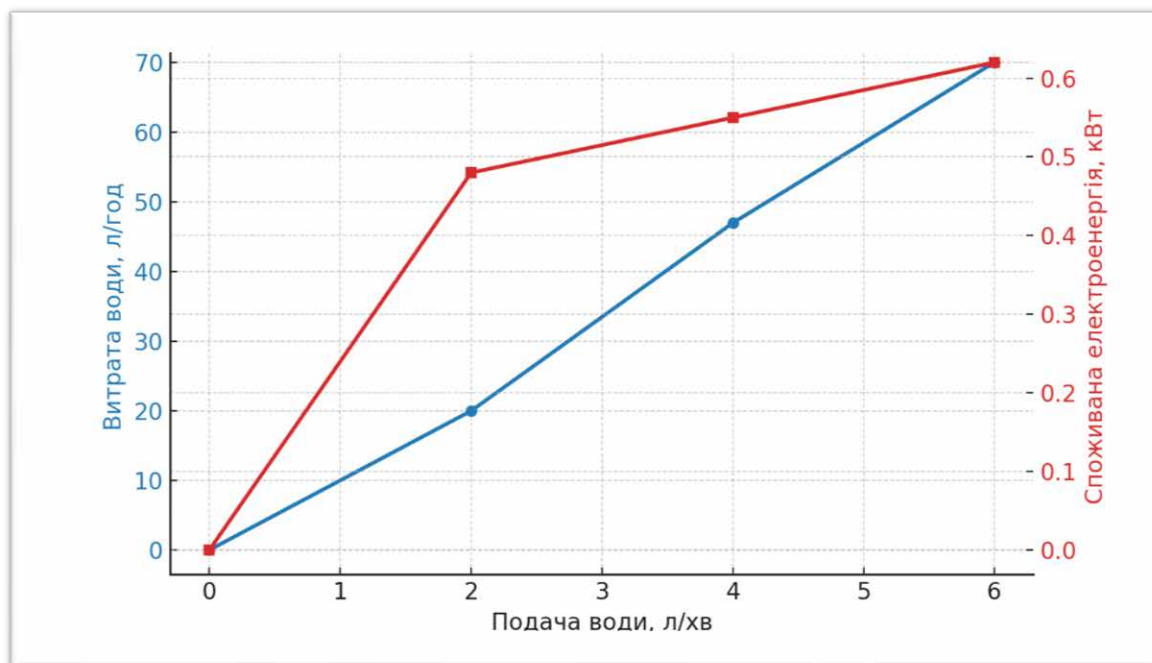
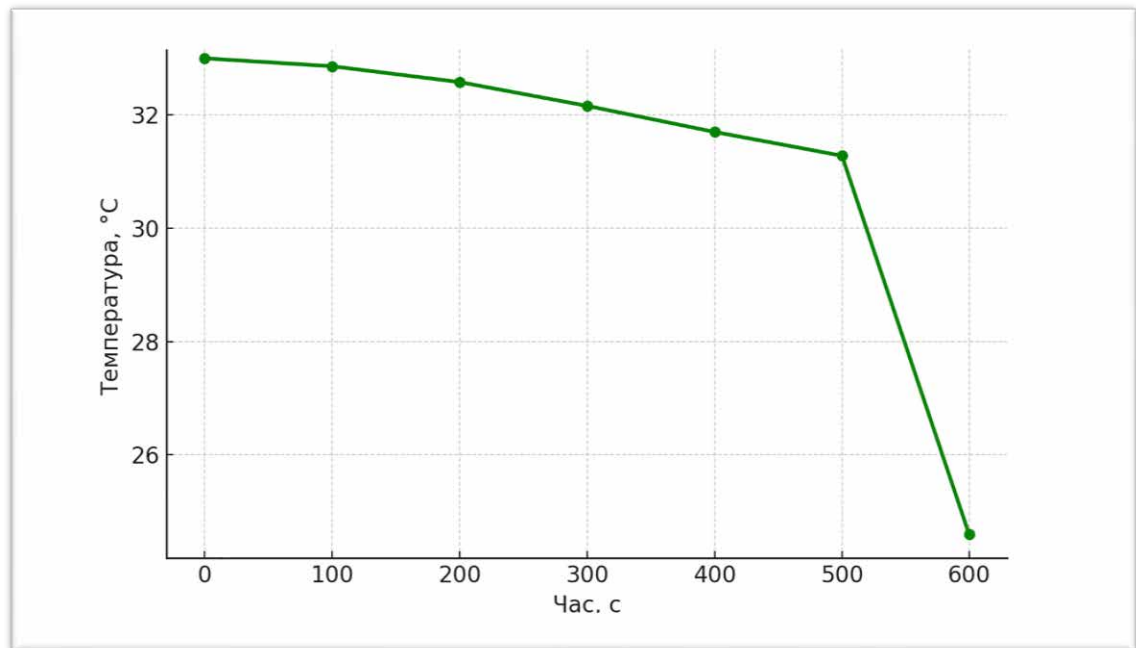


Рис. 3.2 Залежність витрати води від інтенсивності подачі.

На даному графіку наведено залежність витрати води та споживаної електроенергії системою охолодження від інтенсивності зрошення (літри за хвилину).

При збільшенні подачі води з 2 до 6 л/хв витрата води на систему зростає майже лінійно — від 20 до 70 л/год, що пов'язано зі збільшенням кількості розпиленних форсунками крапель.

Споживання електроенергії при цьому також зростає, але менш інтенсивно — з 0,48 до 0,62 кВт, що свідчить про енергоефективність процесу: підвищення інтенсивності охолодження досягається в основному за рахунок випаровування, а не зростання енергоспоживання.



3.3 Залежність температури від часу роботи установки.

На графіку представлено зміну температури повітря в приміщенні протягом 10 хвилин роботи системи випарного охолодження. На початку процесу температура становить 33 °C. Уже через 5 хвилин вона знижується до 31,7 °C, а через 10 хвилин досягає 24,6 °C. Характер кривої має експоненційний вигляд: спочатку спостерігається швидке охолодження, зумовлене інтенсивним випаровуванням вологи, після чого темп зниження поступово зменшується — повітря насичується вологою, і процес наближається до рівноважного стану.

Отже, система випарного охолодження ефективно знижує температуру вже протягом перших хвилин роботи, що особливо важливо для стабілізації мікроклімату у спекотні дні.

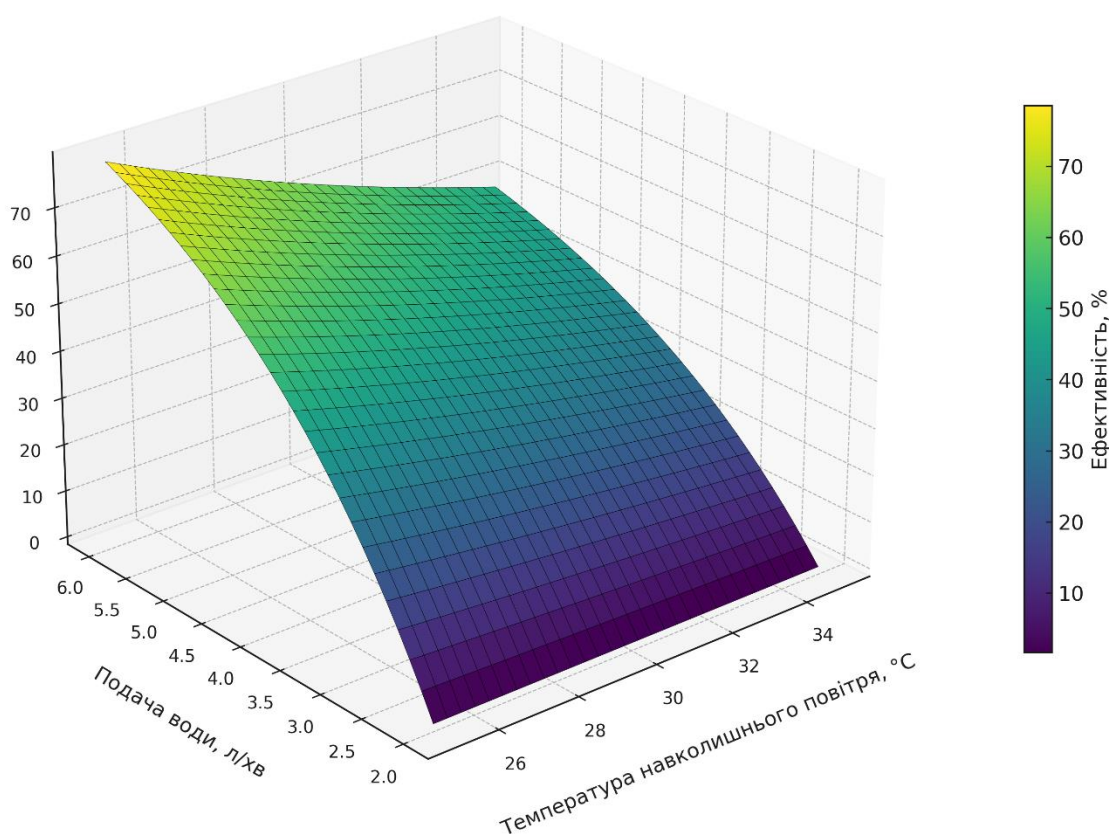


Рис. 3.4 Зміна ефективності випарного охолодження (%) залежно від температури навколишнього повітря (°С) та подачі води в систему (л/хв).

На рисунку представлено просторову поверхню, яка відображає зміну ефективності випарного охолодження (%) залежно від температури навколишнього повітря (°С) та подачі води в систему (л/хв).

Із графіка видно, що ефективність системи має нелінійний характер зміни. При низьких температурах повітря (25–27 °С) ефективність охолодження не перевищує 40–50 %, оскільки різниця парціальних тисків вологи між повітрям і водяною плівкою є незначною. Зі зростанням температури навколишнього повітря до 33–35 °С ефективність зростає до 80–95 %, що пояснюється підвищенням інтенсивності випаровування та більшою кількістю відведеного тепла.

Підвищення подачі води також позитивно впливає на охолодження, особливо в діапазоні 3–5 л/хв, де система досягає максимальної продуктивності без надмірного перевитрачання води. Однак після певного рівня (понад 5 л/хв) крива стабілізується — ефективність наближається до граничного значення, обмеженого фізичними умовами насичення повітря вологою.

Таким чином, з аналізу поверхні видно, що оптимальні умови роботи системи випарного охолодження спостерігаються при температурі повітря понад 30 °С і подачі води 4–5 л/хв, коли ефективність досягає 90–95 %.

Розділ 4. Економічна оцінка

4.1 Загальна економічна оцінка ефективності системи.

Ефективність застосування систем конденсаційного випаровування у корівниках визначається їхнім впливом на продуктивність тварин, собівартість продукції та термін окупності інвестицій. Такі системи забезпечують стабільний мікроклімат, що є ключовим фактором у підвищенні надоїв та покращенні здоров'я стада.

У період високих температур корови втрачають до 15–25 % продуктивності. Система конденсаційного випаровування дозволяє утримувати температуру у приміщенні на рівні, що відповідає комфортній зоні (18–22 °С), завдяки чому:

- підвищується надої на 8–15 %;
- скорочується період негативного впливу теплового стресу;
- поліпшуються репродуктивні показники;
- знижується ризик маститу та респіраторних захворювань.

Покращення мікроклімату зменшує витрати на ветеринарні препарати та втрати молока через погіршення здоров'я корів. Система також оптимізує енерговитрати за рахунок:

- використання низькотискового розпилення води;
- автоматичного керування продуктивністю залежно від температури;
- можливості роботи в парі з вентиляторами.

У середньому собівартість 1 т молока знижується на 150–300 грн, залежно від масштабу ферми.

Збільшення надоїв забезпечує приріст товарної продукції. Наприклад, для ферми з продуктивністю корів:

- 7000 кг/рік — збільшення продуктивності дає додаткові 400–600 грн на 1 корову на рік;
- 8000 кг/рік — 600–900 грн;
- 9000 кг/рік — 900–1200 грн.

На рівні ферми у 100 корів додатковий річний прибуток може становити 60–120 тис. грн. Вартість впровадження системи конденсаційного випаровування включає:

- насосну станцію;
- мережу трубопроводів та форсунок;
- систему керування;
- монтажні роботи;

- підключення до водопроводу та електрики.

Середня вартість комплексу для корівника на 100–150 голів становить 160–250 тис. грн. На основі наведених економічних показників термін окупності коливається в межах:

- 7,0–7,8 років для фермерських господарств з надоем 7000 кг/рік;
- 6,6–7,0 років для 8000 кг/рік;
- 5,6–6,4 років для 9000 кг/рік.

Зі зростанням прибутку від реалізації 1 т молока термін окупності зменшується, що підтверджено графічною залежністю.

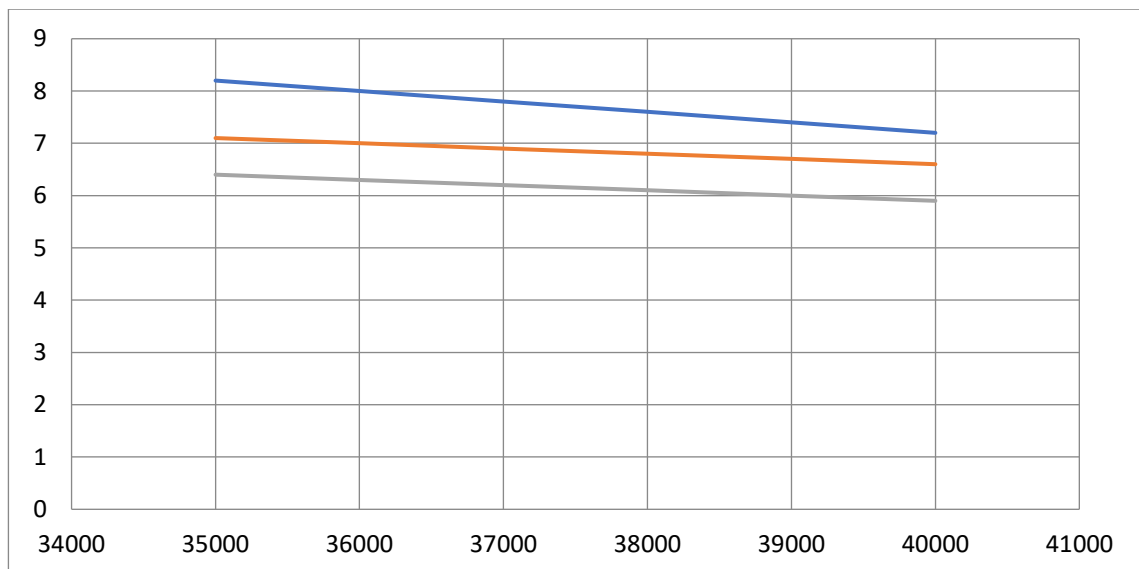


Рис 4.1 Окупність експериментальної установки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u284/16_polozhennya_pro_napis_mag.k_valifikaciyanoi_roboti_2021.pdf ПОЛОЖЕННЯ ПРО ПІДГОТОВКУ І ЗАХИСТ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ У НАЦІОНАЛЬНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
2. ЗАТВЕРДЖЕНО вченою радою НУБіП України « 26 » вересня 2018 р. протокол № 2
3. Внесено зміни вченою радою НУБіП України « 22 » грудня 2020 р. протокол № 5
4. Доповнено вченою радою НУБіП України « 23 » червня 2021 р. протокол № 11
5. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u107/polozhennya_pidgotovka_magistri_v_zmini_i_dop._2022.pdf ПОЛОЖЕННЯ ПРО ПІДГОТОВКУ МАГІСТРІВ У НАЦІОНАЛЬНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
6. ЗАТВЕРДЖЕНО вченою радою НУБіП України 26 вересня 2018 року, протокол № 2
7. Внесено зміни вченою радою НУБіП України « 23 » _02__ 2022 р. протокол № 6
8. <http://dspace.nubip.edu.ua:8080/jspui/>.
9. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u284/28._polozhennya_pro_perevirku_na_plagiat.pdf Положення про запобігання та виявлення плагіату у Національному університеті біоресурсів і природокористування України
10. Методичні рекомендації до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для студ. спец. 208 “Агроінженерії” денної та заочної форм навч. [Електронний ресурс]: / уклад. О.О.Заболотько, В.С. Хмельовський, В.І. Ребенко, С.Є. Потапова, О.М. Ачкевич, 2021. – 48 с.
11. Фінансовий звіт господарства за 2020-2022рр.

12. Ревенко І.І., Брагінець М.В., Ребенко В.І. Машини та обладнання для тваринництва. – К.: Кондор, 2009. – 731 с.
13. Скотарські підприємства (комплекси, ферми, малі ферми) ВНТП - АПК - 01.05. Мінагрополітики України. - Київ, 2005.
14. Заболотько О.О., Хмельовський В.С., Ребенко В.І. Машиновикористання у тваринництві /О.О.Заболотько, В.С. Хмельовський, В.І. Ребенко, – К.: ЦП «Компринт» , 2015. – 248 с.
15. Заболотько О.О., Хмельовський В.С., Ребенко В.І. Проектування і розрахунок технологічних систем у тваринництві: Посібник для студентів вищих аграрних навчальних закладів III-IV рівнів акредитації /О.О.Заболотько, В.С. Хмельовський, В.І. Ребенко, – К.: ЦП «Компринт» , 2018. – 268 с.
16. Ревенко І.І., Хмельовський В.С., Заболотько О.О. Проектування технологічних процесів у тваринництві: Підручник. – К. : ЦП «Компринт», 2018. – 292 с.
17. «Посібник для самостійного навчання з охорони праці у схемах, таблицях і графіках» (К.: Видавничий центр НУБіП України. – 2014. – 132 с.)
18. Закону України «Про охорону праці», Закону України «Про загальнообов’язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку», Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів, Правил пожежної безпеки в Україні, правил надання домедичної допомоги, а також НПАОП 01.0-1.02-18 «Правила охорони праці у сільському господарстві».
19. Проектування механізованих технологічних процесів у тваринництві. За ред. І.М. Бендери, В.П. Лаврука – Кам’янець-Подільський: ФОП Сисин О.В., 2011. – 564с.
20. Проектування технологій і технічних засобів для тваринництва. За ред. Скорока О.П., Полупанова В.М. – Харків: ХНТУСГ, 2009.-429с.
21. Войналович О.В. Безпека виробничих процесів у сільськогосподарському виробництві. / Войналович О.В., Марчишина Є.І., Кофто Д. Г. / - К.: Видавничий центр НУБіП України, 2015. – 418 с.

22. Машини для тваринництва та птахівництва. Посібник: За ред. Кравчука В.І., Мельника Ю.Ф. – Дослідницьке: УкрНЖПВТ ім. Л.Погорілого. – 2009. – 207 с.
23. Бабич А. О. Стратегічна роль сої в розв'язанні глобальної продовольчої проблеми / А. О. Бабич, А. А. Бабич-Побережна // Корми і кормовиробництво. – 2011. – Вип. 69. – С. 11-19. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/kik_2011_69_4.
24. Semenyshyn, Ye., Atamanyuk, A., Rymar, T. et al. Mass transfer in the solid-liquid system: mechanism and kinetics of the extraction // Chemistry and Chemical Technology. – 2020. – 14 (1). – P. 121-128.
25. Коляновська Л.М., Бандура В.М. Вплив електромагнітного поля на екстрагування олії із насіння сої / Л.М. Коляновська, В.М. Бандура // Зб. наук. пр. Вінницького національного аграрного університету – Вінниця: ВНАУ, – 2012. – Вип. 10, т.1 (58) – С. 137–141.
26. Семенишин Є. М. Дослідження кінетики екстрагування олії з рослинної сировини органічними розчинниками / Є. М. Семенишин, О. С. Іващук, Т. І. Римар // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія : Хімія, технологія речовин та їх застосування : збірник наукових праць / МОН України. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2018. – № 886. – С. 177-183.
27. Roskamp Harold Steam Kolling brain, Плющение зерна с запариванием. Feedstuffs, oct, №41, 1965
28. Christian Mercier Effects of Varions U.S. grain processes on the alteration and the “in vitro” digestibility of starch granul. Jeed shifts №50, 1971
29. Hole William H. Train processing asit affects. But Catle, Feedstuffs, V.43. №14, 1971
30. Trei John, Hale W.H., Treuzer Brent Effect of grain processing on in wistro gas production. Animal Sciens, 30, №5, 197026.
31. Parrket N.B. Performance of small hammer and Roller mills for grinding livestock feed. Agricultural research severe, 1968.

32. 153. Achmelova Mukadas/ Testflussigkeit mit milchanlichen phyalkalischen Eigenachafen (Technische Milchaffrappe fur Vergltichsmessungen) // Deutache Agrartechnik. – 1967. - №8.- S. 350-351.
33. 154. Achmelova Mukadas. Zur Becinflussung des Melkvakuums in Rohrmelkanlagen. Teil: Durch Forderventil und Drucklosez // Deutsche Agrartechnik, 1968.- №7.-S. 315-321.
34. 155. Bodmin Milking Sestem Nu-Pulse. – New Zealand: Hamilton/
35. 156. Bodmin Nu-Pulse cluster and Wash sestem. New Zealand: Hamilton.
36. 157. Cicogna Mario? Sanglorgi Franko/ Milksng Characteristics of some new and Commercial teatcup Liners // Sootecnica e Nutrizione Animale/ - 1981. – Anno VII. - №6. – S. 409-420/
37. 158. Guest R.W., Shepardaon E.3., Townsend J.3. Engineering Aspects of Milking Machine Research // Journal of Milk and Food Tochnologe. – 1965.- №5. - S. 166-169
38. 159. Das neue/ Miele MLT-Sestem/ Melkfortschiritt fur tiergerechtes Melken // Miele Austria: Salzburg, Mieletrade 1.-12 s.
39. 160. Eide R.N., Fairbank. Pipe size and Milking Vachine airflow. // California agricblture. – 1962.-Vol. 16.- №7. – S. 217-221.
40. 161. Eisenreich L., Ruhmann H. Typentabelle Melkanlagen // Landtechnik. – 1966. VI, Bd. 21, №11. – S. 407-410. // California Agriculture. – 1962. – Vol. 16. - №7. – S. 217-221.
41. 162. Einrohr-Flaco-Matik PLS. Spitzenleistung Moderner Melrtechnik / F. Landwehr Gmbh Maschinenfabrikation. – 10 s.
42. 163. Hupfauer M., Hecht H., Ruhmann N. Bauarten von Melkanlagen // Landtechnik. – 1966.-VII,-Bd. 21. - №11. – S. 402-407.
43. 164. Hanel A. Doppelpulsleitungen mim Zent-ralpulsator-Unter-suchungen Uder Leitung – stangen, Leitungsguerschnite and Taktzahlen // Deutsche Agrartechnik. -1966. -№7. – S. 307-308.

44. 165. Hoffman N.W., Wehowsky G. Ein neues Verfahren zum Abschalten der Melkzeuge gegen Ende des Melkaktens // Deutsche Agrartechnik.-1966.- №5.-A. 242-243.
45. 166. Kreilis M.U.C. Piena Razosanas tehnologijas rokasgramata / - Riga: Avots.-1981.-262 lpp., il/
46. 167. Mein G.A., Thiel C.C., Westgarth D.R. and Fulford Rosemary I. Friction Between the teat and teatcup liner during milking // Journal of Research. – 1973.- №40.- P. 191-206.
47. 168. Observation on Bodmsn Hu-huls milking system // Calif. Agr. – 1982.-V. 36.- №3/4. – P. 10-12.
48. 169. Patkos Istvan, Toth Laszlo. A szarvasmar ha tartas gepesitese. – Budapest: Mezogazdasadi Kiado. – 1978/ - 246 s.
49. 170. Paneras E.D., Jordan W.R. Tffecta on Milk of Transportation Through a Pilot-Plant Pipelino // Journal of Dairy Science/- 1968. – Vol. 51.- №6. – P. 817-825.
50. 171. Tamara T., Tsurumi M. Studies on Milking Machines. Determination of Pipe-Diameter and Piping Metdods in Darry-Barn by Vacuum Technigue // Journal of the Society of Agricultural Machinery / Japan, 1963. – Vol. XXV.- №3 (86).
51. 172. Thompson H.O. and Miller R.H. Retrograde Flow of Milk Within Machine-Milred Teats // Journal of Dairy Science.-1974.- Vol. 57.- №2.-P. 1489-1496.
52. 173. Worstorft Von Hermann, Freising-Weihenstephan. Stables Vakuum in Melkzend / Fachzeitschrift fur alle Bereiche der Agrartechnik/Landtechnik. – 1977, Heft 9.- 4 s.

ДОДАТКИ

UDC 631.363:636.09:614.8

Occupational safety during mechanized work on livestock farms

Author O.O. Zabolotko¹, author D.V. Gavrylyuk²

¹ Ph.D., Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, zabolotko@nubip.edu.ua;

² Master's student, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, digavr@ukr.net.

Abstract: An analysis of occupational safety during mechanized work on livestock farms is presented. The focus is on the influence of technical equipment, organization of work, and environmental factors on the safety and health of workers. Preventive measures and modern approaches to improving working conditions in mechanized animal husbandry are proposed.

Key words: occupational safety, mechanization, livestock farms, injuries, working conditions, preventive measures.

Problem statement:

Mechanized work processes in livestock farms are characterized by a high level of physical load, exposure to mechanical and chemical factors, and complex microclimatic conditions. The operation of milking machines, feed dispensers, manure removal systems, and ventilation equipment can cause injuries or occupational diseases if safety requirements are not met. Therefore, ensuring occupational safety in mechanized livestock production is a priority task that affects not only the health of workers but also the efficiency and sustainability of agricultural production.



Fig. 1 Main sources of hazards on a livestock farm



Fig. 2. Safety measures for workers during mechanized operations

Analysis of the latest research and publications:

Recent research emphasizes that more than 60% of occupational accidents in animal husbandry occur due to violations of safety requirements when using mechanized equipment. The main causes include inadequate technical maintenance of machines, insufficient lighting and ventilation, slippery floors, and lack of personal protective equipment. Scientists and practitioners note that the introduction of modern automation systems and proper training of personnel significantly reduce the number of injuries. Studies also show that compliance with safety standards, regular risk

assessment, and ergonomic workplace design directly contribute to increasing labor productivity and preventing occupational hazards [1–2].

Purpose of the study:

The purpose of the study is to analyze the main occupational safety risks during mechanized work on livestock farms and to identify effective preventive measures for ensuring safe working conditions.

Summary of the main material:

Mechanized livestock farms use various machines and installations: milking units, feed preparation and distribution systems, manure transporters, and ventilation and heating systems. Each of these technological processes poses specific risks.

1. Mechanical hazards: Rotating and moving parts of machines (shafts, belts, chains) can cause serious injuries. Protective covers, emergency stop systems, and safety interlocks must be installed and regularly maintained.
2. Electrical safety: High humidity and the presence of metal structures in barns increase the risk of electric shock. All electrical equipment should be grounded and equipped with residual-current devices.
3. Microclimatic factors: Inadequate ventilation, high temperatures, or high concentrations of harmful gases (ammonia, hydrogen sulfide) negatively affect both workers and animals. Ventilation systems must ensure constant air exchange and air quality control.
4. Ergonomic and organizational measures: Workplaces should be designed to minimize unnecessary physical effort and awkward postures. Workers should undergo regular safety training, and shifts should be organized to prevent fatigue.
5. Personal protective equipment (PPE): Workers must be provided with protective clothing, rubber boots, gloves, and hearing protection when operating noisy or vibration-prone machines.

The implementation of preventive maintenance schedules, automation of heavy physical operations, and the use of smart monitoring systems for air quality and equipment operation improve occupational safety and reduce accident risks.

Conclusions:

Compliance with occupational safety standards during mechanized work on livestock farms ensures the prevention of accidents and occupational diseases, protects workers' health, and increases production efficiency. The integration of modern automation and monitoring systems, along with regular staff training, creates safe and comfortable working conditions in modern animal husbandry.