

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр" на тему:
**Обґрунтування параметрів мікроклімату в приміщеннях
для утримання корів**

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-1-23
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Рекалов Денис Сергійович

Керівник: _____ Лупко Кристина Олегівна

Рецензент: _____ Носенко Євгеній Олегович

Дніпро, 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем
Освітній ступінь: «Магістр»
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«12» листопада 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Рекалову Денису Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування параметрів мікроклімату в приміщеннях для утримання корів

керівник роботи Лупко Кристина Олегівна, доктор філософії

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

«12» листопада 2024 року № 3784

2. Строк подання студентом роботи 16.12.2024 року

3. Вихідні дані до проекту Огляд стану питання в галузі механізації тваринництва та існуючих технічних засобів для забезпечення мікроклімату. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Стан і напрями досліджень. 2. Методика чисельного моделювання мікроклімату в приміщенні для утримання корів. 3. Результати чисельного моделювання мікроклімату в приміщенні для утримання корів. 4. Методика і результати експериментальних досліджень. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність системи забезпечення мікроклімату корівника. Висновки. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема. Мета і задачі досліджень (2 аркуша, А4). 2. Стан і напрями досліджень (1 аркуш, А4). 3. Результати моделювання (3 аркуша, А4). 4. Експериментальні дослідження (1 аркуш, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-6	Лупко К. О., старший викладач	12.11.2024	09.12.2024
Нормоконтроль	Івлєв В. В., доцент	06.12.2024	09.12.2024

7. Дата видачі завдання: 12 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний	до 14.11.2024 р	виконано
2	Теоретичний	до 21.11.2024 р	виконано
3	Експериментальний	до 28.11.2024 р	виконано
4	Охорона праці	до 02.12.2024 р	виконано
5	Економічний	до 06.12.2024 р	виконано
6	Демонстраційна частина	до 09.12.2024 р	виконано

Студент

(підпис)

Рекалов Д. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Лупко К. О.

(прізвище та ініціали)

Рекалов Д. С. Обґрунтування параметрів мікроклімату в приміщеннях для утримання корів. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

Дослідження системи забезпечення мікроклімату в корівниках є важливим аспектом сучасного сільського господарства, оскільки ефективні умови утримання великої рогатої худоби безпосередньо впливають на їхню продуктивність і здоров'я. У розділі 1 розглянуто стан та напрями досліджень, зокрема характеристики напівізольованих і неізольованих корівників, особливості мікроклімату та системи вентиляції, а також механізми забезпечення комфортного мікроклімату. Розділ 2 присвячений методиці чисельного моделювання мікроклімату, в якій визначено задачі моделювання, методи теплового моделювання тварин, моделювання повітряного потоку та оцінки комфорту тварин у різних погодних умовах. У розділі 3 представлені результати чисельного моделювання в умовах різних сезонів, зокрема зимових і літніх. Аналіз отриманих даних дозволяє виявити ключові фактори, що впливають на мікроклімат у корівниках та комфорт тварин. Розділ 4 описує методику експериментальних досліджень, включаючи порівняння експериментальної та змодельованої інтенсивності теплового стресу, що дає змогу оцінити точність моделей. У розділі 5 обговорюються питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, що є важливими для забезпечення безпеки персоналу і тварин. У розділі 6 розглянуто економічну ефективність системи забезпечення мікроклімату.

Ключові слова: корови, утримання, приміщення, мікроклімат, моделювання, параметри, ефективність.

Апробація. Рекалов Д. С. (2024). Дослідження мікроклімату в приміщеннях для утримання корів. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 155–157.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Напівізольовані та неізольовані корівники безприв'язного утримання	8
1.2 Мікроклімат і вентиляція у приміщеннях для великої рогатої худоби	9
1.3 Система забезпечення мікроклімату в корівнику	14
1.3 Висновки з розділу	18
2 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ПРИМІЩЕННІ ДЛЯ УТРИМАННЯ КОРІВ	20
2.1 Постановка задачі	20
2.2 Теплове моделювання тварин	25
2.3 Моделювання потоку повітря	28
2.4 Оцінка комфорту тварин	30
2.5 Сонячне випромінювання	31
2.6 Кратність повітрообміну і вентиляція	32
2.7 Погодні умови	33
2.8 Пристрої для зменшення теплового стресу	34
2.9 Методика створення сітки.....	35
2.10 Методика розв'язання.....	38
3 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ПРИМІЩЕННІ ДЛЯ УТРИМАННЯ КОРІВ	41
3.1 Моделювання в зимових погодних умовах.....	41
3.2 Моделювання в літніх погодних умовах.....	45
3.3 Висновки з розділу	53
4 МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	55
4.1 Методика експериментальних досліджень	55
4.2 Порівняння експериментальної та змодельованої інтенсивності теплового стресу	57
4.3 Висновки з розділу	59
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	61
6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ КОРІВНИКА.....	64
ВИСНОВКИ.....	66
Бібліографія	68
Додатки	73

ВСТУП

У сучасному тваринництві особлива увага приділяється продуктивності та добробуту тварин. Щоб підтримувати гомеостаз, тварини повинні підтримувати рівновагу між метаболічним теплом та теплопередачею в навколишнє середовище. Метаболічне тепло вивільняється через різні механізми, такі як дихання, потовиділення, конвекція та випромінення. Висока зовнішня температура та вологість ускладнюють теплопередачу тварин з навколишнім середовищем, і метаболічне тепло може стати фізіологічно шкідливим. Цей незбалансований стан називається тепловим стресом, і його виникнення пов'язане з кількома біологічними проблемами, такими як підвищення температури тіла, погіршення репродуктивної здатності та зміни поведінки. Крім того, тварини зменшують споживання сухих кормів у прагненні зменшити своє метаболічне тепло. Тварини зазвичай активізують додаткові механізми тепловідведення, такі як важке дихання або потовиділення. Тепловий стрес є надзвичайно критичним для дійних корів, оскільки він безпосередньо пов'язаний зі зниженням надоїв і відповідними економічними втратами. Проектування систем вентиляції в корівниках має великий вплив на термічний комфорт корів і виробництво молока. Щоб затримати виникнення теплового стресу, корівники обладнують кількома пристроями для зниження теплового стресу. Вентилятори для притоку та витяжки можуть використовуватися для покращення повітрообміну та контролю внутрішніх умов повітря. Зниження теплового стресу також можна досягти за допомогою випаровувальних систем, таких як туманення або безпосереднє зволоження. Хоча вони є дуже ефективними, їх використання передбачає значну витрату води, і іноді це пов'язано зі збільшенням інфекцій та маститу.

Мета роботи – обґрунтування параметрів мікроклімату в приміщеннях для утримання корів шляхом дослідження та оптимізації систем вентиляції, спрямованих на забезпечення комфортних умов для тварин, підвищення їх продуктивності та зниження енергетичних витрат, з урахуванням економічної доцільності.

1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Напівізольовані та неізольовані корівники безприв'язного утримання

Основною метою утримання молочних корів у корівниках безприв'язного утримання є захист корів, їхніх стійл і зон годівлі від дощу, снігу, холодних вітрів узимку, гарячого літнього сонця, а також створення комфортних структурних, теплових та повітряних умов. Корівники бувають трьох основних типів: неізольовані, напівізольовані та повністю ізольовані (рисунок 1.1).



Рисунок 2.1 – Класифікація приміщень для утриманні корів:

А – повністю ізольовані, В – напівізольовані; С – неізольовані

Неізольовані корівники (UDB) мають мінімальну або взагалі відсутню ізоляцію, а внутрішня температура зазвичай відповідає зовнішній температурі. Вони, як правило, провітрюються природним шляхом, без або з мінімальним контролем вентиляції. Потік повітря проходить через відкриті бокові стіни та виходить через отвори на даху. Для закриття бокових і торцевих стін використовуються штори, знімні або навісні панелі, розсувні двері або вікна.

Напівізольовані корівники (SDB) мають мінімальну ізоляцію в підлозі, на даху або в частинах стін. Внутрішня температура підтримується на рівні вище 0°C

протягом усього року. Вони зазвичай провітрюються природним шляхом, мають регульовані штори на отворах у бокових стінах та вентиляційні отвори на даху.

Повністю ізольовані корівники (FDB) мають ізоляцію в підлогах, стінах та дахах. Вони часто вентилюються механічно, а температура всередині підтримується на рівні вище 10°C.

Неізольовані та напівізольовані корівники мають різноманітні конструкції та матеріали для підлог, стін, дахів та вентиляційних систем, докладні описи можна знайти в літературі (Kalamees i Vinha, 2004; Sommer et al., 2006; Kivinen et al., 2006; Kivinen et al., 2008). Найпоширенішими неізольованими та напівізольованими корівниками є дерев'яні будівлі з вентиляційними стінами з решіток або штор, які мають різні варіанти вентиляції через дах.

Вартість будівництва каркаса та стін оцінюється приблизно на 15 % нижчою для напівізольованих, і на 35 % нижчою для неізольованих корівників у порівнянні з повністю ізольованими будівлями для безприв'язного утримання (Jeppsson et al., 2006).

1.2 Мікроклімат і вентиляція у приміщеннях для великої рогатої худоби

Мікроклімат і вентиляція є важливими параметрами, які визначають якість повітря у приміщеннях для молочної худоби. Мікроклімат — це локальне середовище навколо корови, де клімат може відрізнитися від інших зон приміщення. Мікроклімат, або навколишнє повітря, містить кисень для метаболізму корови і є середовищем для транспортування зайвого тепла, водяної пари, газів, що виділяються тваринами, а також газів, що утворюються при розкладанні гною та інших частинок. Важливі параметри мікроклімату, що впливають на якість повітря в приміщеннях для молочної худоби, включають температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря, а також гази, такі як

кисень, вуглекислий газ, метан, аміак, сірководень і закис азоту. Іншими факторами є пил та мікроорганізми, які присутні в повітрі.

Вентиляція в приміщенні для молочної худоби полягає в заміні внутрішнього повітря свіжим повітрям ззовні. Така вентиляція впливає на параметри мікроклімату всередині приміщення і допомагає підтримувати комфортне середовище для худоби.

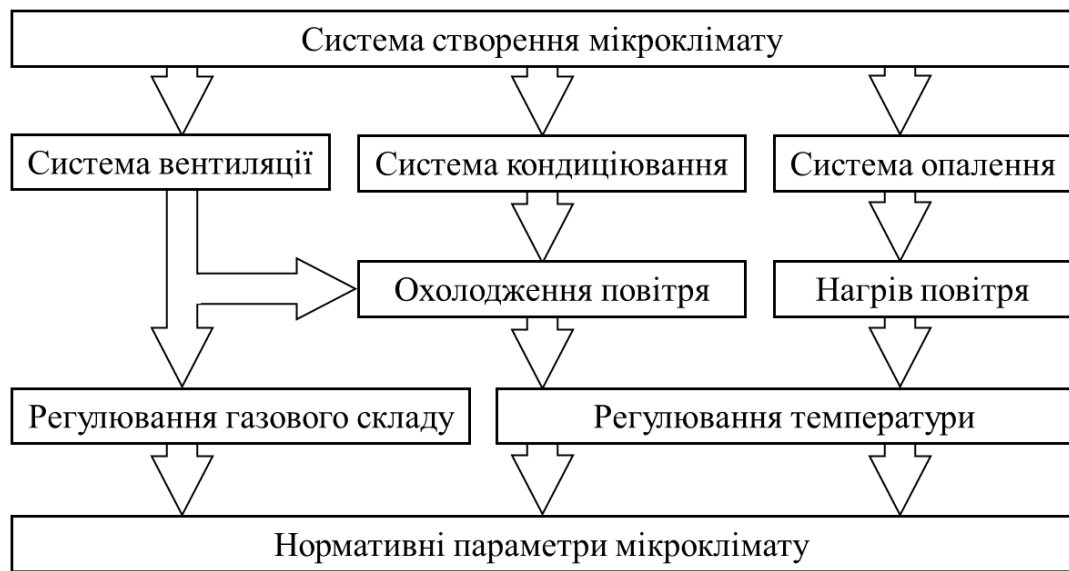


Рисунок 2.2 – Технологічна схема системи забезпечення мікроклімату

Температура і відносна вологість. Температура є екологічним параметром, який може впливати на здоров'я, добробут і продуктивність молочних корів, а отже, і на прибутковість молочного виробництва. Конструкція приміщень для молочної худоби впливає на внутрішню температуру і, відповідно, на корів. Дослідження показують різні результати щодо впливу термічних умов на молочних корів. За даними досліджень Шніра та інших (2003) та Шніра (2004), не було виявлено значної різниці в захворюваності та молочній продуктивності між коровами, які утримувалися в приміщеннях без ізоляції, порівняно з тими, які утримувалися в повністю ізольованих приміщеннях для молочної худоби. Інші дослідження (Занер та ін., 2004) також показали, що температури від $-13,8$ °C до

+28,7 °C і відносна вологість від 26 °C до 99 % не впливають на лактацію корів, які утримуються в приміщеннях без ізоляції. Інші публікації (Хан, 1999; Хассі та ін., 2005; Шнір та ін., 2004; Такер та ін., 2006; Тууру, 2003), однак, повідомляють інші результати.

Зовнішня температура безпосередньо впливає на внутрішню температуру в неізольованих і напівізольованих приміщеннях для молочної худоби, оскільки рівень ізоляції мінімальний, а корови є основним джерелом тепла. Термальні умови навколо корови варіюються в залежності від складної взаємодії між екологічними умовами та факторами, що стосуються тварини. Крім того, фактори, такі як вид і вік худоби, конструкція приміщення, тип підлоги, щільність тварин і харчування, також впливають на те, як термічні умови в приміщенні впливають на окремих тварин. За певних оптимальних екологічних умов корови не лише почуваються комфортно, але й мають вищу продуктивність. Зона термічного комфорту (TCZ) або термонеутральна зона (TNZ) визначається як діапазон температур навколишнього середовища, в якому тварини підтримують фізіологічні функції з мінімальними витратами енергії.

Найефективніший діапазон температур для виробництва становить 15...20 °C. Зниження температури повітря нижче 5 °C менш істотно впливає на продуктивність і споживання кормів у порівнянні з підвищенням температури понад 20 °C. Іншими словами, висока температура негативно впливає на корів сильніше, ніж низька.

Молочні корови постійно виробляють тепло та вологу. Коли волога випаровується з їхньої шкіри, температура поверхні корови знижується через випаровувальне тепловідведення. Однак кількість вологи та температура повітря навколо корови впливають на швидкість випаровування. Відносна вологість (RH) понад 90% при високій внутрішній температурі спричинить тепловий стрес у молочних корів через обмежене випаровувальне тепловідведення. Водночас надто низький рівень RH призводить до надмірної сухості підстилки у фермерських

приміщеннях, збільшує кількість пилу та частоту захворювань легень у корів (Seedorf та ін., 1998b). Крім того, висока відносна вологість прискорює процеси руйнування будівельних матеріалів на молочних фермах (De Belie та ін., 2001a-c). Для тваринницьких приміщень CIGR (1984) рекомендує максимальні та мінімальні значення відносної вологості залежно від температури в приміщенні. Наприклад, RH у межах 50-90% при 0 °C з подальшим поступовим зниженням RH до прийняттого діапазону 40-60% при 30 °C (CIGR, 1984).

Складно точно визначити верхні та нижні температурні межі термонеутральної зони (TNZ) для корів різного віку та порід в одних і тих самих приміщеннях, деякі дослідження пропонують створення тепліших або прохолодніших зон у молочних будівлях, щоб тварини могли вільно обирати свою комфортну TNZ (Aarnink et al., 1996; Zhang et al., 2001).

Концентрація та викиди шкідливих газів у приміщеннях для утримання корів. Викиди газів, пов'язані з тваринництвом, вивчаються вже багато десятиліть (Heitman et al., 1949; Curtis, 1972). Високі концентрації газів у тваринницьких будівлях впливають на добробут тварин, здоров'я працівників і тривалість експлуатації самих будівель (Auvermann and Rogers, 2000; De Belie et al., 2001a-c; Radon et al., 2002; Zähler et al., 2004). Основними газами, які присутні в молочних фермах, є вуглекислий газ, метан, аміак, сірководень і закис азоту. Коли ці гази, що утворюються на концентрованих молочних виробництвах, виходять за межі приміщень, вони спричиняють екологічні проблеми, такі як глобальне потепління, кислотні дощі та порушення балансу поживних речовин у навколишньому середовищі (Anderson et al., 2003; Erisman et al., 2003). Глобальні оцінки показують, що тваринницькі комплекси щорічно викидають близько 536 Мт NH₃-N (Bouwman et al., 1997) та 689 Мт CH₄ (Moss et al., 2000).

Основним джерелом вуглекислого газу у молочних приміщеннях є дихання. Невеликі частки (6,1%) утворюються під час розкладання гною та сечовини (Kinsman et al., 1995). Середня концентрація CO₂ у молочних фермах становить

1900 ppm (Phillips et al., 1998). Швидкість утворення CO₂ на одну корову — 330 г/год (CIGR, 1999).

Метан утворюється під час ентерогенного бродіння у жуйних тварин та, в меншій мірі, внаслідок анаеробного розкладу гною (CIGR, 1994). Молочні корови безпосередньо виробляють 9 г CH₄ на годину на одну корову, що становить 94,2% від загальної кількості метану, що виробляється на молочній фермі (Jungbluth et al., 2001; Kinsman et al., 1995). Середня концентрація CH₄ у молочних приміщеннях — 70 ppm (Jungbluth et al., 2001). Викиди метану на одну тварину становлять від 194 г до 390 г на добу (Jungbluth et al., 2001; Kinsman et al., 1995; Sneath et al., 1997).

Аміак спричиняє кислотні опади та евтрофікацію, коли суспендований NH₃ з молочних та інших тваринницьких ферм осідає на землі та у водоймах (Anderson et al., 2003; Erisman et al., 2003). Джерелами аміаку в молочних приміщеннях є гній, сеча, підстилка та корм тварин. Трансформація органічного азоту в аміак на молочних фермах добре задокументована (Somme et al., 2006). Середня концентрація NH₃ у молочних приміщеннях — 10 ppm (Phillips et al., 1998). Викиди NH₃ на одну молочну тварину становлять від 6,2 г до 31,7 г на добу (Demmers et al., 1998; Groot Koerkamp et al., 1998; Zhang et al., 2005).

Сірководень є дуже токсичним і сприяє підкисленню ґрунтів та вод у навколишньому середовищі (Sakamotoa et al., 2006). Зазвичай сірководень утворюється в кількостях від 0,016 до 0,084 г/м² на день (Zhu et al., 2000).

Вентиляційні норми в молочних приміщеннях. Вентиляція молочних приміщень допомагає підтримувати комфортне і здорове середовище як для корів, так і для працівників молочної галузі, а також зменшує вплив навколишнього середовища на будівельні матеріали. Обмін повітрям усуває запахи та гази з молочних приміщень і є необхідним протягом року, незалежно від зовнішніх температур.

Вентиляційна норма – це об’єм повітря, що обмінюється за певний період часу. Оцінка викидів газів з молочних приміщень вимагає надійної інформації про вентиляцію (Pedersen et al., 1998). Молочні приміщення можуть бути механічно або природно вентильованими, або їх комбінацією. Також можуть бути доступні інші засоби для регулювання вентиляційної норми в молочних приміщеннях, такі як налаштування потоку вентиляторів (механічна вентиляція), закриття вікон або піднімання стінок-ширм (природна вентиляція у будівлях з стінками-ширмами) (Teeye і Hautala, 2007). Точно виміряти вентиляційні норми вентиляторів складно, оскільки вони легко підлягають впливу умов роботи вентиляторів, накопичення пилу та варіацій у електроживленні (Vicudo et al., 2002). Невизначеності в вентиляції можуть досягати 15 % (Guo et al., 2006). Визначити вентиляційні норми в природно вентильованих будівлях ще складніше (Albright, 1990; Zang et al., 2005). Повітряний потік у природно вентильованих будівлях є нерегулярним і багатонаправленим, а зазвичай також занадто малим для точного вимірювання. Вентиляція також зумовлюється температурними різницями між внутрішньою частиною молочного приміщення та зовнішнім середовищем під час холодних сезонів. Площа вентиляційних отворів велика і зазвичай простягається по всій довжині будівлі або проходить через карнизи чи дах, що ускладнює точну оцінку вентиляції. Більшість проблем з вентиляцією молочних будівель виникають через поганий дизайн, будівництво або експлуатацію систем контролю вентиляції (Seedorf et al., 1998a).

1.3 Система забезпечення мікроклімату в корівнику

На сучасних фермах великої рогатої худоби (ВРХ), де використовується безприв’язне боксове утримання, застосовуються різноманітні технології, що дозволяють забезпечити оптимальний мікроклімат і комфортні умови для тварин. Одним із найбільш поширених рішень є використання систем підйомних штор та

вентиляційно-світлових дашків, які допомагають регулювати як температуру повітря, так і його якість, що є критично важливим для здоров'я і продуктивності ВРХ.

На ринку представлені різні типи підйомних штор, серед яких найбільш поширеними є рулонні системи, а також складні конструкції. Рулонні системи можуть відкриватися як знизу вгору, так і зверху вниз. Такий вибір типу штор залежить від конкретних умов експлуатації та потреб фермерського господарства.

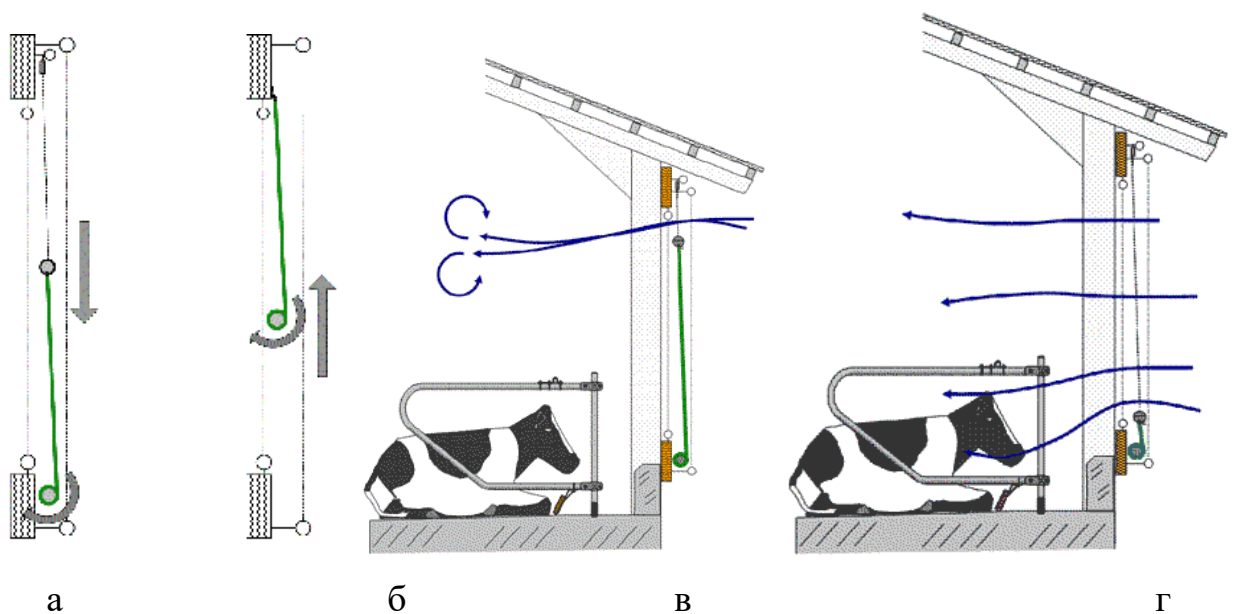


Рисунок 2.3 – Схема системи штор з відкриванням зверху (а) та знизу (б), схема надходження повітря в корівник взимку (в) та влітку (г)

Системи штор, що відкриваються знизу вгору, зазвичай використовуються тоді, коли необхідно повністю або частково закривати та відкривати приміщення. Цей тип штор зручний для регулювання доступу повітря, однак не завжди є найоптимальнішим рішенням у будь-яких кліматичних умовах. Їх застосування обмежується, зокрема, тому, що в зимовий період така конструкція не дозволяє належним чином регулювати потік повітря.

Натомість системи, що відкриваються зверху вниз, забезпечують кращі можливості для регулювання мікроклімату. Взимку можна створити невеликий проріз угорі, через який холодне повітря надходить у приміщення з високою швидкістю, утворюючи вихори, що сприяють ефективному змішуванню зі старим, вологим повітрям і забезпеченню кращої вентиляції. Літом такі системи можуть відкриватися повністю, що дозволяє забезпечити оптимальну циркуляцію повітря і створити комфортні умови для відпочинку тварин навіть у найспекотніші дні. Відкритий простір дає змогу вільно обвівати худобу свіжим повітрям, навіть коли вони перебувають у боксах для відпочинку.

Для забезпечення здорового мікроклімату в корівниках також використовують вентиляційно-світлові дашки. Вони служать для природного освітлення приміщень та ефективного видалення шкідливих газів, таких як аміак та вуглекислий газ, а також надлишкової вологи. Важливо, що такі дашки створюють природний вентиляційний потік, який сприяє регулярному оновленню повітря в приміщеннях для утримання тварин. Бічні повітровідбивачі, що встановлюються разом з дашками, підсилюють ефективність цієї системи. Вони спрямовують повітря так, щоб забезпечити його витяжку незалежно від погодних умов або напрямку вітру.



Рисунок 2.4 – Загальний вид світло-вентиляційного дашка

Ще однією важливою характеристикою вентиляційно-світлових дашків є наявність клапанів, які можна регулювати вручну або автоматично, що дозволяє змінювати обсяг повітрообміну в залежності від поточних кліматичних умов або кількості тварин у приміщенні. Завдяки цьому вдається уникнути накопичення шкідливих речовин у повітрі та підтримувати здоровий мікроклімат для худоби протягом всього року.

Окрім природних методів вентиляції, на сучасних фермах часто застосовують низьконапірні осьові вентилятори, що встановлюються вздовж приміщення в кілька рядів, зазвичай над боксами для відпочинку тварин. Відстань між вентиляторами зазвичай становить 8–10 метрів, що дозволяє рівномірно розподілити потоки повітря по всьому корівнику. Це сприяє забезпеченню рівномірного руху повітря, що дозволяє запобігти застою вологи та накопиченню вуглекислого газу у віддалених частинах приміщення.



Рисунок 2.5 – Система забезпечення мікроклімату в корівнику з безприв’язним боксовим утриманням

Додатково, для покращення мікроклімату, над кормовими столами встановлюються форсунки системи зрошення. Вони допомагають підтримувати комфортну вологість повітря, що особливо актуально в літні періоди, коли температура в приміщеннях може підніматися до критичних рівнів. Система

зрошення дозволяє значно знизити температуру повітря та запобігти перегріванню тварин, що позитивно впливає на їх стан і продуктивність.

Важливою тенденцією у сучасному тваринництві є впровадження автоматизованих систем керування мікрокліматом. Такі системи дозволяють автоматично регулювати параметри вентиляції, освітлення та зволоження повітря залежно від зовнішніх погодних умов і стану повітря в корівнику. Наприклад, датчики температури та вологості можуть миттєво реагувати на зміну клімату всередині приміщення, включаючи вентилятори або систему зрошення за потреби. Це не лише підвищує ефективність роботи ферми, але й знижує витрати на енергоресурси та забезпечує комфортні умови для тварин.

Отже, сучасні системи вентиляції, освітлення та зрошення в корівниках з безприв'язним боксовим утриманням відіграють ключову роль у забезпеченні оптимальних умов для вирощування великої рогатої худоби. Вони сприяють не лише підвищенню продуктивності тварин, але й забезпечують їхнє здоров'я та добробут, що, у свою чергу, позитивно впливає на рентабельність господарства. Завдяки широкому вибору технологічних рішень, фермери можуть обирати ті системи, які найбільше відповідають їхнім потребам та умовам експлуатації.

1.3 Висновки з розділу

1. Мікроклімат та вентиляція у приміщеннях для утримання корів є ключовими для забезпечення здоров'я тварин, їхньої продуктивності та комфорту. Правильна вентиляція сприяє регулюванню температури, вологості та викидів шкідливих газів, таких як аміак і метан, що безпосередньо впливають на екологічну стійкість ферми та тривалість експлуатації будівель. Важливо підтримувати оптимальні умови, оскільки високі температури негативно впливають на продуктивність корів більше, ніж низькі.

2. Неізолювані та напівізолювані корівники є економічно вигіднішими варіантами для утримання молочних корів, оскільки вони дозволяють знизити вартість будівництва на 15-35 % порівняно з повністю ізолюваними будівлями. При цьому вони забезпечують базовий рівень захисту тварин від зовнішніх погодних умов і створюють комфортний мікроклімат завдяки природній вентиляції та можливості регулювання повітрообміну.

3. Забезпечення оптимального мікроклімату в корівниках із безприв'язним боксовим утриманням є критично важливим для підтримання здоров'я і продуктивності корів. Для цього використовують сучасні системи, які поєднують підйомні штори, вентиляційно-світлові дашки, вентилятори та системи зрошення. Штори, що регулюються зверху або знизу, забезпечують необхідний повітрообмін залежно від погодних умов і пори року. Вентиляційні дашки та вентилятори допомагають виводити шкідливі гази та вологу, забезпечуючи постійний рух свіжого повітря. Крім того, автоматизовані системи контролю клімату, що реагують на показники датчиків температури й вологості, сприяють покращенню умов утримання тварин і ефективному використанню енергоресурсів. Усі ці технології дозволяють фермерам підвищити продуктивність і забезпечити комфортний мікроклімат для тварин, що позитивно впливає на загальну рентабельність господарства.

2 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ПРИМІЩЕННІ ДЛЯ УТРИМАННЯ КОРІВ

2.1 Постановка задачі

Оптимальна конфігурація корівника повинна забезпечувати високий рівень теплового комфорту тварин та продуктивності, разом із мінімальним використанням води та енергії. У процесі проектування необхідна прогностична модель для визначення розмірів систем вентиляції та пристроїв для зменшення теплового стресу. Гібридні системи вентиляції є особливо критичними, оскільки вентилятори для рециркуляції повітря повинні бути розміщені так, щоб забезпечити ефективне втягування повітря. Визначення правильного розташування вентиляторів не є простим завданням, оскільки це включає складні явища динаміки повітря. Сучасні методології для теплового моделювання корівників базуються на агрегованих теплових моделях, які вирішуються на основі балансів маси та енергії для всієї будівлі. Цей підхід широко застосовується для моделювання цивільних та промислових будівель, але він може бути непридатним для великих будівель для худоби. Ці моделі базуються на неявному припущенні про рівномірні умови всередині приміщення, які можуть не виконуватися для великих будівель для тварин. Таким чином, ці моделі не можуть надати інформації про внутрішню нерівномірність температури та вологості. Більше того, оскільки аналіз проводиться на контрольованому об'ємі, що відповідає межах периметра корівника, ці моделі не здатні передбачити внутрішні явища. Агреговані теплові моделі маси не підходять для гібридних систем вентиляції, оскільки втягування повітря генерується внутрішніми рециркуляційними вентиляторами, які не можна легко спрогнозувати. Щоб подолати обмеження цих моделей, потрібно застосувати іншу стратегію: в літературі кілька авторів застосовували методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) для теплового моделювання будівель для

худоби. CFD дозволяє повністю і детально описати фізичну поведінку повітря всередині корівника. Проєктування механічно вентильованих будівель для тварин було широко проаналізоване за допомогою CFD в літературі. Zhou та ін. виконали моделювання CFD для оцінки оптимального розташування дефлекторів у будівлі з поперечною вентиляцією. Подібним чином, Rakari та Ghani аналізували різні системи механічної вентиляції для дуже спекотних кліматичних умов. Cheng та ін. порівняли різні проєктні рішення для пташників за допомогою CFD, щоб оцінити оптимальну конфігурацію. CFD також може бути використана для покращення позиціонування вентиляційних компонентів, таких як прецизійний постачальник повітря, як повідомляють Wang та ін. Подібно, геометрія природно вентильованого корівника раніше досліджувалась у літературі, оскільки вона впливає на ефекти вітру та тяги. Складні моделі, такі як обчислювальна гідродинаміка, також можуть бути використані для калібрування простіших моделей для вітрових потоків. Wu та ін. створили числову модель гідродинаміки для точного оцінювання швидкості зміни повітря в природно вентильованій будівлі та перевірки точності експериментальних вимірювань, отриманих різними методами. De Masi та ін. застосували CFD для валідації агрегованої теплової моделі маси для корівника в середземноморському кліматі. Хоча можливості кодів CFD для проєктування природно та механічно вентильованих корівників були значно досліджені в літературі, дуже мало досліджень зосереджуються на повній моделі для гібридних систем.

Метою цього дослідження є надання загальної методології CFD для аналізу гібридних вентильованих будівель для худоби. У випадку з механічною вентиляцією деякі природні ефекти, такі як вітер або підйомна сила, можна ігнорувати. Насправді, у закритих корівниках симуляція зовнішнього середовища не потрібна.

Моделювання природно вентильованих корівників головним чином зосереджується на впливі вітру, а наявність рециркуляційного вентилятора часто

ігнорується, оскільки він вважається локальним явищем. Гібридні системи потребують інтегрованої методології симуляції, оскільки перехресний ефект між механізмами вентиляції є важливим для забезпечення правильного опису втягування повітря. У моделюванні гібридного корівника повинні враховуватися ефекти як природної, так і механічної вентиляції. Оскільки будівля має великі периметральні отвори, вентиляція під дією вітру та підйомна сила мають значення. Крім того, присутні повітряні потоки з великою швидкістю через коробчасті та кошикові вентилятори. Попередні дослідження здебільшого зосереджуються на літніх погодних умовах, оскільки вони є найбільш вимогливими для охолоджувальних систем. Аналіз CFD зимових умов часто ігнорується, оскільки ймовірність того, що корови страждатимуть від надмірно низької температури та вологості, є меншою. Однак необхідно перевірити поведінку корівника в холодну погоду, оскільки мінімальні годинні норми вентиляції $4-10 \text{ год}^{-1}$ завжди повинні дотримуватися для контролю якості повітря в приміщенні. Літні симуляції включають сонячне випромінення, вентиляцію під дією вітру та вентилятори, що працюють на максимальній швидкості. У зимових симуляціях вентилятори неактивні, за винятком нагнітальних, а швидкість зміни повітря визначається потоками, що викликаються підйомною силою.

Це дослідження може мати позитивний вплив на тваринництво лише в тому випадку, якщо запропонована стратегія моделювання здатна надати корисні рекомендації для проєктування корівників. Тому розроблену модель було застосовано для симуляції реальної будівлі. Експериментальний корівник було змодельовано як відповідний приклад дослідження. Досліджуваний корівник призначений для утримання близько 100 корів у чотирьох окремих стійлах. Основна частина будівлі включає стійла, передродові та післяродові загородки з центральним проходом для годування. До комплексу також входять доїльний зал та інші споруди, розташовані в допоміжній бічній будівлі. Система вентиляції складається з 19 вентиляторів над проходом для годування, 12 вентиляторів над

стійлами та 2 вентиляторів великого об'єму з низькою швидкістю над передродовими та післяродовими загородками. Всі вентилятори високої швидкості орієнтовані з півдня на північ для створення макроскопічного потоку повітря, паралельного лініям стійла за рахунок втягування повітря. Ця стратегія охолодження широко поширена в гібридних вентилятованих будівлях для худоби і відома як «тунельна вентиляція». Схематичне зображення розташування вентиляторів наведено на рисунку 2.1.

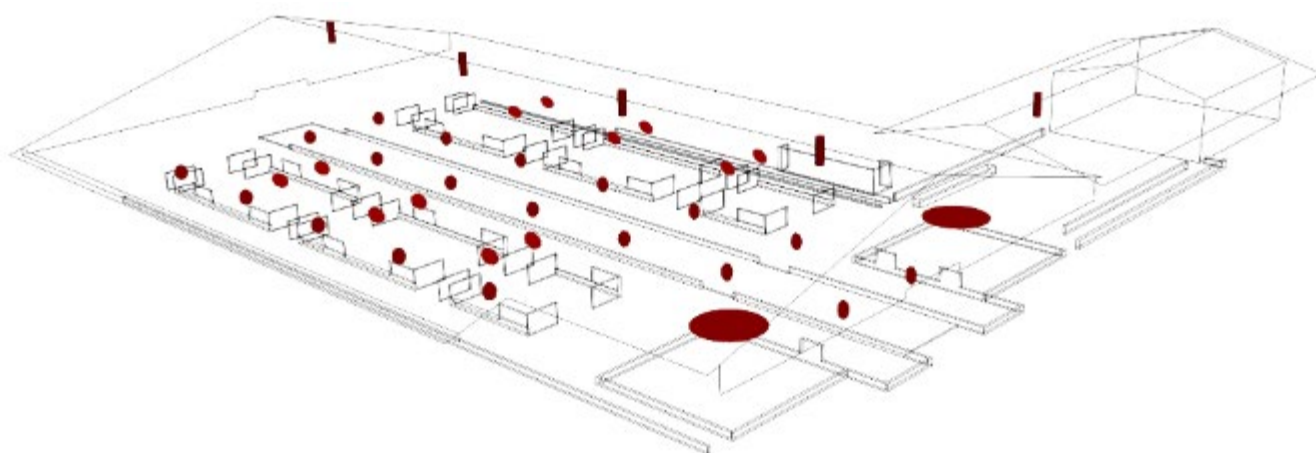


Рисунок 2.1 – Розташування рециркуляційних вентиляторів і повітродувок на даху

Корівник має незвичайну конфігурацію даху із закритим верхом і п'ятьма вентиляційними шахтами на верхівці. Ця конфігурація рідко зустрічається у великих масштабах, оскільки перевага надається відкритому даху з одним або подвійним отвором. Щоб оцінити, чи здатна розроблена модель CFD надати корисні рекомендації, існуючу конфігурацію із закритим дахом порівнювали з більш традиційним відкритим дахом з зазором на гребені. На рисунку 2.2 показано існуючу конфігурацію із закритим дахом, а на рисунку 2.3 – геометрію відкритого даху. Оскільки проєктний процес враховує як холодну, так і спекотну погоду, обидві конфігурації були змодельовані для зимових та літніх умов. Представлена робота була виконана за допомогою програмного забезпечення Simcenter Star-

ССМ+ для того, щоб мати можливість впроваджувати нові рішення та моделі. Цей код для симуляції CFD вже було використано і підтверджено для моделювання будівлі для худоби, хоча всі застосування, описані в літературі, стосуються природно або механічно вентиляованих корівників.

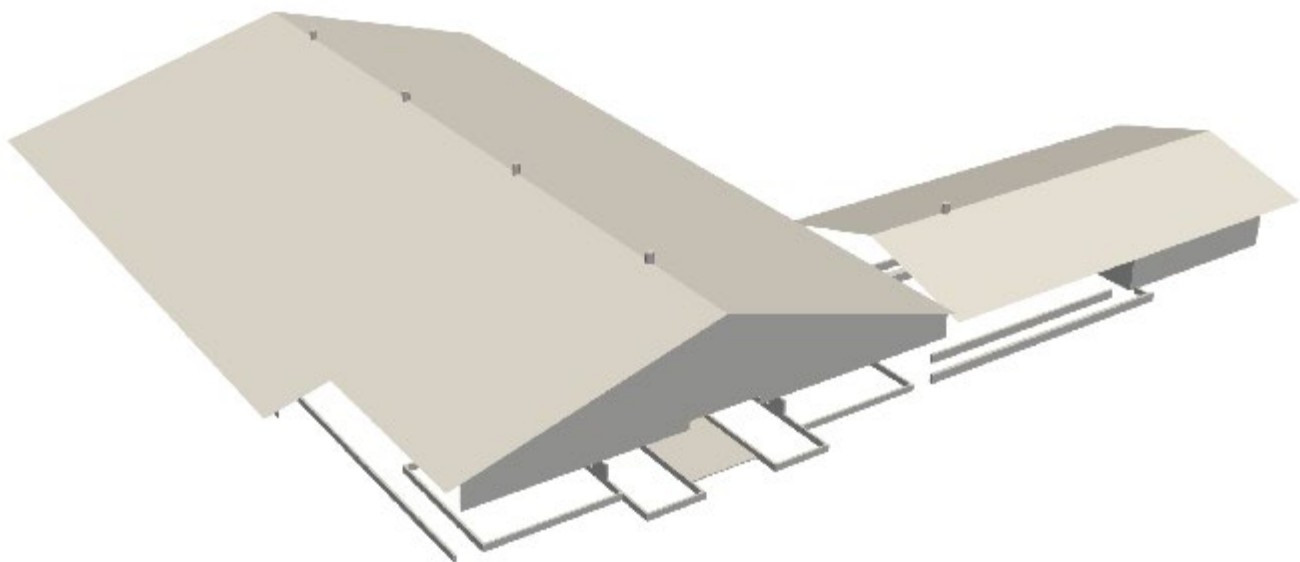


Рисунок 2.2 – Геометрія конфігурації закритого даху

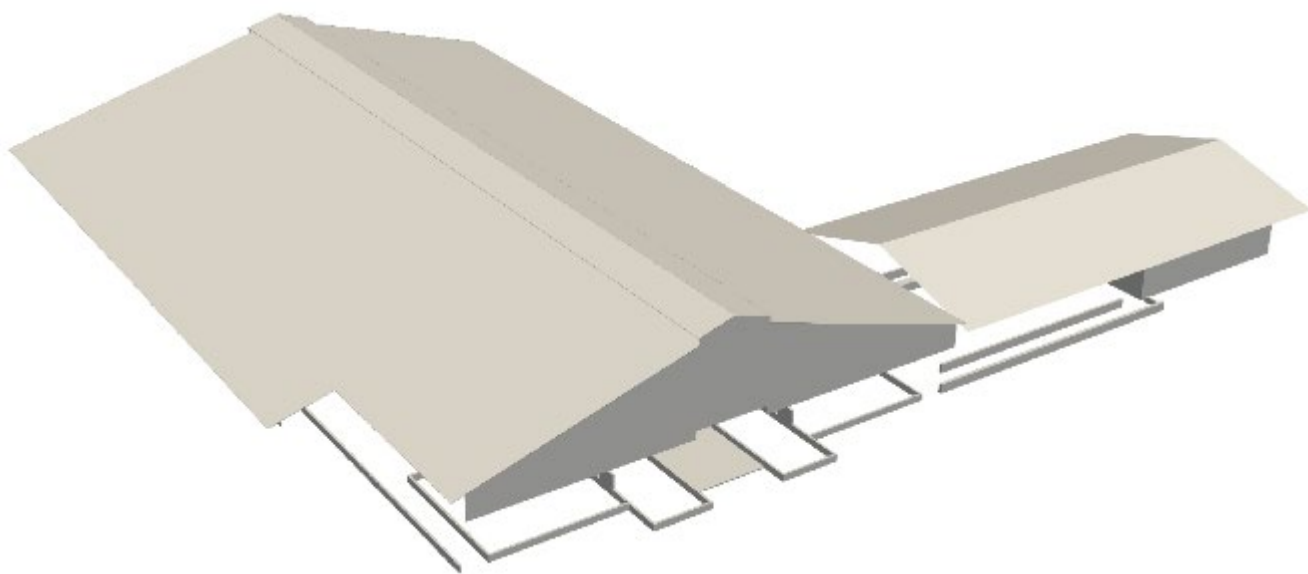


Рисунок 2.3 – Геометрія конфігурації відкритого даху

2.2 Теплове моделювання тварин

Основним викликом при моделюванні будівель для тварин є теплове моделювання тварин. Корова є основним джерелом теплового навантаження, а випаровування води через потовиділення і дихання є значним джерелом вологості. У літературі запропоновано і випробувано два різні підходи. Один із можливих варіантів – це відображення поверхні корів у сітці, а чутливі та приховані теплові навантаження можна моделювати за допомогою феноменологічних відносин для кожного механізму. Для детального моделювання можна використовувати спеціальну крайову умову, поєднану з об'єднаною моделлю теплової маси тварини. Деякі автори розробили кореляції для оцінки теплопровідності шкіри/шерсті, конвекції на поверхні і дихального об'єму. Ці кореляції можуть бути використані для розробки моделі об'єднаної теплової маси для молочних корів, проте застосування таких моделей у CFD ще не було підтверджено. Крім того, існує велика невизначеність, пов'язана з феноменологічними відносинами теплопровідності шкіри, дихання і потовиділення. З одного боку, цей підхід дозволяє детально визначати умови динаміки повітря, але з іншого – вимагає опису поверхні тварин у сітці, що значно збільшує кількість осередків. Через високу обчислювальну вартість цей підхід можна застосовувати лише за умови спрощення геометрії за допомогою площин симетрії, наприклад, у випадку поперечної механічної вентиляції.

Щоб подолати ці обмеження, було прийнято інший підхід. Форма тварин не була відображена в симуляції, натомість теплове навантаження враховувалося як рівномірно розподілені джерела енергії та води. Цей підхід уже використовувався в літературі Ікбалем та ін. і був підтверджений порівняно з підходом опису поверхні. Теплове навантаження тварин розраховувалося на основі середнього добового енергетичного балансу. Система харчування великих жуйних тварин забезпечує точний опис метаболізму молочних корів. Енергію споживання можна

оцінити на основі добового споживання сухої речовини, тоді як кількість твердих і рідких залишків можна оцінити на основі частки засвоюваних компонентів у споживанні сухої речовини. Вміст енергії в молоці оцінювався на основі добового надою і специфічної енергії молока. Вміст енергії та кількість споживання сухої речовини встановлювалися відповідно до раціону харчування тварин, що розглядаються. Добовий енергетичний баланс тварин був подібний до того, що зазначено для тварин із високим споживанням корму. Енергія, яка перетворюється на механічну роботу, не враховувалася, оскільки рух тварин обмежений протягом дня.

Метаболічну енергію можна було розрахувати як рішення добового енергетичного балансу, а потім метаболічне тепло оцінити, враховуючи його постійне утворення протягом дня. Отримане значення 1938 Вт для дійних корів добре узгоджується з оцінкою 1855 Вт, яку надав Гебрмедгін та ін. Важливо зазначити, що модель вимагає зовнішньої температури, вологості та швидкості вітру, які є результатами CFD симуляції. Щоб уникнути неявного зв'язку між моделями, були враховані не критичні зовнішні умови. Це є консервативною оцінкою: очікується, що метаболічне тепло зменшиться, якщо тварини відчувають тепловий стрес, оскільки їхнє споживання сухої речовини зменшується. Теплообмін через довгохвильове випромінювання в цьому дослідженні не враховувався. Кореляція Елтінга і Броді може бути використана для оцінки поверхні шкіри (S), припускаючи вагу тіла (BW) 600 кг, як це показано в рівнянні (2.1).

$$S = 0.147BW^{0.56} = 5.285 \quad (2.1)$$

Зовнішню температуру шкіри T_{Skin} і коефіцієнт випромінювання ϵ можна вважати рівними 34.7 °C і 0.98, як це виміряли Хакімов та ін. за допомогою термографічної зйомки. Безпечну оцінку частки метаболічного тепла (Q_{Met}), яке передається через довгохвильове випромінювання (Q_{Rad}), можна оцінити за рівнянням (2.2).

$$\frac{\dot{Q}_{Rad}}{\dot{Q}_{Met}} = \frac{\sigma \epsilon S (T_{Skin}^4 - T_{Amb}^4)}{\dot{Q}_{Met}} = 8.5 \quad (2.2)$$

σ — це стала Стефана-Больцмана, тоді як зовнішню температуру T_{Amb} було прийнято рівною 30 °C, що представляє середню випромінювальну температуру між небом і землею. У реальних умовах температура зовнішнього шару шерсті може бути нижчою. Крім того, середня температура випромінювання, ймовірно, буде вищою, оскільки значну частку кута огляду займуть інші тварини з тією самою температурою. Запропонована стратегія моделювання не підходить для застосування детальних моделей випромінювання, таких як P1 або модель видимості, оскільки поверхня тварин не характеризується в симуляції.

Значна частина теплового навантаження розсіюється через випаровування. Тому в зонах перебування тварин було враховано еквівалентне розподілене джерело води. Частка тепла, що виводиться через випаровування, була врахована відповідно до результатів, отриманих Лі та ін., використовуючи підтвержену модель об'єднаної теплової маси для молочної корови. Лі та ін. розрахували частку тепла, що передається через випаровування, як таку, що коливається між 45.7% і 57.0% протягом дня, залежно від зовнішньої температури і вологості. Виходячи з цих міркувань, було вирішено, що метаболічне тепло буде рівномірно розподілене через чутливе і приховане теплове передавання. Відповідну кількість випаруваної маси можна обчислити через приховане теплове навантаження і приховану енергію випаровування води. Розташування джерел енергії та води відповідало звичайній стратегії управління корівниками. Фрегонезі та ін. повідомляють, що молочні корови в стандартних умовах проводять від 16 до 17 годин на день у стійлі. Час, проведений тваринами в двох локаціях, був довільно розподілений наступним чином: 70% у стійлах і 30% на кормових лініях. Кількість корів на кормових лініях і в стійлах можна визначити, знаючи загальну кількість тварин у корівнику. Детальніший звіт про кількість і положення молочних корів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Положення худоби відповідно до звичайної стратегії управління корівником та відповідні джерела енергії та води

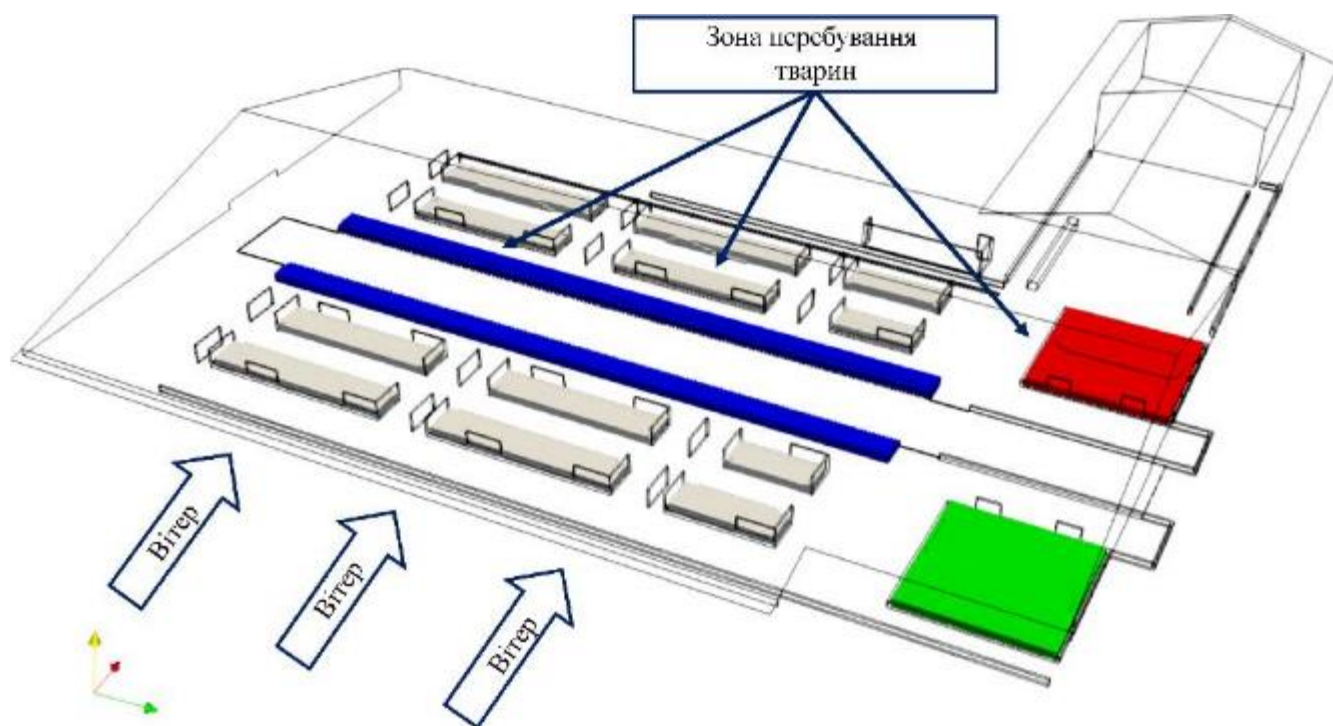
Область	Число	Стан	Метаболічне тепло	Загальне джерело енергії	Загальне джерело води
[-]	[-]	[-]	[Ш]	[кВт]	[г/с]
Стійла	70	Лактація	1938	67.83	27.92
Лінія годівлі	30	Лактація	1938	29.07	11.96
Передпологовий бокс	6	Сухостій	1197	3.59	1.48
Післяпологовий бокс	6	Рання лактація	1357	4.07	1.68

2.3 Моделювання потоку повітря

Вітер відіграє значну роль і може сильно впливати на кратність повітрообміну, оскільки досліджувана будівля має великі отвори по периметру. Важливо враховувати сусідні будівлі та перешкоди в моделюванні, оскільки вони можуть впливати на навколишній потік повітря. З цієї причини бічна будівля була змодельована разом із основним корпусом корівника. Було прийнято логарифмічний профіль швидкості на вході разом із умовою ковзання на бічних межах. Швидкість на вході відповідає стандартній теорії атмосферного прикордонного шару (ABL) з постійним зсувним напруженням у вільному потоці. Як пропонують Харгрейвс та ін., до верхньої межі було застосовано рівномірний градієнт швидкості, обчислений із зсувного напруження. Швидкість вітру була прийнята на рівні 2 м/с на висоті 25 м зі східно-західним напрямком відповідно до середніх метеорологічних даних за розглянутий період часу. Напрямок вітру в обчислювальній області можна побачити на рисунку 2.4.

Відносний кут між будівлею та вітром можна налаштувати, обертаючи геометрію корівника, замість зміни меж. У моделюванні з активною

вентиляційною системою очікуються області з високою швидкістю та підвищеним числом Рейнольдса.



Стійла позначено сірим кольором, кормові лінії – синім, передпологовий бокс – зеленим, післяпологовий бокс – червоним

Рисунок 2.4 – Розташування джерел енергії та води

У цих симуляціях використовувалася турбулентна модель $k-\epsilon$, але характеристики моделі було відкориговано для правильного опису атмосферного прикордонного шару. Кінетична енергія турбулентності та швидкість дисипації на поверхні входу вітру було змодельовано за допомогою неоднорідних профілів відповідно до теорії ABL (`atmBoundaryLayerInletK` і `atmBoundaryLayerInletEpsilon`). Турбулентна модель $k-\epsilon$ з додатковими термінами генерації/дисипації для плавучості (`buoyantKEpsilon`) використовувалася в тому випадку, якщо природна конвекція є основним рушієм руху повітря в домені. Незважаючи на те, що велика частина домену, ймовірно, перебуває в ламінарному

стані, швидкість повітря може створювати турбулентність, тому необхідно використовувати спеціальну модель. Як у зимових, так і в літніх умовах застосовувалося високорейнольдсове оброблення стін через великий розмір комірок. Наприкінці симуляції було перевірено, що значення u^+ перевищують критичне значення 30 на всіх поверхнях, за винятком деяких обмежених точок застою.

2.4 Оцінка комфорту тварин

Наприкінці CFD моделювання були відомі розподіли температури і вологості з високою просторовою деталізацією. Оцінка теплового комфорту тварин може бути виконана шляхом аналізу індексу температурно-вологісного співвідношення (ТНІ). Цей індекс широко використовується і значною мірою корелює з такими важливими фізіологічними показниками корів, як частота дихання, частота серцевих скорочень, ректальна температура та молочна продуктивність. Незважаючи на широке використання ТНІ в літературі для оцінки теплового комфорту корів, він має суттєві недоліки. Вентилятори для рециркуляції збільшують тепловіддачу від тварин шляхом підвищення швидкості повітря на поверхні шерсті корів. Хоча швидкість повітря є важливим фактором теплового комфорту молочних корів, вона не впливає на ТНІ. Крім того, індекс температурно-вологісного співвідношення спочатку був визначений на основі зовнішніх даних, які не є описовими для умов повітря поблизу тварин, що призводить до упередженої оцінки комфорту тварин. ТНІ обчислюється за визначенням, і порогові значення для початку помірної та сильного теплового стресу становлять 72 і 80.

$$TNI = (1.8 T_{DB} + 32) - 0.0055 (100 - RH) (1.8 T_{DB} - 26) \quad (2.3)$$

T_{DB} — температура сухого термометра в °С, а RH — відносна вологість у відсотках.

2.5 Сонячне випромінення

Влітку теплове навантаження, пов'язане з сонячним випроміненням, очікувано має важливе значення. На тварин не потрапляє пряме опромінення, оскільки стійла розташовані в затінених місцях. Проте сонячне випромінення, ймовірно, підвищує температуру повітря локально, і гаряче повітря може проникати всередину будівлі через отвори по периметру або щілини в даху. Додатковий вплив сонячного випромінення пов'язаний з теплопровідністю через дах корівника. Дах був змодельований як теплопровідна перегородка з термічним зв'язком між внутрішніми та зовнішніми температурами поверхні. Тепловий опір усіх відкритих поверхонь вважався рівним $4,17 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, як зазначено виробником панелей. Внутрішні та зовнішні температури поверхні були розраховані на основі локальних енергетичних балансів з урахуванням теплопровідності в панелях. Положення сонця було взяте на 1 серпня о 14:00, коли нормальне пряме випромінювання дорівнювало 500 Вт/м^2 , а частка хмарного покриву становила 0,1. Положення сонця було розраховане відповідно до реального географічного розташування корівника з широтою $45,00^\circ$ та довготою $9,70^\circ$.

Симуляція сонячного теплового навантаження була виконана за допомогою спеціальної моделі випромінювання (solarLoad). Тепловий потік випромінювання був змодельований як джерело на відкритих поверхнях з урахуванням корекції для кута між нормаллю поверхні та напрямком променя. Через наявність площин з різними нахилами джерело мало унікальні значення на поверхнях, як показано на рисунку 2.5. Інтенсивність теплового потоку від сонця була рівномірною, оскільки всі поверхні даху були плоскими. Хоча корови не піддавалися прямому сонячному опроміненню, відбите випромінювання могло бути важливим для теплопередачі тварин. Цей побічний ефект сонячного випромінювання не можна було оцінити, оскільки тварини були змодельовані без опису їх поверхонь теплопередачі.

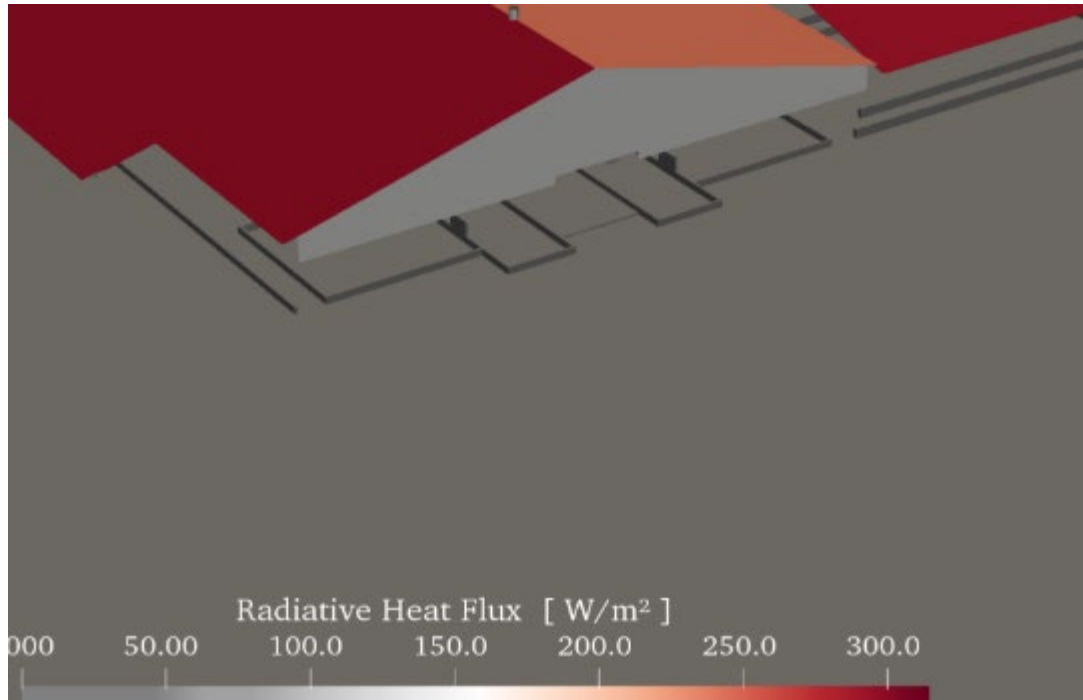


Рисунок 2.5 – Інтенсивність змодельованого теплового потоку від сонця на даху будівлі 1 серпня о 14:00

2.6 Кратність повітрообміну і вентиляція

Важливим фактором для оцінки ефективності систем вентиляції є годинна кратність повітрообміну (ACR).

$$ACR = \frac{\dot{V}}{V} \left[\frac{1}{h} \right] \quad (2.4)$$

де \dot{V} — годинна витрата повітря на вході в м³/год, а V — об'єм внутрішнього простору корівника в м³. ACR є ключовим фактором для спрощених моделей, заснованих на масовому та енергетичному балансі всієї будівлі. Крім того, проєктні рекомендації для систем вентиляції часто містять мінімальні та максимальні значення ACR для забезпечення належної якості повітря та обмеження викидів забруднювачів. У CFD-симуляціях потік повітря описується з високою деталізацією, тому розрахунок ACR є непростим завданням. Розрахунок

витрати повітря на вході може бути виконаний за допомогою рівняння (2.5), оскільки одночасно можуть бути присутні потоки на вході і виході.

$$ACR = \frac{1}{7200V} \int_A | \vec{u} \cdot \vec{n} | dA' \quad \left[\frac{1}{h} \right] \quad (2.5)$$

де V — об'єм внутрішнього простору корівника в м^3 , A — площа периметру в м^2 , u — швидкість повітря в м/с , а n — нормаль до поверхні.

2.7 Погодні умови

Для повного опису теплової поведінки будівлі було змодельовано дві різні метеорологічні умови. Спочатку були проаналізовані гіпотетичні зимові умови, а потім більш реалістичні літні погодні умови. Для зимових умов зовнішню температуру було встановлено на рівні 5°C з відносною вологістю 40%. У цих симуляціях було враховано вентиляцію, викликану вітром, та сонячне випромінення. Очікувалося, що система вентиляції буде вимкнена, оскільки зовнішні умови не є критичними для молочних корів. Зимові умови можуть мати місце, але вони мало ймовірні, оскільки сонячне випромінення або вітер часто присутні. Тим не менш, ці симуляції мають важливе інженерне значення, оскільки вентиляція забезпечується лише природними конвективними потоками. Тому кратність повітрообміну досягла мінімального можливого значення, забезпечуючи важливу базу для оцінки впливу системи вентиляції. Мінімальна кратність повітрообміну може бути також важливою для оцінки якості повітря в корівнику. Єдиними вентиляційними пристроями, які вважалися активними в зимових умовах, були димарі, оскільки вони працюють постійно незалежно від зовнішніх умов. У літній симуляції були враховані всі змодельовані фактори: система вентиляції працювала на максимальній швидкості, був присутній вітер і сонячне випромінення. Зовнішня температура була прийнята на рівні 30°C з відносною

вологістю 55%. Варто зазначити, що ці зовнішні умови є критичними, і молочні корови за межами корівника, ймовірно, страждатимуть від теплового стресу.

Це дослідження може мати позитивний вплив на фермерську галузь, якщо CFD дозволить виробникам корівників проєктувати більш ефективні та енергоощадні системи вентиляції. Для оцінки можливостей розробленої моделі з надання корисних рекомендацій було проаналізовано приклад проєктного рішення. Корівник обладнаний 5 електричними вентиляторами, які замінюють традиційний відкритий гребінь даху. Це інноваційне рішення було порівняне з традиційною конфігурацією, щоб оцінити, яке рішення є більш ефективним для поліпшення теплового комфорту тварин. Усі інші впливові явища, такі як теплові навантаження, вітер та вентилятори рециркуляції, були залишені незмінними в цьому аналізі.

2.8 Пристрої для зменшення теплового стресу

Для правильного прогнозування теплового комфорту тварин необхідно враховувати вплив пристроїв для зменшення теплового стресу. Тому вентилятори, димарі та інші вентиляційні пристрої мають бути змодельовані та включені в симуляцію. Корівник має 12 високошвидкісних бокс-вентиляторів, 19 високошвидкісних вентиляторів, 2 низькошвидкісних вентилятори великого обсягу та 5 витяжних. Вентилятори змодельовані у вигляді дископодібних циклічних патчів, тоді як потужні вентилятори були розглянуті як циліндри з бічними стінками та циклічними патчами на обох кінцях. Вентилятори моделювалися за допомогою граничної умови вентилятора OpenFOAM, тоді як димарі були змодельовані за допомогою uniformJumpAMI. Циклічні патчі були прийняті для вентиляторів, оскільки це двомірні поверхні з спільними гранями, і було забезпечено ідеальне співпадіння між точками.

Димарі були змодельовані за допомогою АМІ патчів, оскільки вхідні та вихідні отвори є відокремленими поверхнями, які не ідеально вирівняні. Для обох типів вентиляторів був застосований постійний перепад тиску між з'єднаними гранями, щоб змодельовати присутність машини. Виробник не надав криву продуктивності для вентиляторів рециркуляції; проте перепад тиску може бути оцінений на основі тяги в нормальних експлуатаційних умовах (тобто при відкритих межах). Перепади тиску для кошикових і бокс-вентиляторів становили 112,76 та 107,39 м²/с², тоді як для вентиляторів HVLS і витяжних вентиляторів — 14,35 та 86,77 м²/с². Момент, витрата, температура, вологість та турбулентні характеристики зберігалися через поверхні вентиляторів. Система управління вентиляторам дозволила частково змінювати швидкість обертання вентиляторів та планувати активні та неактивні часові інтервали. Розроблена CFD модель здатна симулювати всі можливі ситуації, але симуляції проводилися для найгірших умов, коли машини працюють безперервно на максимальній швидкості.

2.9 Методика створення сітки

Розмір і якість сітки мають значний вплив на обчислювальні витрати та точність результатів; тому особлива увага була приділена дискретизації в методі скінченних об'ємів. В залежності від погодних умов були прийняті дві різні стратегії створення сітки. У всіх випадках використовувалися незструктуровані гексадомінантні сітки. У літніх симуляціях область була квадратною для моделювання атмосферного граничного шару з визначеними входами та виходами. Оскільки корівник має великі вікна по периметру, необхідно було включити велику відкриту зону навколо будівлі. Основна частина будівлі має висоту 10,3 м і простягається приблизно на 70 і 45 м у горизонтальних напрямках. Tomioka та ін. надають рекомендації щодо застосування CFD для вітрового потоку навколо будівель. Tomioka та ін. рекомендують приймати вертикальний

простір над дахом, рівний 5 висотам будівлі. Згідно з цими рекомендаціями, горизонтальна відстань між перешкодою та межами повинна бути максимальною і становити 2,3 ширини будівлі або 5 висот. Крім того, для напрямку виходу рекомендовано вільний простір, рівний 15 висотам. Дотримуючись цих рекомендацій, корівник було розміщено в центрі розширеної області, яка вимірювала 400 м у горизонтальних напрямках та 60 м у висоту. Граничні розміри, розраховані за цими рекомендаціями, були округлені для отримання квадратної області та відповідності бажаному розміру комірок фонові сітки. Щоб змодельовати різні кути між корівником і вітром, корівник був розміщений у центрі циліндричної АМІ поверхні з радіусом 120 м. Якщо потрібен був інший напрямок вітру, було достатньо виконати обертання центральної поверхні без повторення всього процесу створення сітки. Це рішення особливо підходить, якщо середній напрямок вітру невідомий, і потрібен аналіз чутливості. У зимових умовах повітряний потік був зумовлений природними конвективними потоками, які мають вгору основний напрямок. У цій конфігурації сітка була циліндричною з радіусом 160 м, а верхня межа піднята до 160 м. Оскільки вихід очікувався на верхній межі, над дахом залишили вільний простір, що дорівнює 15 висотам будівлі. Для зменшення обчислювальних витрат на симуляцію та забезпечення максимальної деталізації всередині будівлі використовувався змінний розмір комірок. Далеко від корівника середній розмір комірки становив 5 м, тоді як всередині корівника — 0,25 м (0,125 м біля стін і вентиляторів). Незалежність результатів від розміру сітки не досліджувалася, але симуляції проводилися з найменшим можливим розміром комірок у межах прийняттого обчислювального часу та використання пам'яті. Крім того, Nong та ін. вже провели детальний аналіз чутливості сітки для моделювання природно провітрюваних корівників за допомогою коду OpenFOAM.

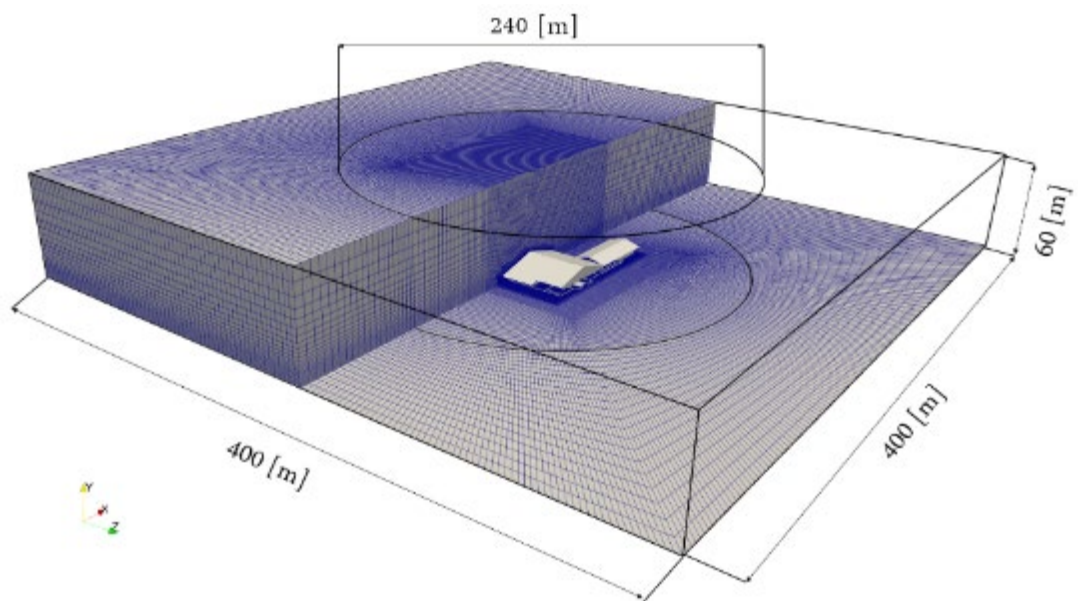


Рисунок 2.6 – Сітка та обчислювальна область для симуляції літньої погоди

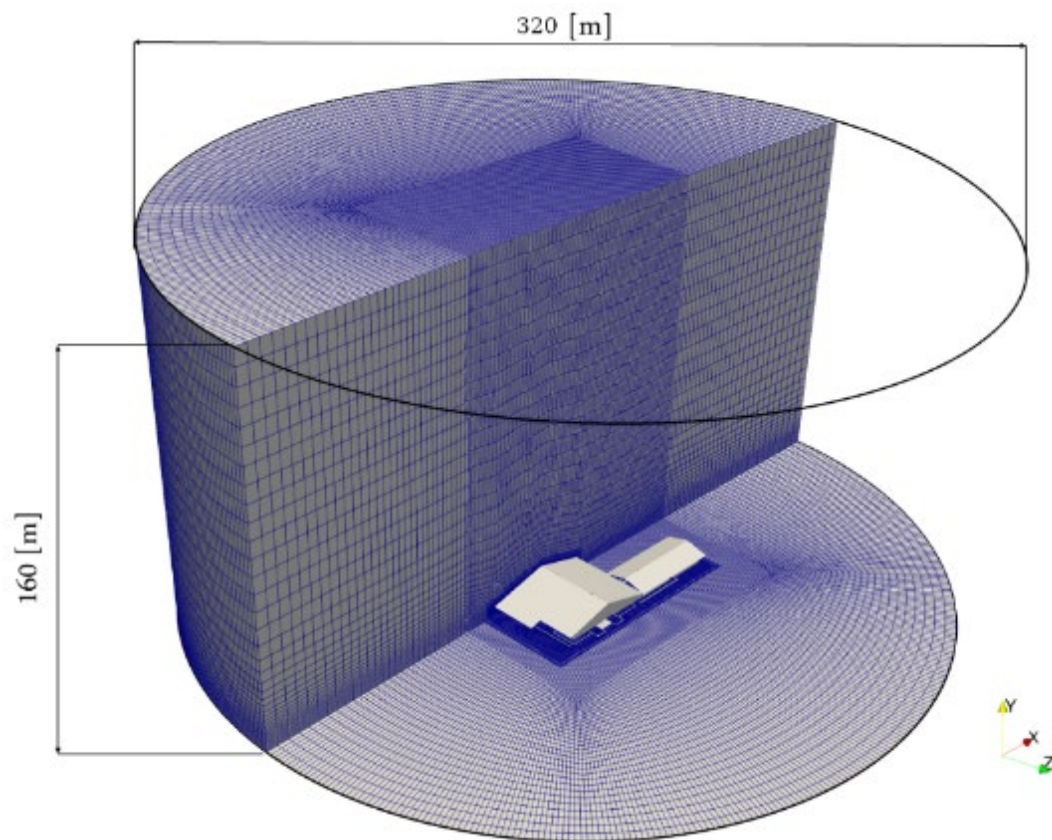


Рисунок 2.7 – Сітка та обчислювальна область для симуляції зимової погоди

Hong та ін. дійшли висновку, що оптимальний розмір сітки коливається між 0,5 і 0,25 м, залежно від обробки турбулентності біля стін. Фонова сітка була визначена відповідно до основних геометрій корівника. Це допомагає зменшити кількість комірок та обчислювальні витрати; більше того, це сприяє досягненню вищої якості сітки. Усі чотири сітки були створені відповідно до суворих якісних критеріїв для досягнення точних результатів і стабільної чисельної поведінки. Така ж стратегія створення сітки була використана як для закритих, так і для відкритих конфігурацій дахів, і тільки геометрії дахів відрізнялися. В залежності від геометрії та погодних умов кожна сітка містила від 5 до 5,5 мільйона комірок. Сітки та обчислювальні області для конфігурації закритого даху в літню та зимову погоду зображені на рисунку 2.6 та рисунку 2.7.

2.10 Методика розв'язання

Моделювання виконувалось за допомогою спеціального розв'язувача на основі припущення про нестиснені гази (рідини). Очікується, що стискуваність буде обмеженою, оскільки максимальне число Маха матиме дуже низькі значення. Незважаючи на обмежені варіації, опис конвективного потоку вимагає змінної густини для моделювання зміни гравітаційної сили між регіонами з різними температурами. Розроблений розв'язувач моделює наявність диференційованої гравітаційної сили через змінну масову силу, яка не залежить від густини, а безпосередньо від локальної температури. Залежність сил від тяжіння і від тиску була проігнорована, оскільки в межах області очікуються мінімальні варіації. Ця стратегія розв'язання базується на апроксимації Буссінеска і широко використовується для задач теплопередачі. Розв'язувач включає вплив транспорту вологи, оскільки це важливий фактор для оцінки комфорту тварин. Моделювання транспорту речовин у рамках незжатого розв'язувача не є тривіальним; тим не менш, у вивченому випадку можна зробити два спрощення. Значення масової

частки води, ймовірно, будуть обмеженими з мінімальним впливом на термофізичні властивості повітря; крім того, можна вважати, що це бінарна суміш вода-повітря. На основі цих припущень, вологість моделювалася як транспортоване поле, яке накладається після розв'язання рівнянь імпульсу та температури. Вплив масової частки води на зміну властивостей повітря був проігнорований; тим не менш, прийняті постійні значення відповідають зовнішньому вологому повітрю, а не сухому. Обчислена масова частка води була обмежена нижньою фізичною межею конденсації, але цього явища не очікується в моделюваннях.

$$\frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial t} + \nabla \cdot (u Y_{H_2O}) - \nabla \cdot \left(\frac{\alpha_{Eff}}{Le} \nabla Y_{H_2O} \right) = S_T \quad (2.6)$$

де Y_{H_2O} — масова частка води, u — швидкість повітря в м/с, α_{Eff} — ефективна теплопровідність, Le — число Льюїса для водяної пари-повітря, а S_T — локальний об'ємно-специфічний джерельний термін, який використовується для моделювання латентного навантаження тварин за методологією, описаною раніше. Розглянуте число Льюїса було прийнято за 0.809 у зимових умовах, в той час як у літньому моделюванні воно дорівнювало 0.814. Усі моделювання виконувались за допомогою чисельної схеми другого порядку, за винятком часу, який дискретизувався за допомогою схеми Ейлера першого порядку. Використання схеми першого порядку для часу не впливає на кінцеві результати, оскільки моделювання досягне стаціонарного стану при збіжності. Оскільки варіації температури, тиску та вологості обмежені, зміни теплофізичних властивостей можна вважати незначними. Постійні значення використовувалися для всіх теплофізичних властивостей; однак для зимових та літніх умов використовувалися різні значення. Коефіцієнт об'ємного розширення, що використовувався в апроксимації Буссінеска для конвекції, був обчислений аналітично за рівнянням стану досконалого газу. Узагальнення теплофізичних властивостей наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Теплофізичні властивості повітря

Теплофізичні властивості	Одиниця виміру	Зимова погода	Літня погода
Щільність	кг/м ³	Не потрібен	1,1641
Питома теплоємність	Дж/кг К	Не потрібен	1007
Кінематична в'язкість	м ² /с	$1,382 \times 10^{-5}$	$1,608 \times 10^{-5}$
Коефіцієнт розширення	1/К	$-4,562 \times 10^{-3}$	$-3,841 \times 10^{-3}$
Еталонна температура	К	278,15	303,15
Число Прандтля	–	0,735	0,728
Число Льюїса	–	0,809	0,814

Корівник моделювався як перехідна система з постійними граничними умовами, поки не було досягнуто стаціонарного розв'язання. В кожній ітерації розв'язання тиск розв'язувався за допомогою геометричного–алгебраїчного многосіткового (GAMG) розв'язувача з абсолютною точністю 1×10^{-7} . Збіг кожного кроку часу перевірявся через абсолютний контроль залишку 1×10^{-5} для тиску, температури та швидкості. Максимальна температура в зонах, зайнятих тваринами, та середній тиск на східному патчі контролювались для перевірки досягнення стаціонарного стану. У зимових умовах також контролювалось середнє значення витрати повітря, що виходить з верхньої границі. Для цих змінних використовувався відносний допуск 1×10^{-3} як критерій збіжності. Було помічено, що модель, досягає стійкого розв'язання протягом 15 хвилин симуляційного часу в літніх умовах і 1 години в зимових. Ця різниця пояснюється різною швидкістю зміни повітря, що суттєво скорочує характерний тепловий час між двома конфігураціями. У зимових умовах крок часу дорівнював 1 с, але в літніх умовах його потрібно було зменшити до 0,1 с через наявність швидкісних потоків, що генеруються вентиляторами. Оскільки було прийнято підхід від перехідного до стаціонарного стану, розмір кроку часу не впливав на результати моделювання в стаціонарному стані. Крок часу поступово знижувався, поки не було досягнуто компромісу між числовою стабільністю та вартістю симуляції.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ПРИМІЩЕННІ ДЛЯ УТРИМАННЯ КОРІВ

3.1 Моделювання в зимових погодних умовах

Симульовану динаміку повітря в корівнику в зимових погодних умовах було проаналізовано для обох геометрій корівника. Симульоване поле швидкостей на вертикальному перерізі в середній площині (при $z = 0$ м) корівнику для геометрії з закритим дахом представлено на рисунку 3.1, тоді як поля температури та масової частки води можна побачити на рисунках 3.2 і 3.3. Такий же аналіз наведено на рисунках 3.4, 3.5 та 3.6 для конфігурації з відкритим дахом. На рисунку 3.1 видно, що гаряче повітря з зони, зайнятої тваринами, піднімається вгору через дію архімедової сили до коника даху. Гарячий потік з стійлах створює підйомний потік в центрі корівника, який заганяє свіже повітря ззовні. Це явище може бути шкідливим у дуже холодних умовах; проте ймовірність виникнення холодного стресу невелика. Тому використання периметрових штор може бути корисним, особливо в більш суворих кліматичних умовах. Обчислена годинна швидкість обміну повітря для геометрії з закритим дахом становить 10,81 1/год. Це значення добре узгоджується з вимірюваннями 4,3–14,5 1/год, виконаними Snell та ін., хоча геометрія корівника була іншою, і присутня мінімальна швидкість вітру. У конфігурації з закритим дахом гаряче і вологе повітря має тенденцію накопичуватися під дахом, створюючи велику зону стагнації. Модель прогнозує утворення витоків у верхніх частинах бічних отворів; однак переважний витік спостерігається з правого боку. Крім того, потоки, що викликані архімедовою силою, не є точно симетричними щодо осі корівника. Цей ефект зумовлений геометрією даху корівника: отвір на східній стороні на 1 м вищий, ніж на західній, що призводить до асиметричного поля швидкостей. Під час зими вентилятори працюють постійно, але їх продуктивність недостатня для викиду всіх потоків, що

виникають внаслідок архімедової сили, і важливий витік з периметрових вікон все ще присутній.

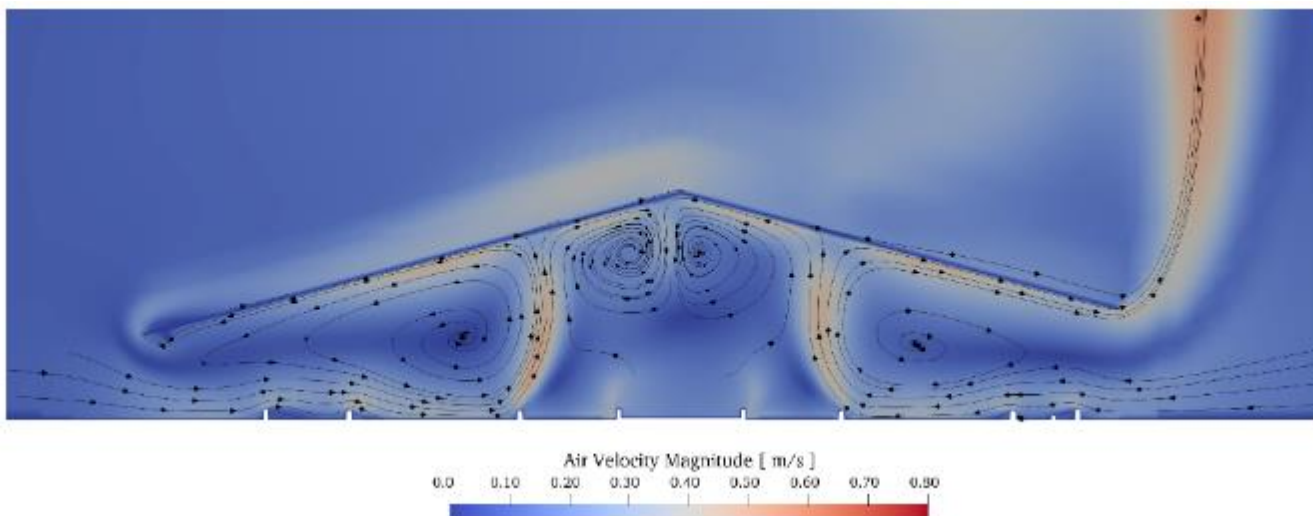


Рисунок 3.1 – Поле швидкостей та лінії потоків для конфігурації із закритим дахом у зимових умовах

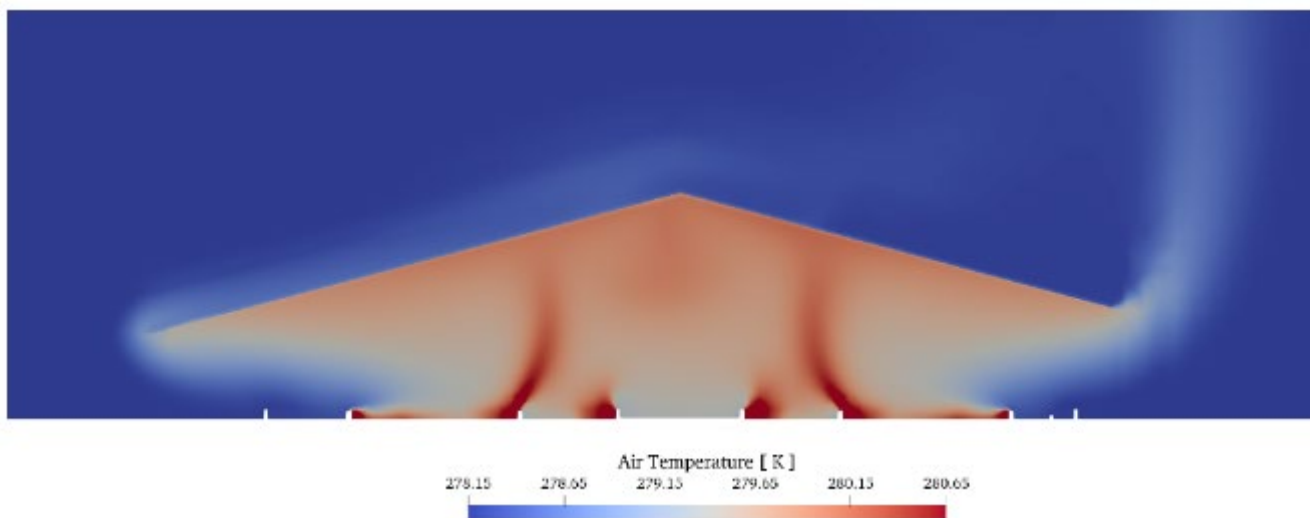


Рисунок 3.2 – Температурне поле для конфігурації із закритим дахом у зимових умовах

На рисунках 3.2 і 3.3 видно, що присутність архімедової сили викликає вертикальну стратифікацію температури повітря та масової частки води. Подібний ефект спостерігався у будівлі Чена та ін. Той же аналіз можна повторити для

конфігурації з відкритим дахом.

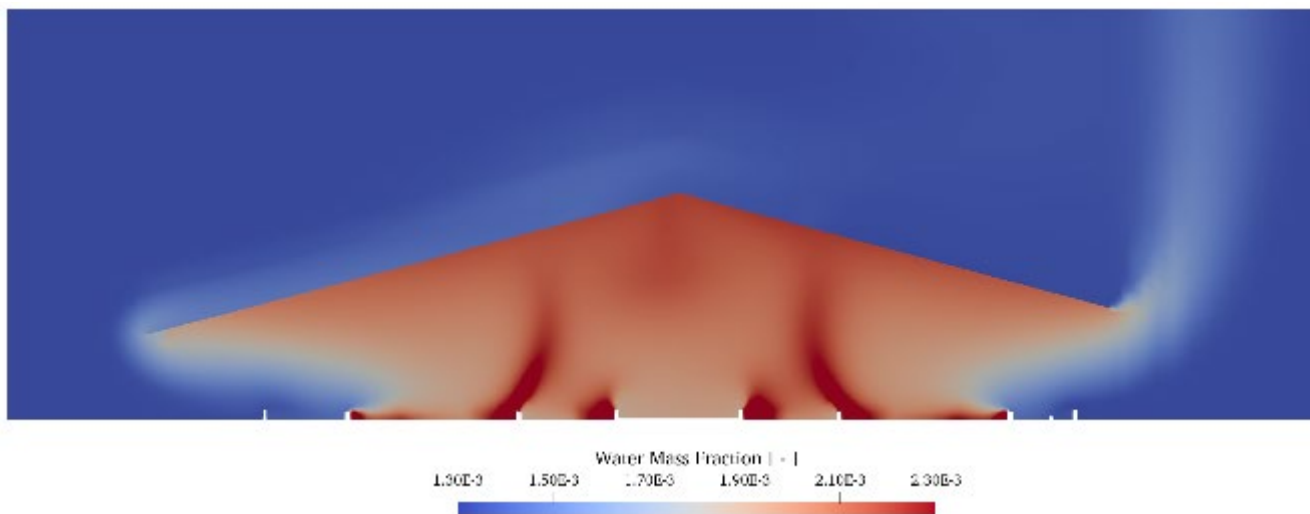


Рисунок 3.3 – Поле вологості для конфігурації із закритим дахом у зимових умовах

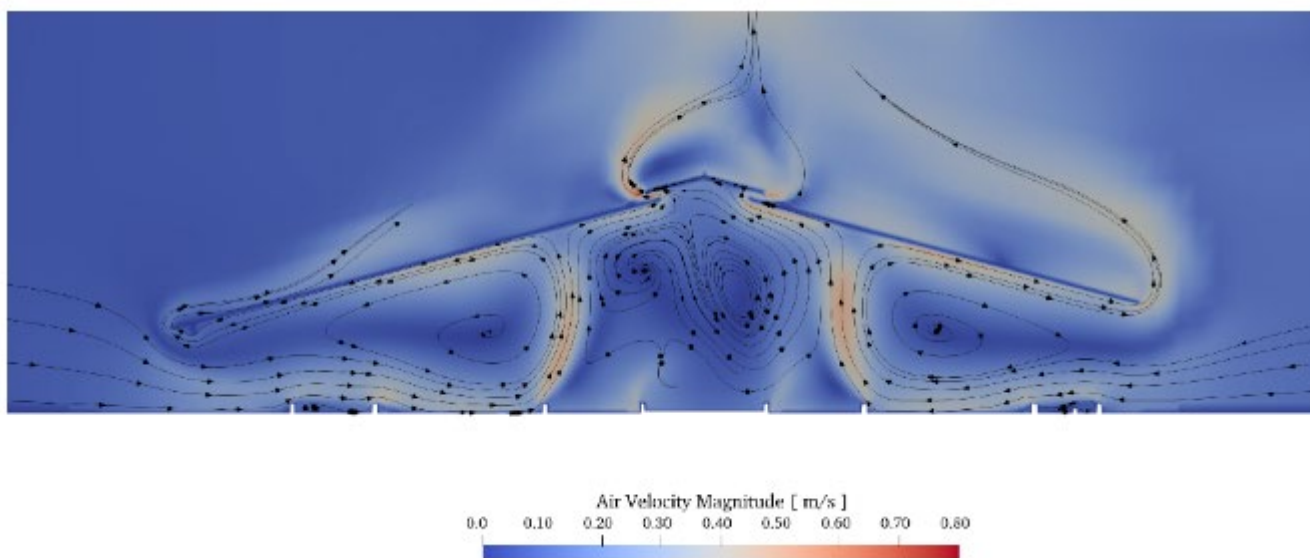


Рисунок 3.4 – Поле швидкостей та лінії потоків для конфігурації із відкритим дахом у зимових умовах

Як і в закритій геометрії, потоки, що викликані архімедовою силою, присутні в центральній частині корівника, а гаряче повітря накопичується під дахом. Наявність щілин на конику створює витік з даху через вищі температури

повітря; проте обмежена швидкість потоку проходить через ці отвори.

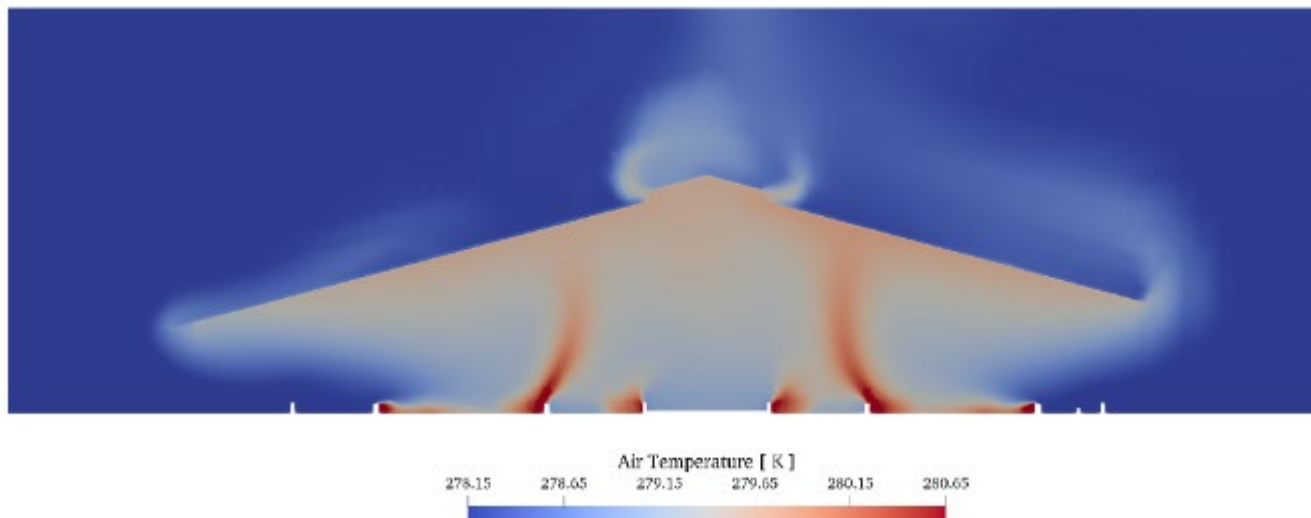


Рисунок 3.5 – Температурне поле для конфігурації із відкритим дахом у зимових умовах

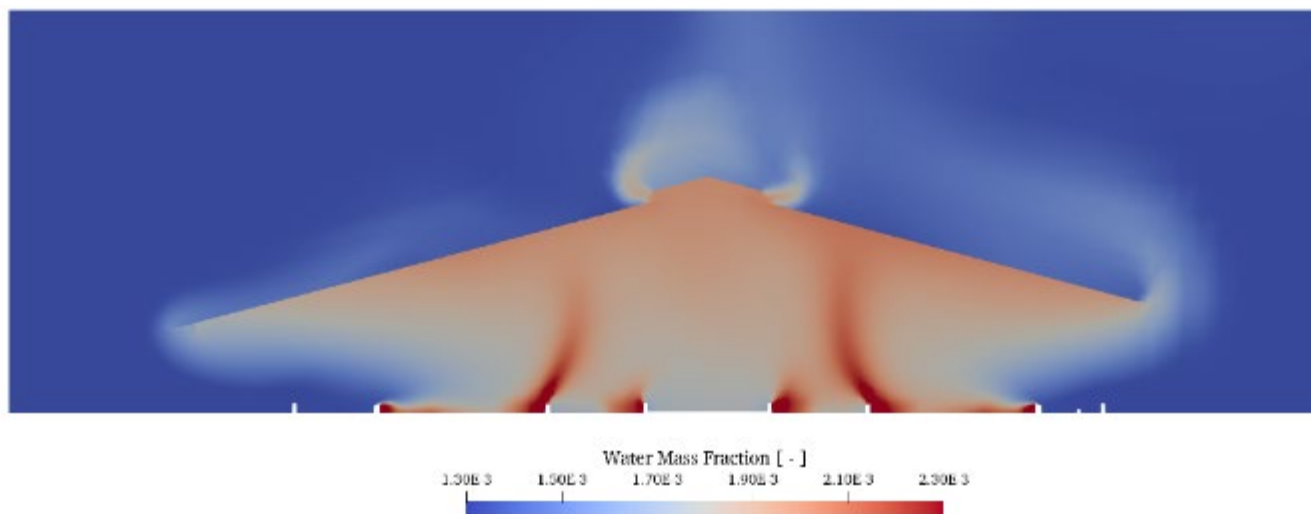


Рисунок 3.6 – Поле вологості для конфігурації із відкритим дахом у зимових умовах

Навіть якщо витяжні вентилятори прискорюють повітря на великій швидкості, площа потоку через щілини на конику набагато більша, а об'ємна швидкість вхідного потоку подібна. У цій конфігурації обчислена годинна швидкість обміну повітря становить 11,08 1/год: конфігурація з відкритим дахом забезпечує вищу швидкість вхідного потоку, але збільшення є мінімальним у

порівнянні з референтним випадком. У обох випадках основним джерелом швидкості обміну повітрям є витік з правого боку, а вентиляційне рішення для даху, буде незначно впливати.

Рішення з вентиляторами може бути корисним у холодніших кліматах, оскільки воно дозволяє частково регулювати швидкість повітряних потоків і підвищувати внутрішні температури, щоб уникнути холодного стресу. Як зазначили Snell та ін. і Teue та ін., з нижчими швидкостями потоків якість повітря може стати важливою, і спеціалізована модель могла б бути включена в симуляцію. Оскільки обчислена швидкість обміну повітрям вища за рекомендації з якості повітря, в даному дослідженні не було включено аналіз забруднюючих речовин, таких як метан чи аміак, а початок теплового стресу є найсуворішим критерієм для вентиляції. Транспорт забруднюючих речовин може бути проігноровано, оскільки годинна вентиляція, забезпечена лише природною вентиляцією, вдвічі перевищує мінімальну рекомендацію з якості повітря.

3.2 Моделювання в літніх погодних умовах

Симульовану динаміку повітря вентиляційної системи було досліджено для обох рішень. Результати симуляції представлені на п'яти вертикальних поверхнях, які знаходяться на відстані 15 м одна від одної, а також на горизонтальній поверхні на висоті 0,5 м від землі. Рисунок 3.7 показує поле швидкостей для конфігурації з закритим дахом, тоді як рисунки 3.8 і 3.9 ілюструють температури та масові частки води. Позицію рециркуляції можна ідентифікувати за допомогою плям з дуже високою швидкістю повітря. Помітно, що швидкі повітряні потоки присутні над лінією годівлі та в зонах, зайнятих тваринами. Поведінка потоків, викликаних вентиляторами, подібна до описаної Pakari та Ghani у механічно вентиляваному корівнику. Розташувавши всі вентилятори в одному напрямку, можна викликати всмоктування повітря, характерне для гібридних вентиляційних

систем. Макроскопічний однонаправлений потік чітко видно на рисунку 3.7; отже, досліджена конфігурація вентиляторів виглядає дуже ефективною. На рисунку 3.10 представлено поле швидкостей на горизонтальній поверхні на висоті 2 м, і витік, викликаний вентиляторами, можна чітко побачити. Обчислена годинна швидкість обміну повітря дорівнює 80,70 1/год, що в вісім разів перевищує зимове значення. З аналізу температурного поля зрозуміло, що в зонах, зайнятих тваринами, присутня сильна неоднорідність. Внутрішні стіни створюють зони стагнації з дуже низькими швидкостями і обмеженою локальною швидкістю обміну повітрям. Одночасна наявність мінімальної локальної швидкості обміну повітрям і навантаження від корів передбачає створення плям з підвищеною температурою та вологістю. Іншими словами, вентиляційна система в середньому утримує температури в межах, але є зони з підвищеним теплом. В літніх умовах також присутній вітер, який викликає значний зсув потоків повітря на вітрових лініях вентиляторів. Це може бути проблематичним, оскільки повітряні потоки вентиляторів відхиляються від бажаного шляху і не надають більше швидкого повітря для вітрових ліній стійлах. Наявність теплового навантаження тварин викликає підвищення температури в стійлах, лініях годівлі та ящиках. У літніх умовах також враховується сонячне випромінення, внаслідок чого біля даху корівника можна помітити сильне підвищення температури повітря. Помітне підвищення температур спостерігається з правого боку корівника, оскільки всмоктування повітря затягує гаряче повітря з даху. Створення зони рециркуляції з підвітряного боку корівника раніше було описано Wu та ін. та Janke та ін. На відміну від природно вентиляованих корівників, описаних у літературі, зона стагнації викликається всередині корівника вентиляційними пристроями. Зсув повітря з вентиляторів і приплив гарячого повітря є двома важливими перехресними ефектами, які можуть бути присутніми в будівлях з гібридною вентиляцією.

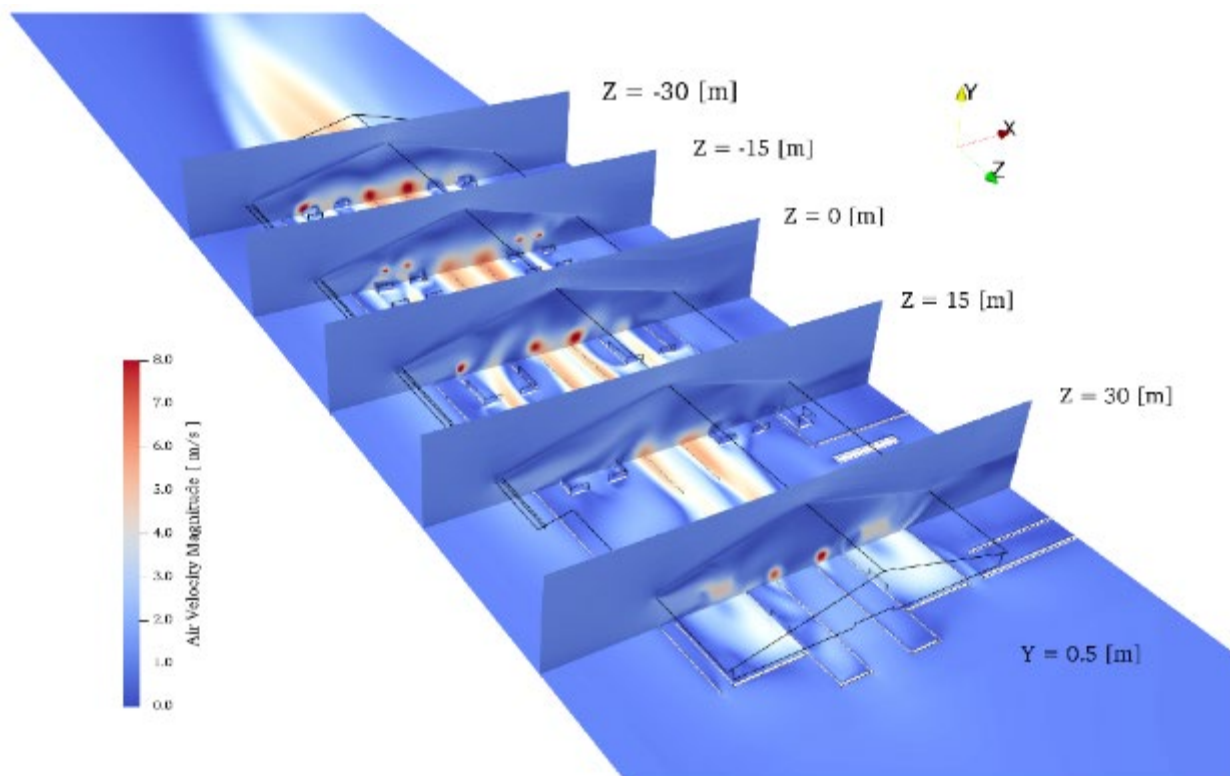


Рисунок 3.7 – Поле швидкостей для конфігурації з закритим дахом у літніх умовах

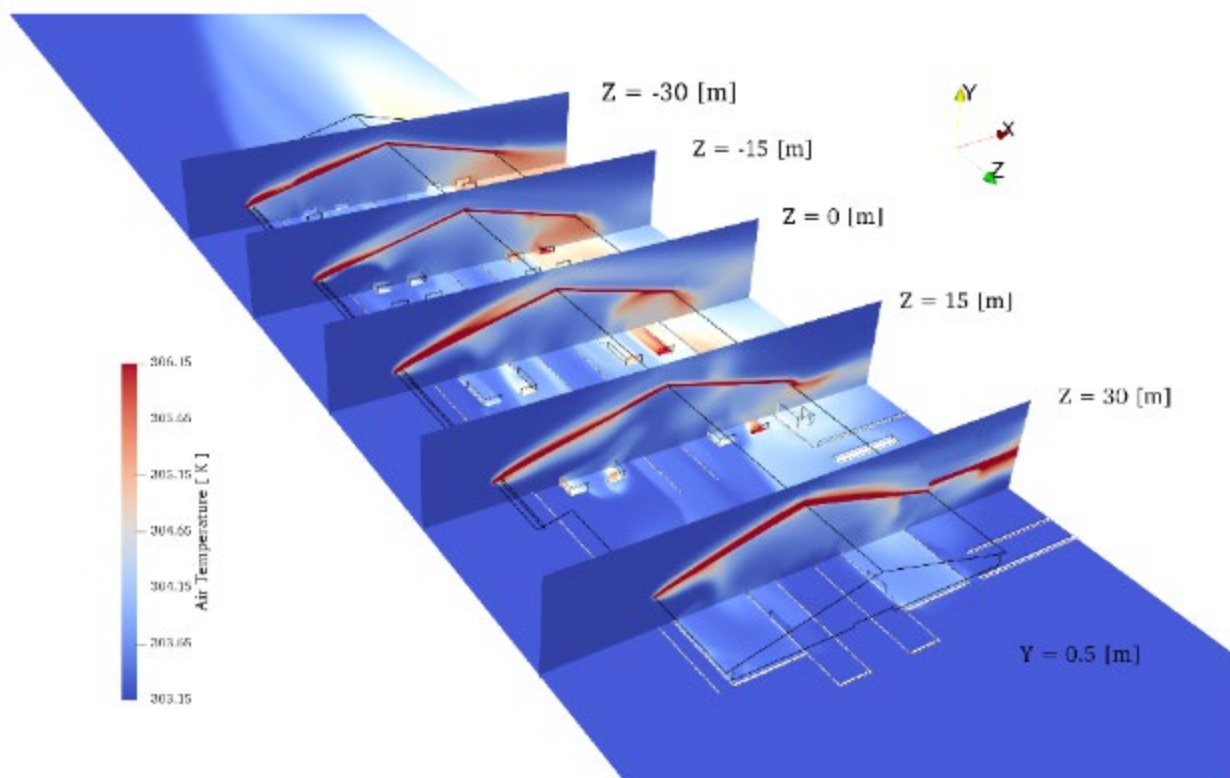


Рисунок 3.8 – Температурне поле для конфігурації з закритим дахом у літніх умовах

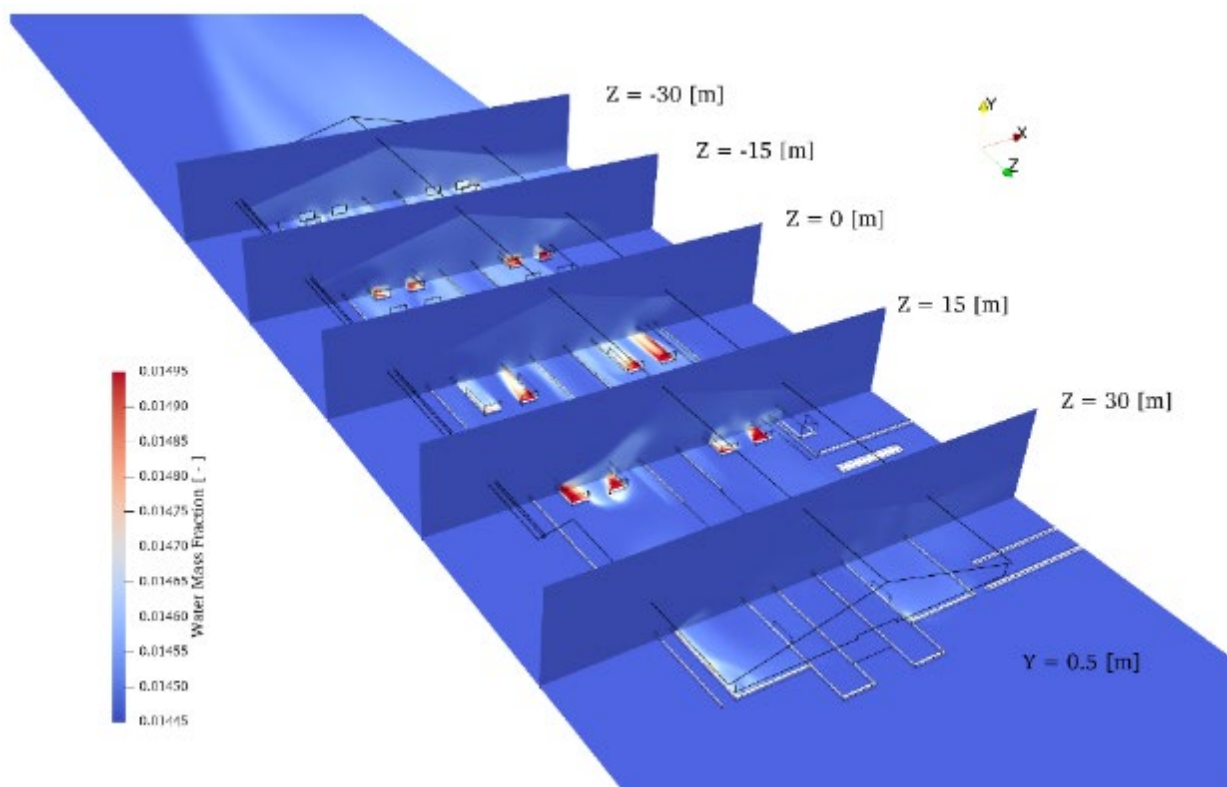


Рисунок 3.9 – Поле вологості для конфігурації з закритим дахом у літніх умовах

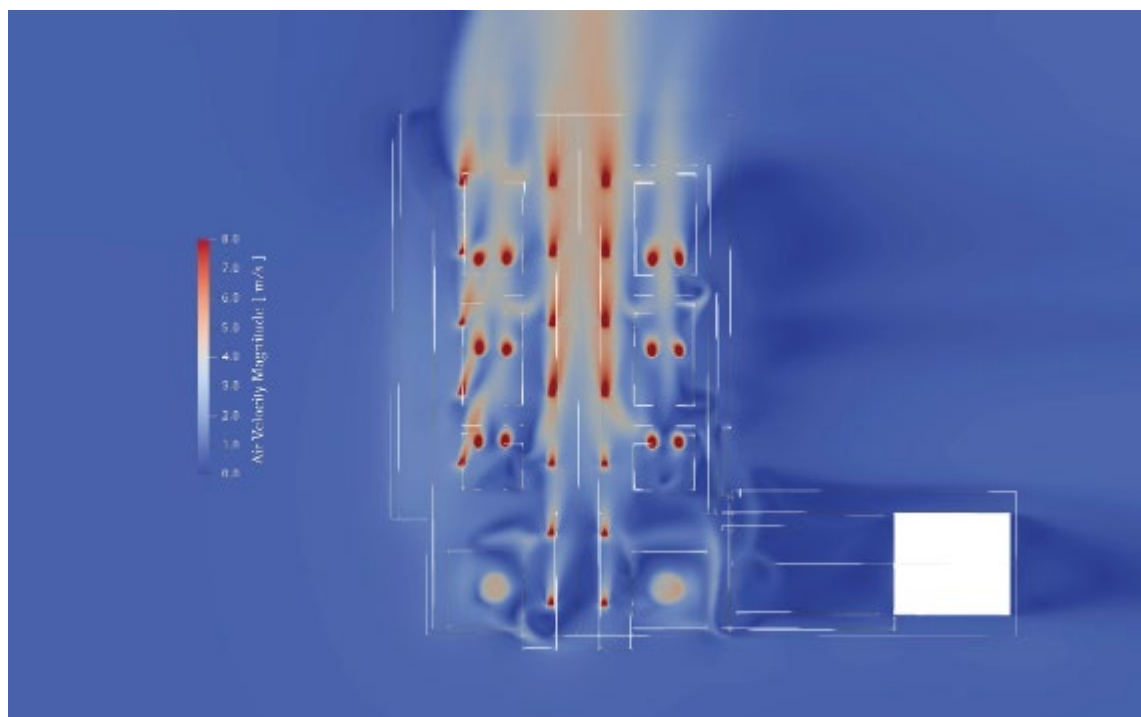


Рисунок 3.10 – Поле швидкостей для конфігурації з закритим дахом у літніх умовах з верхнього вигляду

Оцінка теплового комфорту тварин може бути виконана за допомогою індексу еквівалентної температури для корів (ЕТІС) і індексу температури-вологи (ТНІ). Прогнозовані розподіли ЕТІС і ТНІ в приміщенні для конфігурації з закритим дахом у літніх умовах можна побачити на рисунках 3.11 і 3.12. ТНІ прогнозує виникнення помірного або сильного теплового стресу для всіх тварин у корівнику, оскільки обчислені значення повсюди перевищують поріг 72. У той же час, ЕТІС прогнозує стан без, легкий і помірний тепловий стрес, оскільки значення в зонах, зайнятих тваринами, коливаються між 21 і 26. Ця різниця зумовлена впливом швидкості повітря, який є надзвичайно корисним для корів, але ігнорується ТНІ. Згідно з ЕТІС, корови, ймовірно, зазнають сильного теплового стресу за внутрішніми стінами через високу температуру та вологість, а також низькі швидкості.

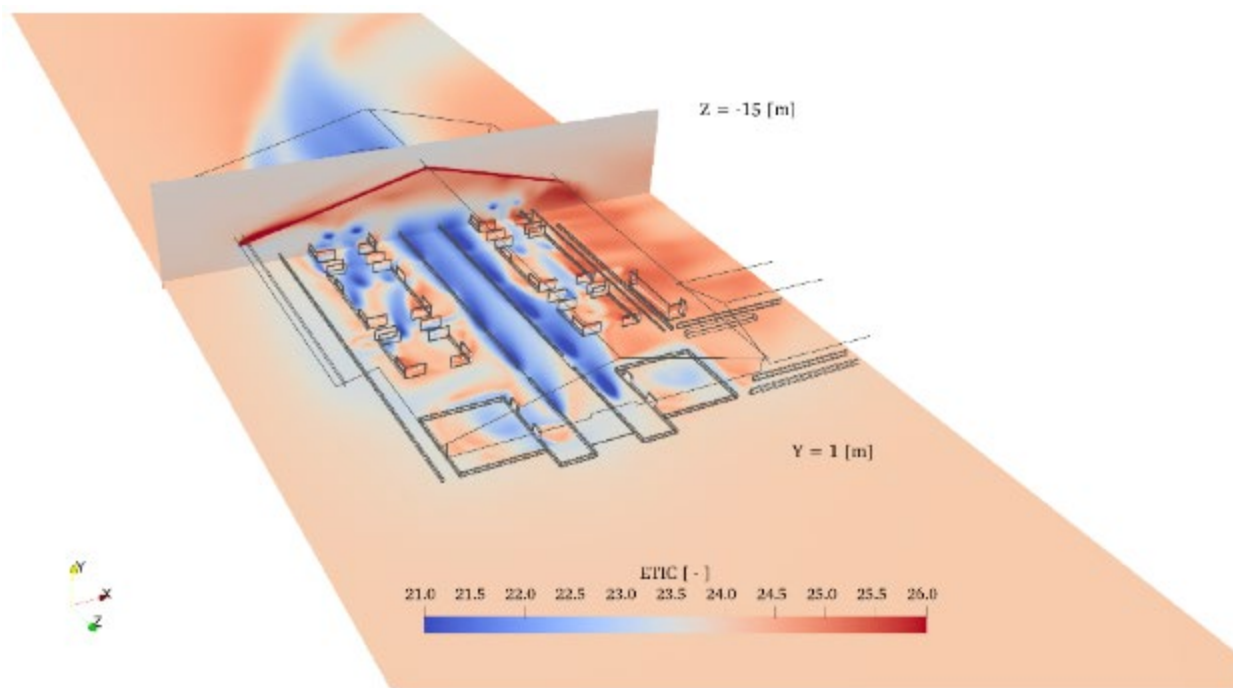


Рисунок 3.12 – Обчислений індекс еквівалентної температури для великої рогатої худоби (ЕТІС) для конфігурації з закритим дахом у літніх умовах

Коротко кажучи, ТНІ прогнозує виникнення теплового стресу у всіх стійлах, тоді як ЕТІС прогнозує, що лише тварини в гарячих точках зазнають теплового стресу. Крім того, через аналіз ЕТІС можна побачити, що високий рівень комфорту тварин присутній у лініях годівлі та ящиках. Цей аналіз добре узгоджується з результатами Zhou та ін., у яких вищий рівень комфорту тварин спостерігається в зонах з високою швидкістю.

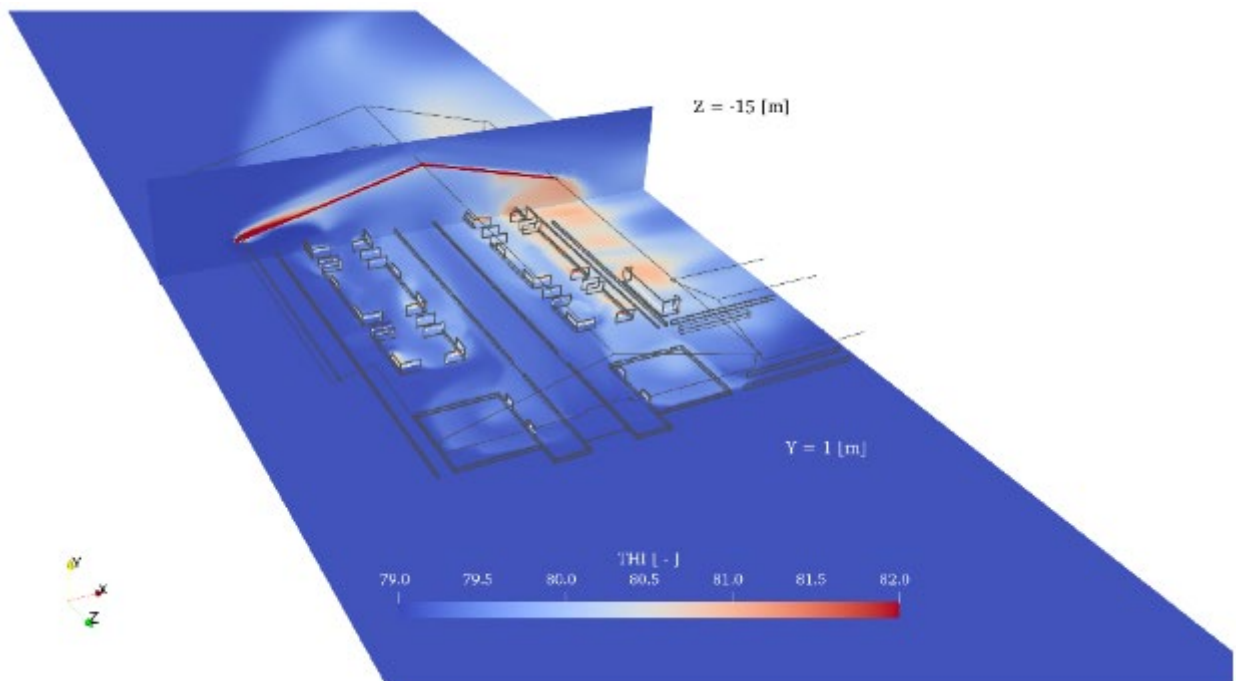


Рисунок 3.13 – Обчислений індекс температури-вологи (ТНІ) для конфігурації з закритим дахом у літніх умовах

Щільність тварин обмежена, оскільки корови проводять лише 30% свого часу в цій зоні; крім того, у лінії годівлі присутня велика кількість вентиляторів. Імовірно, що аналізована конфігурація вентиляторів забезпечує надмірний обмін повітрям для центральної лінії з непотрібним споживанням електроенергії. Сонячне випромінення має важливий непрямий ефект: повітря значно нагрівається після проходження по даху, а потім заходить в приміщення зі східної сторони завдяки всмоктуванню повітря. У результаті стійла на східній стороні очищаються

від дуже гарячого повітря, яке надходить з даху. Загалом, покращення комфорту тварин та швидкості обміну повітрям переважно викликане рециркуляційними вентиляторами. Вітер трохи підвищує швидкість обміну повітрям, але, ймовірно, є шкідливим як для вітрових, так і для підвітрових ліній стійлах. Використання штор у літній період може бути корисним для зменшення негативного впливу вітру. Зростання масової частки води можна помітити в зонах, зайнятих тваринами; однак зміна комфорту корів є обмеженою.

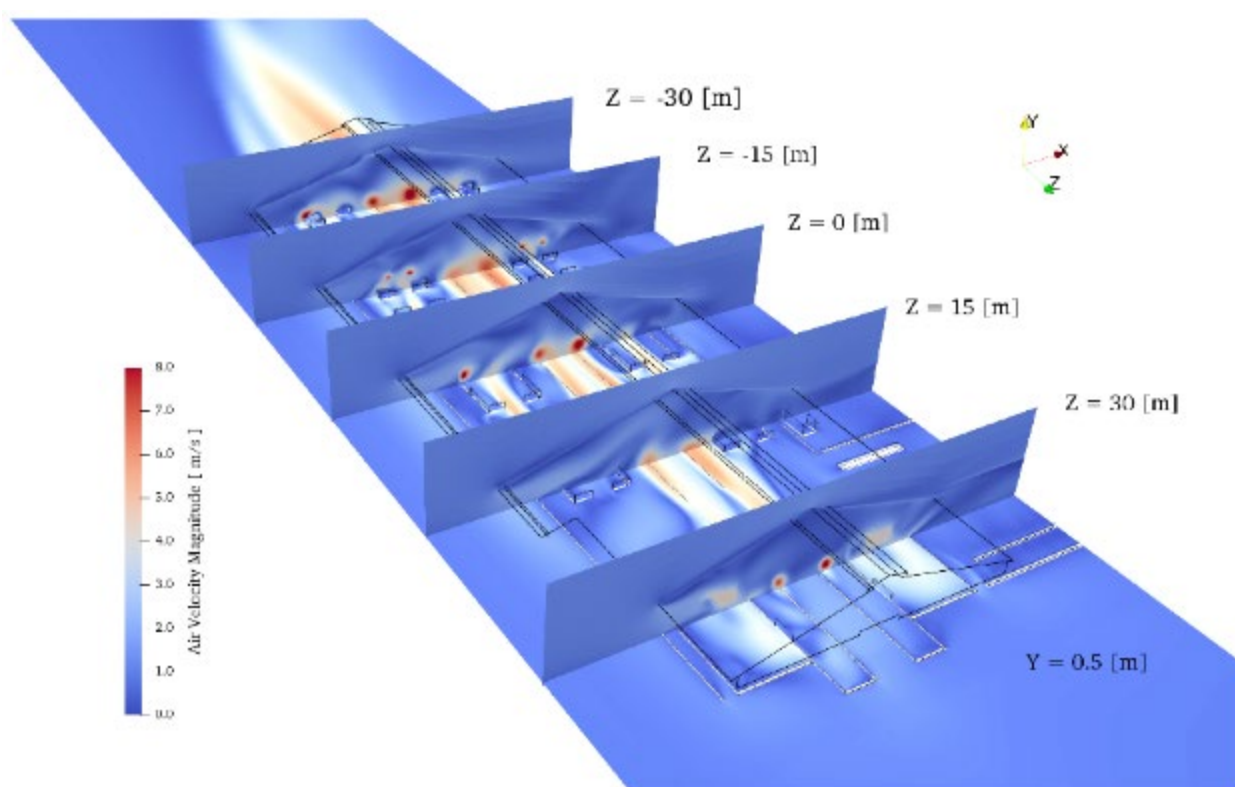


Рисунок 3.14 – Поле швидкостей для конфігурації з відкритим дахом у літніх умовах

Ту ж саму аналітику можна провести для конфігурації з відкритим дахом, результати якої представлені на рисунках 3.14, 3.15 і 3.16. Поля швидкостей і вологості є надзвичайно схожими на закриту конфігурацію, і геометрія даху, здається, мало впливає на внутрішні умови.

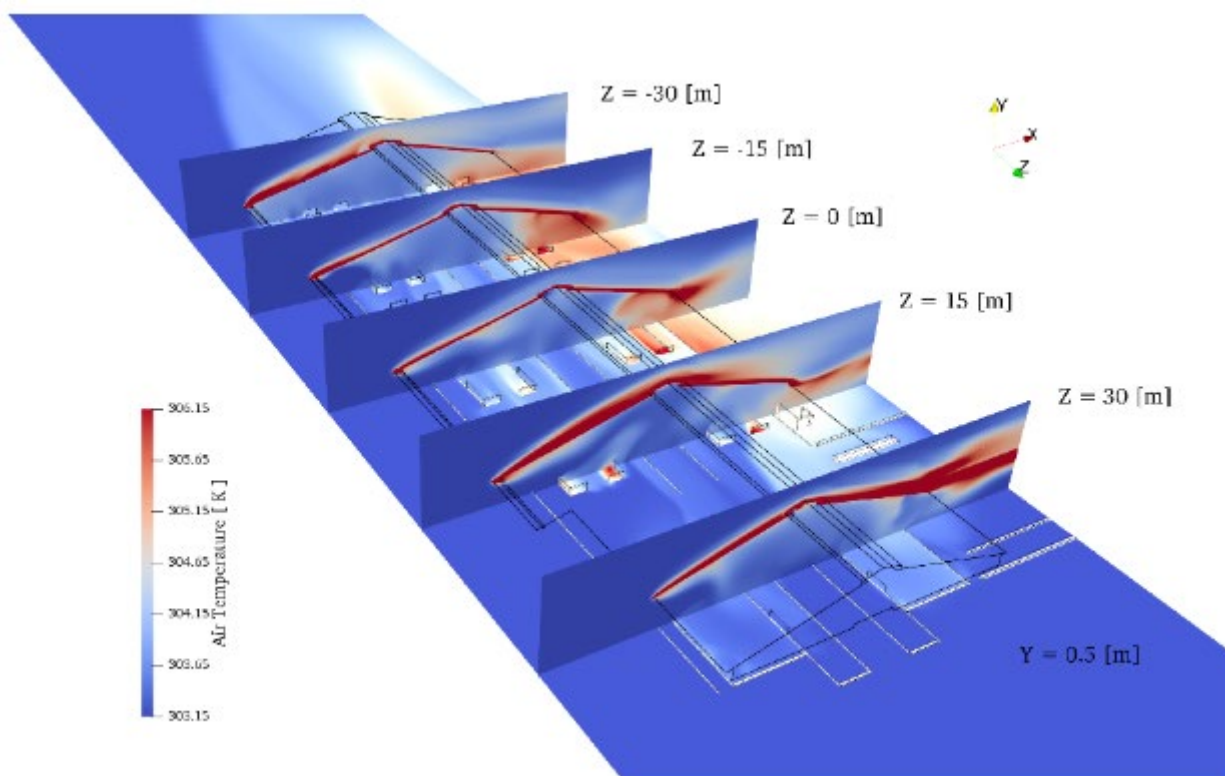


Рисунок 3.15 – Температурне поле для конфігурації з відкритим дахом у літніх умовах

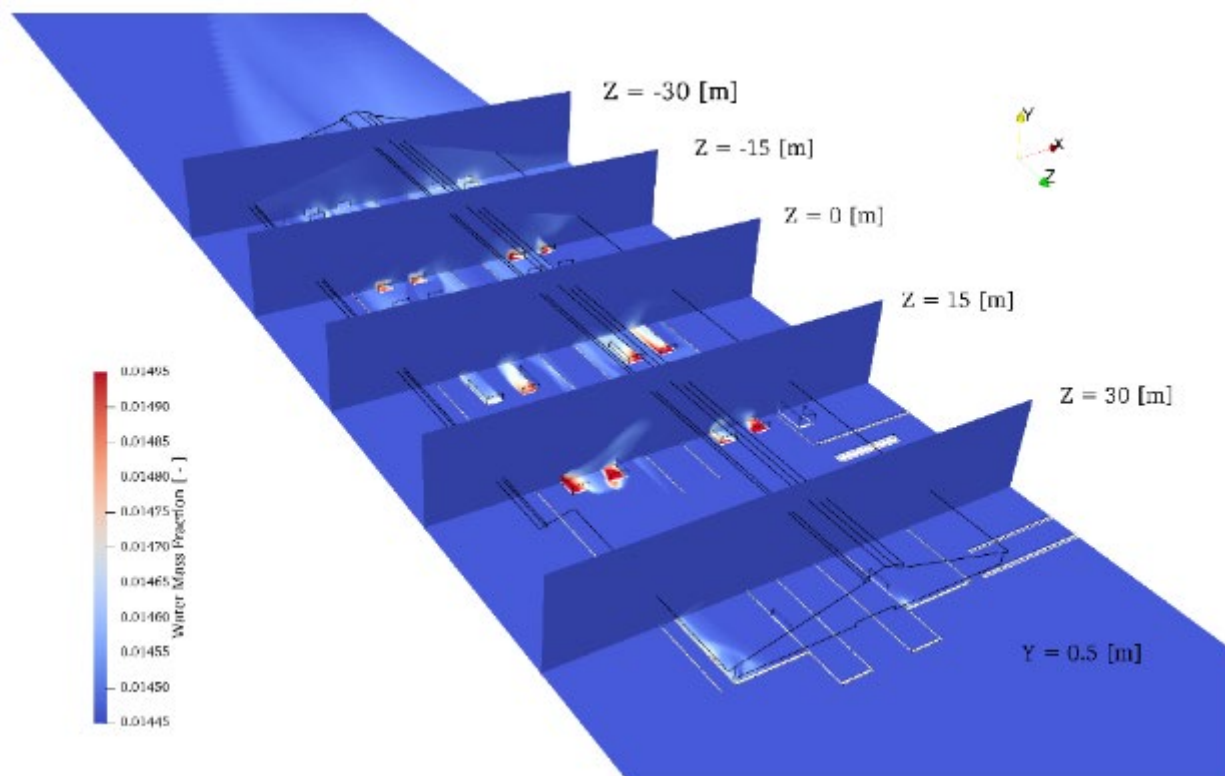


Рисунок 3.16 – Поле вологості для конфігурації з відкритим дахом у літніх умовах

Тим не менш, щілина на гребені викликає іншу поведінку потоку на верху даху, і, відповідно, гаряча зона під вітром стає більш помітною. Оскільки температурні, вологісні та швидкісні поля в зонах, зайнятих тваринами, ідентичні до конфігурації з закритим дахом, аналіз ТНІ та ЕТІС дає ті самі результати і не повторюється.

Годинна швидкість обміну повітрям дорівнює 83,46 1/год, що є помірним збільшенням у порівнянні з конфігурацією з закритим дахом. Порівняння годинної швидкості обміну повітрям у реальних і модифікованих конфігураціях для зимових і літніх погодних умов можна побачити на рисунку 3.17.

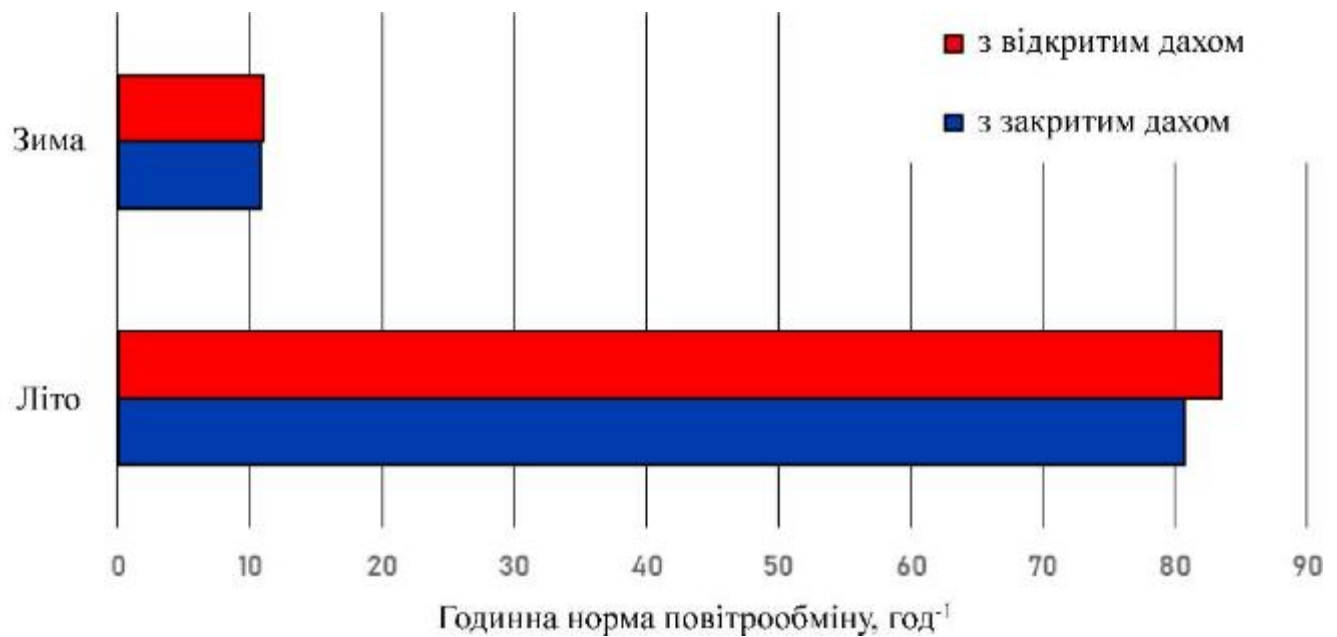


Рисунок 3.17 – Порівняння обчисленої годинної швидкості обміну повітрям в літніх і зимових погодних умовах для двох проаналізованих геометрій

3.3 Висновки з розділу

1. Розроблена модель коректно описує взаємозв'язки між природною та механічною вентиляцією. Крім того, збільшення швидкості обміну повітря між літніми та зимовими погодними умовами свідчить про те, що тепловий ефект

захоплення повітря в гібридно-вентильованих корівниках був успішно змодельований. Представлена методологія надає детальний опис як внутрішніх, так і зовнішніх потоків повітря; більше того, вона висвітлює всі критичні аспекти досліджуваних геометрій. Присутність внутрішніх стін є шкідливою через створення зон застою та гарячих точок у зонах, зайнятих тваринами. Тому необхідно обмежити присутність перешкод поблизу тварин якомога більше. Вентиляційна система правильно розмірена та спроектована, оскільки створює ефект тунельної вентиляції та забезпечує високий обмін повітря.

2. Результати симуляцій у літніх умовах з існуючою моделлю були порівняні з експериментальними даними з реального корівника. Виміряна процентна частка тварин у кожному класі інтенсивності теплового стресу, добре узгоджується з оцінкою за індексу еквівалентної температури для великої рогатої худоби (ETIC) у результатах CFD. У свою чергу, індекс температурно-вологісного співвідношення (ТНІ) сильно переоцінює інтенсивність теплового стресу у великої рогатої худоби. Аналіз індексу температури та вологості не надає корисної інформації про вентиляційну систему, оскільки швидкість повітря має обмежений вплив на температуру та вологість. Тому рекомендується використовувати ETIC замість ТНІ для оцінки теплового стресу в гібридно-вентильованих корівниках.

3. CFD прогнозує дещо різну швидкість обміну повітря для макетів з відкритим і закритим дахом як в літніх, так і в зимових умовах. Отже, є ймовірність, що модель CFD може бути використана для оцінки проєктних рішень. Проте температура, вологість та швидкість повітря є дуже схожими в зонах, зайнятих тваринами. Для аналізованого гібридно-вентильованого корівника вплив геометрії даху на теплові умови в зонах, зайнятих тваринами, обмежений. У порівнянні з моделлю із вентилятором, рішення з гребневими щілинами забезпечить трохи вищий обмін повітря з нижчими витратами та споживанням електроенергії.

4 МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Методика експериментальних досліджень

CFD прогнозує розподіли температури, вологості та швидкості повітря в приміщенні; тому, за допомогою термогігрометричних індексів, можна передбачити інтенсивність теплового стресу. Щоб зрозуміти, чи здатна розроблена модель правильно прогнозувати інтенсивність теплового стресу, результати симуляцій були порівняні з експериментальними вимірюваннями. Дослідження проводились в умовах реального господарства, яке обслуговує ТОВ «ДСМ-АГРО». У корів молочного стада в корівнику використовуються датчики на нашійниках (Allflex HR-LDn, виготовлені компанією SCR Engineers Ltd., Нетанія, Ізраїль), які вимірюють поведінкові параметри, такі як важке дихання, час лежання та жування. Виявлення важкого дихання виконується за допомогою акселерометра, який оцінює миттєву частоту дихання. Тварина вважається в стані важкого дихання, коли частота дихання перевищує поріг 80 уд/хв, що відповідає переходу між легким та помірним тепловим стресом. Система збору даних щодня надає загальну кількість хвилин, протягом яких корови знаходяться в стані важкого дихання. Цей параметр виражається в хв/день і середньо по загальному числу тварин (112 корів). Цей показник називається тривалістю важкого дихання (HBD), і вже широко використовується для аналізу щоденної інтенсивності теплового стресу. В корівнику історія даних HBD доступна з початку 2023 року до кінця 2024 року. Починаючи з вимірювань HBD, можна обчислити загальний відсоток корів з помірним, важким та критичним тепловим стресом. Цей відсоток був порівняний з прогнозом з CFD в літніх умовах з закритим дахом.

Спочатку необхідно вибрати дні з зовнішніми погодними умовами, подібними до симуляцій. Метеорологічні дані були отримані з відкритої бази

даних ARPAE. HBD забезпечує кумулятивне значення за 24 години, включаючи періоди, коли тепловий стрес не є критичним. Тому потрібен відносний часовий інтервал для обчислення частки тварин з важким диханням. Було припущено, що кожен випадок теплового стресу триває 8 послідовних годин. Температура повітря середньо впродовж найгарячіших 8 послідовних годин $T_{Air,Max8h}$ для будь-якого дня між 2023 та 2024 роками. Середня відносна вологість $RH_{Air,Max8h}$ та пряма нормального випромінення $DNI_{Air,Max8h}$ були обчислені для однакових часових інтервалів, спираючись на дані ARPAE. Оскільки погодні умови мають бути якомога ближчими до граничних умов симуляції, було прийнято три різні критерії для вибору днів: $T_{Air,Max8h}$ між 29 та 31 °C, $RH_{Air,Max8h}$ вище 50 % та $DNI_{Air,Max8h}$ вище 350 Вт/м². Слід зазначити, що швидкість вітру не використовувалася як критерій, оскільки набір даних ARPAE не містить цю інформацію. Потім були зібрані значення HBD для вибраних днів. Кумулятивний відсоток корів з помірним, важким та критичним тепловим стресом $X_{Moderate,Severe,Critical}$ у відносному 8-годинному періоді обчислювався за формулою (4.1).

$$X_{Moderate,Severe,Critical} = \frac{HBD}{8 \times 60} \times 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

Залишкова частка корів перебувала в термонеїтральних умовах або в легкому тепловому стресі. Завдяки аналізу змодельованих ТНІ та ЕТІС можливо передбачити частку корів у кожному класі інтенсивності теплового стресу. Цей аналіз є прямолінійним, оскільки Ванг та ін. визначили діапазони ТНІ та ЕТІС для кожного класу. Оскільки тварини не були візуалізовані в симуляції, ці частки оцінювались на основі об'ємів осередків з урахуванням кількості тварин у кожному регіоні. Частка корів, що належать до кожного класу, обчислювалася за формулою (4.2).

$$X_{Class} = \sum_{i=0}^{N_{AOZ}} \sum_{j=1}^{N_{Cell}} \frac{V_j}{V_i} \frac{n_i}{n_{Tot}} c_j 100 \quad [\%] \quad c_j = \begin{cases} 1 & \text{if } I_{Max,Class} < I_j < I_{Min,Class} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall \text{ Class} \quad (4.2)$$

де X_{Class} — частка тварин у визнаному класі інтенсивності теплового стресу (термонеутральний, легкий, помірний, важкий або критичний), N_{AOZ} — кількість зон, зайнятих тваринами, як визначено в таблиці 1, а N_{Cell} — кількість осередків у кожній зоні, зайнятій тваринами. V_j — об'єм одного осередку, в той час як V_i — загальний об'єм кожної зони, зайнятої тваринами. $I_{\text{Max,Class}}$ та $I_{\text{Min,Class}}$ — межі діапазонів класів для термогігрометричних індексів, визначених Вангом та ін., в той час як I_j — значення індексу в одному осередку. c_j — бінарна змінна, яка визначає, чи є вибраний осередок у визнаному діапазоні.

4.2 Порівняння експериментальної та змодельованої інтенсивності теплового стресу

У цьому розділі порівнюється інтенсивність теплового стресу, передбачена методом CFD, з оцінкою, отриманою на основі тривалості важкого дихання під час експериментів. Таблиця 4.1 містить підсумок погодних умов у вибрані дні та надає дані про оцінену процентну частку корів з інтенсивністю теплового стресу, яка є помірною або гіршою. Було знайдено шість днів, які відповідали граничним умовам CFD в період між 2022 і 2023 роками. Завдяки суворим критеріям, прийнятим для вибору днів, різниця між змодельованими та реальними умовами є обмеженою. Середня температура повітря $T_{\text{air,Max8h}}$ на $0,4$ °C нижча, ніж у симуляціях, а відносна вологість $RH_{\text{air,Max8h}}$ лише на $3,6$ % вища. Незважаючи на велику варіативність, середнє значення $DNI_{\text{air,Max8h}}$ практично точно відповідає значенню, прийнятому в CFD. Експериментальні значення тривалості важкого дихання (HBD) коливаються від 17 до 60 хвилин на день. Оцінена середня процентна частка корів з інтенсивністю теплового стресу, яка є помірною або гіршою, знаходиться в межах від $3,5$ % до $12,5$ % зі середнім значенням $7,5$ %. Відповідно, відсоток худоби, яка є термонеутральною або має легкий тепловий стрес, коливається від $87,5$ % до $96,5$ %, зі середнім значенням $92,5$ %.

Таблиця 4.1 – Погодні умови, виміряна тривалість важкого дихання (HBD) та експериментальна процентна частка інтенсивності теплового стресу корів, як спостерігалось в корівнику влітку

Дата	Часовий інтервал	$T_{air,Max8h}$ [°C]	$RH_{air,Max8h}$ [%]	$DNI_{air,Max8h}$ [Вт/м ²]	Тривалість важкого дихання [хв/день]	$X_{Thermo, Mild}$ [%]	$X_{Moderate, Sever}$ [%]
23.06.2024	8	29,8	52,0	437	60	87,5	12,5
28.08.2024	8	29,1	50,3	370	23	95,2	4,8
02.07.2024	8	30,2	50,5	612	17	96,5	3,5
13.07.2024	8	29,2	51,2	475	57	88,1	11,9
29.07.2024	8	30,2	51,2	540	24	95,0	5,0
01.08.2024	8	29,4	53,5	576	36	92,5	7,5
Середній	8	29,6	51,4	502	36	92,5	7,5
Модел.	Стац.	30,0	55,0	500	Дивись таблицю 4.2		

Процент тварин у кожному класі теплового стресу, як передбачено методом CFD, наведено в таблиці 4.2. Оцінка інтенсивності теплового стресу виконувалася за допомогою як ТНІ, так і ЕТІС. ТНІ передбачає початок теплового стресу для всіх корів у корівнику: 75,0 % і 25,0 % очікується, що перебуватимуть відповідно у важкому та помірному тепловому стресі. ЕТІС дає досить іншу оцінку: 25,3 % корів очікується термонейтральними, тоді як 70,5 % і 4,2 % прогнозуються з легким і помірним тепловим стресом. Кумулятивний відсоток тварин з помірним, важким та критичним тепловим стресом, передбаченим ЕТІС, знаходиться в межах експериментальних даних, тоді як ТНІ значно перебільшує ці показники. Помітна різниця між ЕТІС і ТНІ зумовлена присутністю механічних вентиляторів. ТНІ враховує лише температуру та відносну вологість, тоді як ЕТІС також враховує ефект швидкості повітря. Різниця між ЕТІС і ТНІ є додатковим доказом ефективності стратегії вентиляції, що використовується в корівнику. У загальному, запропонована модель CFD, здається, може успішно прогнозувати інтенсивність теплового стресу лише через ЕТІС. Різниця між прогнозом ЕТІС і експериментальними вимірюваннями може бути викликана варіабельністю тварин

та довгостроковими умовами навколишнього середовища. Стан лактації та вага тіла впливають на інтенсивність теплового стресу [60], однак ні THI, ні ETIC не враховують умови тварин. Більше того, як ETIC, так і THI передбачають початок теплового стресу в даному стані: повторення кількох днів з критичними умовами може збільшити серйозність кожного випадку теплового стресу.

Таблиця 4.2 – Процент корів з рівнями інтенсивності теплового стресу, як передбачено методом CFD в літніх умовах

Інтенсивність теплового стресу	Індекс температурно-вологісного співвідношення (THI)		Індекс еквівалентної температури для корів (ETIC)	
	Діапазон класів	X _{Class}	Діапазон класів	X _{Class}
	[-]	[%]	[-]	[%]
Термонеутральний	THI < 68	0,0	ETIC < 23	25,3
Легкий	68 ≤ THI < 72	0,0	23 ≤ ETIC < 26	70,5
Помірний	72 ≤ THI < 80	25,0	26 ≤ ETIC < 31	4,2
Важкий	80 ≤ THI < 90	75,0	31 ≤ ETIC < 37	0,0
Критичний	THI ≥ 90	0,0	ETIC ≥ 37	0,0

Цей аналіз не слід вважати повною валідацією, оскільки порівняння з вимірюваннями було проведено в специфічних умовах. По-перше, аналіз проводився лише в літніх умовах. У зимових умовах, через низьку температуру та вологість, очікується, що всі тварини перебуватимуть у термонеутральних умовах, і HBD, ймовірно, буде нульовим. Крім того, детальну поведінку моделі не можна валідувати, оскільки порівняння проводилося лише за загальними показниками.

4.3 Висновки з розділу

1. Викладено методику експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку інтенсивності теплового стресу у корів за допомогою моделювання методом CFD. Дослідження проводилися в реальному господарстві ТОВ «ДСМ-

АГРО», де використовувалися датчики для моніторингу поведінки тварин, зокрема важкого дихання, яке є індикатором теплового стресу. Визначено, що корови вважаються в стані важкого дихання при частоті понад 80 уд/хв. Методика включала збір та аналіз даних про температурні умови та вологість, а також обчислення процентів корів, які зазнають різного рівня теплового стресу на основі термогігрометричних індексів. Отримані дані порівнювалися з прогнозами моделі CFD, що дозволило перевірити її точність. Таким чином, методика забезпечує цілісний підхід до моніторингу і прогнозування впливу погодних умов на здоров'я тварин, що є важливим для оптимізації умов утримання та підвищення продуктивності корів.

2. Проведено порівняння між експериментально виміряною інтенсивністю теплового стресу у корів і прогнозами, отриманими за допомогою методу CFD. Було проаналізовано шість днів, у які умови відповідали критеріям симуляцій, що забезпечило точність даних. Середня температура повітря та відносна вологість в експериментальних умовах показали незначні відмінності від змодельованих значень. Оцінена процентна частка корів з помірним або важким тепловим стресом коливалася від 3,5 % до 12,5 %, що вказує на велику частину тварин, які перебувають у термонеutralних або легких умовах стресу. Різниця між прогнозами, отриманими за ТНІ та ЕТІС, підкреслює вплив механічної вентиляції, оскільки ТНІ не враховує швидкість повітря. Модель CFD продемонструвала свою здатність успішно прогнозувати тепловий стрес через ЕТІС, хоча варіативність тварин і умови навколишнього середовища можуть впливати на точність прогнозів. Важливо зазначити, що цей аналіз не є повною валідацією, оскільки дані отримано лише в літніх умовах, і поведінка моделі потребує подальшого вивчення для зимових умов.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Забезпечення комфортного мікроклімату в приміщеннях для утримання корів є важливим аспектом, який безпосередньо впливає на здоров'я тварин, їх продуктивність та загальний добробут. Для досягнення належного мікроклімату необхідно дотримуватись ряду вимог, які включають контроль температури, вологості, вентиляції, освітлення та рівня шуму. Оптимальна температура для утримання корів повинна становити від 10 до 20 °С, адже коливання температури в межах 5 °С або вище 25 °С може спричинити стрес у тварин. Вологість повітря також є критично важливим фактором: її рівень повинен коливатися в межах 60-80%. Занадто висока вологість може призвести до розвитку грибкових захворювань, тоді як низька вологість негативно вплине на стан тварин. Вентиляція приміщень повинна забезпечувати постійний обмін повітря, оскільки поганий повітряний обмін може призвести до накопичення шкідливих газів, таких як амоніак і вуглекислий газ, які є небезпечними для здоров'я тварин і людей. Освітлення також грає важливу роль: корови потребують достатньої яскравості, що становить близько 200-300 люкс. Рівень шуму в приміщеннях не повинен перевищувати 70 дБ, оскільки це може викликати стрес і дискомфорт у тварин.

При забезпеченні мікроклімату існують ряд небезпечних факторів, які можуть негативно вплинути на здоров'я тварин та безпеку працівників. По-перше, температурні коливання є одним з найзначніших ризиків. Різкі зміни температури можуть призвести до теплового або холодового стресу у тварин. Для запобігання цим небезпекам важливо використовувати системи обігріву та охолодження, які забезпечують рівномірний розподіл температури в приміщенні. По-друге, надмірна вологість може стати причиною розвитку плісняви та грибка, що негативно вплине на здоров'я корів. Використання осушувачів повітря та якісних систем вентиляції допоможе знизити рівень вологості. Погана вентиляція також є небезпекою, оскільки недостатній обмін повітря може призвести до накопичення

токсичних газів. Регулярний контроль та обслуговування вентиляційних систем є необхідними для уникнення цих проблем. Освітлення може стати ще однією проблемою: використання неправильного освітлення може викликати дискомфорт у тварин, тому важливо обирати освітлювальні пристрої, що забезпечують рівномірний розподіл світла. Окрім цього, важливо звернути увагу на безпеку, пов'язану з обладнанням для забезпечення мікроклімату. Неправильна експлуатація обладнання може призвести до травм працівників, тому необхідно дотримуватись правил техніки безпеки.

Щоб ефективно усунути небезпечні фактори, потрібно вжити низку заходів. По-перше, регулярний моніторинг мікроклімату в приміщеннях є запорукою успіху. Використання датчиків температури, вологості та рівня CO₂ для постійного контролю забезпечить своєчасне виявлення проблем. По-друге, планові огляди обладнання, яке забезпечує мікроклімат, є критично важливими. Регулярне технічне обслуговування систем обігріву, охолодження та вентиляції дозволить запобігти їх поломкам і збої в роботі. Також важливо забезпечити захист працівників під час роботи з обладнанням. Використання засобів індивідуального захисту, таких як рукавиці, окуляри та спецодяг, є обов'язковим для зниження ризику травм. Навчання персоналу також є важливим аспектом безпеки. Регулярні тренінги з охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях для всіх працівників допоможуть знизити ризики, пов'язані з роботою в небезпечному середовищі.

Одним із ключових моментів у забезпеченні безпеки праці в приміщеннях для утримання корів є розробка карти безпеки для обладнання. Вона повинна включати чітко позначені входи та виходи з приміщення, що забезпечить безперешкодний доступ до евакуаційних шляхів у разі надзвичайної ситуації. Усі системи, які забезпечують мікроклімат (обігрів, вентиляція, освітлення), мають бути розташовані так, щоб зменшити ризик травм працівників. Знаки безпеки повинні бути присутніми у приміщенні, які вказують на небезпечні зони, а також

на правила користування обладнанням. Плани евакуації повинні бути розроблені та позначені в приміщенні, щоб у разі надзвичайної ситуації працівники знали, куди йти. Окрім цього, контроль доступу до небезпечних зон повинен бути здійснюваний, аби обмежити доступ неповнолітніх осіб і осіб без відповідної підготовки.

Отже, забезпечення безпеки праці та оптимального мікроклімату в приміщеннях для утримання корів є невід'ємною частиною ефективного ведення сільського господарства. Дотримання встановлених вимог, регулярний моніторинг небезпечних факторів і проведення навчання з охорони праці допоможуть забезпечити безпечні умови для роботи працівників і добробут тварин. Систематичний підхід до цих питань створює основи для стабільного розвитку тваринництва та підвищення продуктивності, що в свою чергу сприятиме загальному розвитку агропромислового комплексу.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ КОРИВНИКА

Було проведено аналіз економічної ефективності двох варіантів системи забезпечення мікроклімату для утримання корів: варіант 1 (із відкритим дахом) та варіант 2 (із закритим дахом). Розрахунки базуються на капіталовкладеннях, експлуатаційних витратах, амортизаційних відрахуваннях, заробітній платі та економічному ефекті від впровадження систем.

Позначимо капіталовкладення для варіанта 1 як C_1 та для варіанта 2 як C_2 : $C_1 = 620000$ грн; $C_2 = 500000$.

Експлуатаційні витрати E складаються з витрат на технічне обслуговування TO , ремонт R , амортизацію A та заробітну плату ZP :

$$E = TO + R + A + ZP$$

1. Витрати на технічне обслуговування та ремонт (15% від капіталовкладень):

$$TO = 0,15 C$$

Для варіанту 1: $TO_1 = 0,15 C_1 = 0,15 \times 620000 = 93000$ грн.

Для варіанту 2: $TO_2 = 0,15 C_2 = 0,15 \times 500000 = 75000$ грн.

2. Амортизаційні відрахування (також 15% від капіталовкладень):

$$A = 0,15 C$$

Для варіанту 1: $A_1 = 0,15 C_1 = 0,15 \times 620000 = 93000$ грн.

Для варіанту 2: $A_2 = 0,15 C_2 = 0,15 \times 500000 = 75000$ грн.

3. Заробітна плата:

Оплата праці персоналу становить 120 грн/год. Час на обслуговування обладнання:

Для варіанту 1 (32 год/міс): $H_1 = 32 \times 12 = 384$ год.

Заробітна плата: $ZP_1 = H_1 \times 120 = 384 \times 120 = 46080$ грн.

Для варіанту 2 (16 год/міс): $H_2 = 16 \times 12 = 192$ год.

Заробітна плата: $ZP_2 = H_2 \times 120 = 192 \times 120 = 23040$ грн.

Загальні експлуатаційні витрати на рік:

Для варіанту 1: $E_1 = TO_1 + A_1 + ZP_1 = 93000 + 93000 + 46080 = 232080$ грн.

Для варіанту 2: $E_2 = TO_2 + A_2 + ZP_2 = 75000 + 75000 + 23040 = 173040$ грн.

Річний економічний ефект. Відомо, що варіант 1 забезпечує додатковий економічний ефект ДЕ у розмірі 120000 грн за рахунок створення сприятливих умов утримання корів.

Економічний ефект: $EE = E_1 - E_2 + ДЕ = 232080 - 173040 + 120000 = 179040$ грн.

Строк окупності капітальних вкладень SO розраховується як співвідношення капіталовкладень до річного економічного ефекту (при умові, що він позитивний):

$$SO = (C_2 - C_1) / EE = (620000 - 500000) / 179040 = 0,67 \text{ рока.}$$

Аналіз показує, що варіант 1 з відкритим дахом має більші річні експлуатаційні витрати в порівнянні з варіантом 2. Однак за рахунок створення сприятливих умов утримання корів забезпечує економічний ефект 179040 грн. Капіталовкладення можуть при цьому окупитися через 0,67 роки.

ВИСНОВКИ

1. Мікроклімат та вентиляція в приміщеннях для утримання корів є критично важливими для забезпечення здоров'я, продуктивності та комфорту тварин. Правильна вентиляція регулює температуру, вологість і викиди шкідливих газів, таких як аміак і метан, що позитивно впливає на екологічну стійкість ферми і тривалість експлуатації будівель. Неізольовані та напівізольовані корівники є економічно вигіднішими, знижуючи вартість будівництва на 15-35 % у порівнянні з повністю ізольованими. Вони забезпечують базовий рівень захисту від погодних умов і комфортний мікроклімат завдяки природній вентиляції. Для підтримання оптимального мікроклімату в безприв'язному боксовому утриманні використовуються сучасні системи, включаючи підйомні штори, вентиляційно-світлові дашки та автоматизовані системи контролю клімату, які сприяють постійному руху свіжого повітря і підвищують продуктивність тварин.

2. Розроблена модель, може коректно описувати взаємозв'язки між природною та механічною вентиляцією. Представлена методологія надає детальний опис як внутрішніх, так і зовнішніх потоків повітря; більше того, вона висвітлює всі критичні аспекти досліджуваних геометрій. Присутність внутрішніх стін є шкідливою через створення зон застою та гарячих точок у зонах, зайнятих тваринами. Тому необхідно обмежити присутність перешкод поблизу тварин якомога більше. Вентиляційна система правильно розмірена та спроектована, оскільки створює ефект тунельної вентиляції та забезпечує високий обмін повітря.

3. Результати симуляцій у літніх умовах з існуючим макетом були порівняні з експериментальними даними з реального корівника. Виміряна процентна частка тварин у кожному класі інтенсивності теплового стресу, добре узгоджується з оцінкою за індексом еквівалентної температури для корів (ETIC) у результатах CFD. У свою чергу, індекс температури-вологи (THI) сильно переоцінює інтенсивність теплового стресу у великої рогатої худоби. Тому рекомендується

використовувати ETIC замість TНІ для оцінки теплового стресу в гібридно-вентильованих корівниках.

4. CFD прогнозує дещо різну швидкість обміну повітря для макетів з відкритим і закритим дахом як в літніх, так і в зимових умовах. Для аналізованого гібридно-вентильованого корівника вплив геометрії даху на теплові умови в зонах перебування тварин є обмеженим. У порівнянні з моделлю із вентилятором, рішення з гребневими щілинами забезпечить вищий обмін повітря з нижчими витратами та споживанням електроенергії.

5. Економічний аналіз показує, що варіант 1 з відкритим дахом має більші річні експлуатаційні витрати в порівнянні з варіантом 2. Однак за рахунок створення сприятливих умов утримання корів забезпечує економічний ефект 179040 грн. Капіталовкладення можуть при цьому окупитися через 0,67 роки.

Бібліографія

1. Алієв Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
2. Алієв Е.Б., Гаврильченко О.С., Ключ А.В. (2019). Обґрунтування складу енергозберігаючих технічних засобів для забезпечення мікроклімату в тваринницьких приміщеннях. Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України: Зб. наукових-праць (21 листопада 2019) / За наук. Ред. В.С. Лукача [та ін.]. Ніжин. С. 8-16.
3. Алієв, Е. Б., Білоус, І. М. (2020). Обґрунтування складу енергозберігаючих технічних засобів для забезпечення мікроклімату в тваринницьких приміщеннях. Матеріали XVI міжнародна научна практична конференція «Найновітні наукові постиження – 2020» (15 - 22 март 2020 г.). Volume 3. Софія «Бял ГРАД-БГ ОДД». С.36-38.
4. Алієв Е.Б., Яропуд В.М., Білоус І. М. Обґрунтування складу енергозберігаючої системи забезпечення мікроклімату в свинарських приміщеннях. Вібрації в техніці та технологіях. Вінниця, ВНАУ. 2020. № 2 (97). С. 29-137. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2-14.
5. Yaropud V., Hunko I., Aliiev E., Kupchuk I. Justification of the mechatronic system for pigsty microclimate maintenance. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, 2021, XXXII (2): 341–351. DOI: 10.15159/jas.21.23
6. Kadzere, C.T.; Murphy, M.; Silanikove, N.; Maltz, E. Heat stress in lactating dairy cows: A review. *Livest. Prod. Sci.* 2002, 77, 59–91.
7. Becker, C.; Collier, R.; Stone, A. Invited review: Physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2020, 103, 6751–6770.
8. Polsky, L.; von Keyserlingk, M.A.G. Effects of Heat Stress on Dairy Cattle Welfare. *J. Dairy Sci.* 2017, 100, 8645–8657.

9. Tao, S.; Rivas, R.M.O.; Marins, T.N.; Chen, Y.C.; Gao, J.; Bernard, J.K. Impact of heat stress on lactational performance of dairy cows. *Theriogenology* 2020, 150, 437–444.
10. Bernabucci, U.; Biffani, S.; Buggiotti, L.; Vitali, A.; Lacetera, N.; Nardone, A. The Effects of Heat Stress in Italian Holstein Dairy Cattle. *J. Dairy Sci.* 2014, 97, 471–486.
11. Key, N.; Sneeringer, S.; Marquardt, D. Climate Change, Heat Stress, and U.S. Dairy Production; Technical Report; United States Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 2014.
12. Giannone, C.; Bovo, M.; Ceccarelli, M.; Torreggiani, D.; Tassinari, P. Review of the Heat Stress-Induced Responses in Dairy Cattle. *Animals* 2023, 13, 3451.
13. Ji, B.; Banhazi, T.; Perano, K.; Ghahramani, A.; Bowtell, L.; Wang, C.; Li, B. A Review of Measuring, Assessing and Mitigating Heat Stress in Dairy Cattle. *Biosyst. Eng.* 2020, 199, 4–26.
14. Das, B.; Dutta, P.P.; Bardalai, M.; Dutta, P.P. Comparative study on performance of high volume low speed (HVLS) fans with high-speed fans for the use in dairy barns. *Mater. Today Proc.* 2021, 47, 4606–4610.
15. Flamenbaum, I.; Wolfenson, D.; Mamen, M.; Berman, A. Cooling Dairy Cattle by a Combination of Sprinkling and Forced Ventilation and Its Implementation in the Shelter System. *J. Dairy Sci.* 1986, 69, 3140–3147.
16. West, J.W. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. *J. Dairy Sci.* 2003, 86-6, 723–731.
17. Masi, R.F.D.; Ruggiero, S.; Tariello, F.; Vanoli, G. Passive envelope solutions to aid design of sustainable livestock buildings in Mediterranean climate. *J. Clean. Prod.* 2021, 311, 127444.
18. Tong, X.; Hong, S.; Zhao, L. CFD Modelling of airflow pattern and thermal environment in a commercial manure-belt layer house with tunnel ventilation. *Biosyst. Eng.* 2019, 178, 275–293.

19. Zhou, B.; Wang, X.; Mondaca, M.R.; Rong, L.; Choi, C.Y. Assessment of Optimal Airflow Baffle Locations and Angles in Mechanically-Ventilated Dairy Houses using Computational Fluid Dynamics. *Biosyst. Eng.* 2019, 165, 104930.
20. Pakari, A.; Ghani, S. Comparison of different mechanical ventilation systems for dairy cow barns: CFD simulations and field measurements. *Comput. Electron. Agric.* 2021, 186, 106207.
21. Cheng, Q.; Feng, H.; Meng, H.; Zhou, H. CFD study of the effect of inlet position and flap on the airflow and temperature in a laying hen house in summer. *Biosyst. Eng.* 2021, 203, 109–123.
22. Wang, X.; Zhang, G.; Choi, C.Y. Evaluation of a precision air-supply system in naturally ventilated freestall dairy barns. *Biosyst. Eng.* 2018, 175, 1–15.
23. Yi, Q.; Zhang, G.; Li, H.; Wang, X.; Janke, D.; Amon, B.; Hempel, S.; Amon, T. Estimation of opening discharge coefficient of naturally ventilated dairy buildings by response surface methodology. *Comput. Electron. Agric.* 2020, 169, 105224.
24. Shen, X.; Zhang, G.; Wu, W.; Bjerg, B. Model-based control of natural ventilation in dairy buildings. *Comput. Electron. Agric.* 2013, 94, 47–57.
25. Wu, W.; Zhai, J.; Zhang, G.; Nielsen, P.V. Evaluation of methods for determining air exchange rate in a naturally ventilated dairy cattle building with large openings using computational fluid dynamics. *Atmos. Environ.* 2012, 63, 179–188.
26. Janke, D.; Caiazzo, A.; Ahmed, N.; Alia, N.; Knoth, O.; Moreau, B.; Wilbrandt, U.; Willink, D.; Amon, T.; John, V. On the Feasibility of Using Open-Source Solvers for the Simulation of a Turbulent Air Flow in a Dairy Barn. *Comput. Electron. Agric.* 2020, 175, 105546.
27. Hong, S.W.; Exadaktylos, V.; Lee, I.; Amon, T.; Youssef, A.; Norton, T.; Berckmans, D. Validation of an Open Source CFD Code to Simulate Natural Ventilation for Agricultural Buildings. *Comput. Electron. Agric.* 2017, 138, 80–91.

28. de Costa, C.C.; Maia, A.S.C.; Nascimento, S.T.; Nascimento, C.C.N.; Neto, M.C.; de França Carvalho Fonsêca, V. Thermal balance of Nellore cattle. *Int. J. Biometeorol.* 2018, 62, 723–731.
29. Maia, A.S.C.; da Silva, R.G.; de Souza Junior, J.B.F.; da Silva, R.B.; Domingos, H.G.T. Effective Thermal Conductivity of the Hair Coat of Holstein Cows in a Tropical Environment. *Rev. Bras. Zootec.* 2009, 39, 2218–2223.
30. Kapadnis, P.J.; Thakur, P.N. Study on skin thickness in crossbreed cattle. *Asia J. Anim. Sci.* 2018, 13, 72–74.
31. Li, H.; Rong, L.; Zhang, G. Study on convective heat transfer from pig models by CFD in a virtual wind tunnel. *Comput. Electron. Agric.* 2016, 123, 203–210.
32. Maia, A.S.C.; da Silva, R.G.; Loureiro, C.M.B. Sensible and latent heat loss from the body surface of Holstein cows in a tropical environment. *Int. J. Biometeorol.* 2005, 50, 17–22.
33. Maia, A.S.C.; Silva, R.D.; Loureiro, C.M.B. Respiratory heat loss of Holstein cows in a tropical environment. *Int. J. Biometeorol.* 2005, 49, 332–336.
34. McGovern, R.E.; Bruce, J.M. A Model of the Thermal Balance for Cattle in Hot Conditions. *J. Agric. Eng. Res.* 2000, 77, 81–92.
35. Neves, S.F.; Silva, M.C.F.; Miranda, J.M.; Stilwell, G.; Cortez, P.P. Predictive Models of Dairy Cow Thermal State: A Review from a Technological Perspective. *Vet. Sci.* 2022, 9, 416.
36. Bertipaglia, E.C.A.; Silva, R.G.; Maia, A.S.C. Fertility and hair coat characteristics of Holstein cows in a tropical environment. *Anim. Reprod.* 2005, 2, 187–194.
37. Ostyakova, M.E.; Sayapina, I.Y.; Mandro, N.M.; Trush, N.V.; Gavrilov, Y.A.; Gavrilova, G.A.; Hibchenov, L.V.; Chubin, A.N. Morphological and Quantitative Characteristics of the Skin of Holstein Cattle in the Amur Region. *Int. J. Eng. Technol.* 2018, 7, 78–82.

38. Li, G.; Chen, S.; Chen, J.; Peng, D.; Gu, X. Predicting rectal temperature and respiration rate responses in lactating dairy cows exposed to heat stress. *J. Dairy Sci.* 2020, 103, 5466–5484.
39. Iqbal, A.; Gautam, K.R.; Zhang, G.; Rong, L. Modelling of Animal Occupied Zones in CFD. *Biosyst. Eng.* 2017, 204, 181–197.
40. National Academies of Sciences Engineering and Medicine. In *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Eighth Revised Edition*; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2021.
41. Arndt, C.; Powell, J.M.; Aguerre, M.J.; Crump, P.M.; Wattiaux, M.A. Feed conversion efficiency in dairy cows: Repeatability, variation in digestion and metabolism of energy and nitrogen, and ruminal methanogens. *J. Dairy Sci.* 2015, 96, 3938–3950.

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

**Обґрунтування параметрів мікроклімату в приміщеннях
для утримання корів**

Виконав: магістрант групи МгАІ-1-23
Рекалов Денис Сергійович

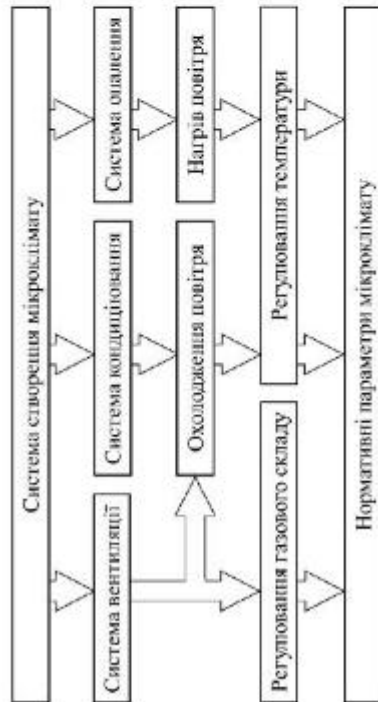
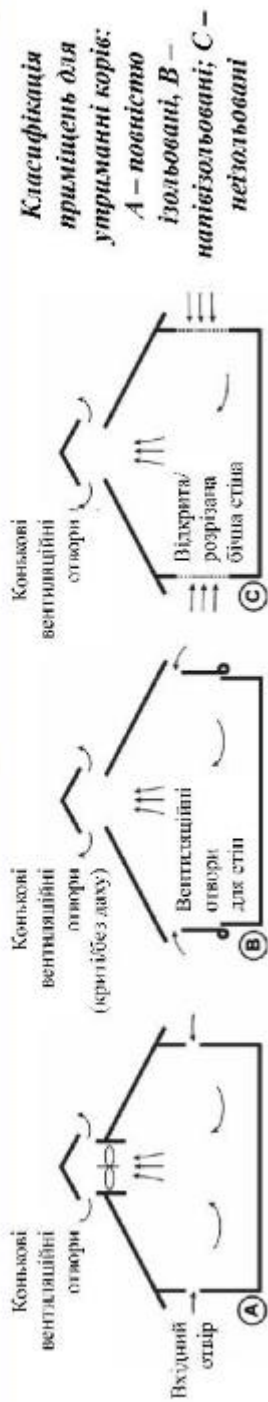
Керівник: доктор філософії
Лушко Кристина Олегівна

Дніпро, 2024

Мета роботи – обґрунтування параметрів мікроклімату в приміщеннях для утримання корів шляхом дослідження та оптимізації систем вентиляції, спрямованих на забезпечення комфортних умов для тварин, підвищення їх продуктивності та зниження енергетичних витрат, з урахуванням економічної доцільності.

Для досягнення цієї мети передбачались наступні **задачі досліджень**:

1. Проаналізувати існуючі системи вентиляції в приміщеннях для утримання великої рогатої худоби, їх вплив на параметри мікроклімату та продуктивність тварин.
2. Розробити модель, яка враховує взаємодію природної та механічної вентиляції в умовах різних кліматичних сезонів, з метою оптимізації обміну повітря.
3. Виконати моделювання та експериментальні дослідження потоків повітря у приміщеннях, оцінити вплив геометрії приміщень на вентиляцію та комфорт тварин.
4. Запропонувати оптимальні конструктивні рішення для систем вентиляції з урахуванням енергетичних витрат і забезпечення теплового комфорту тварин.
5. Провести економічний аналіз варіантів систем вентиляції, оцінити їх рентабельність, окупність капіталовкладень і вплив на загальну ефективність господарства.



Технологічна схема системи забезпечення мікроклімату



Система забезпечення мікроклімату в корівнику з безпримісним боксовим утриманням

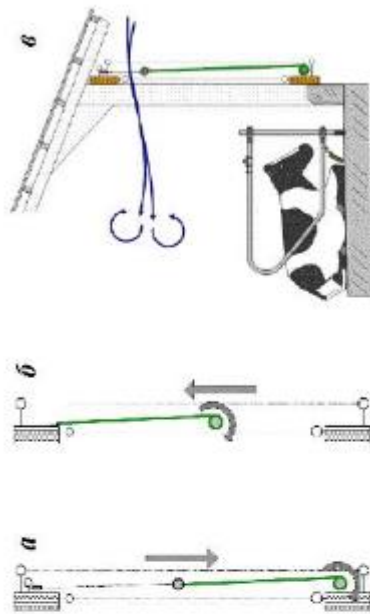
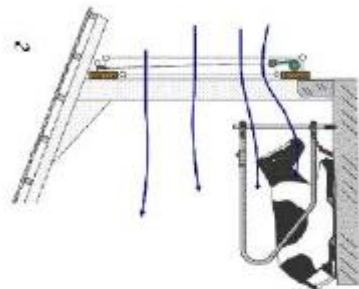
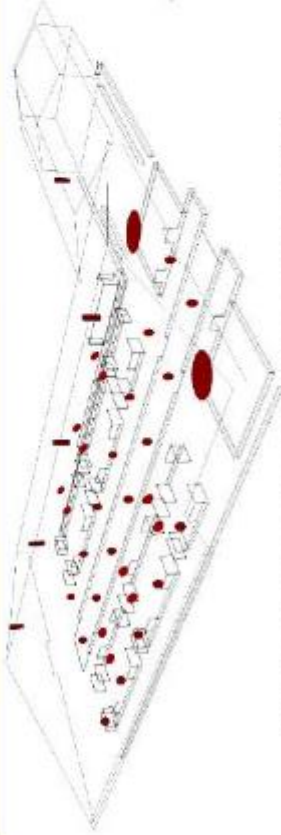
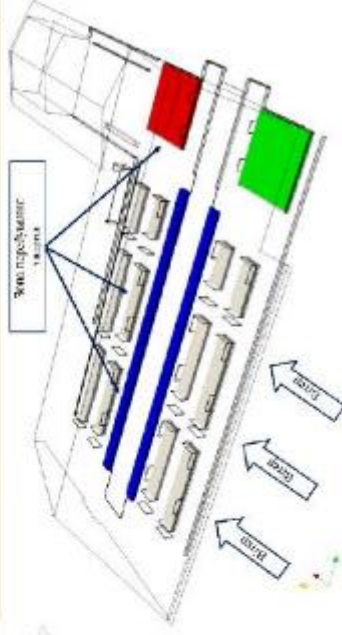


Схема системи штор з відкриванням зверху (а) та знизу (б), схема надходження повітря в корівник взимку (в) та влітку (г)





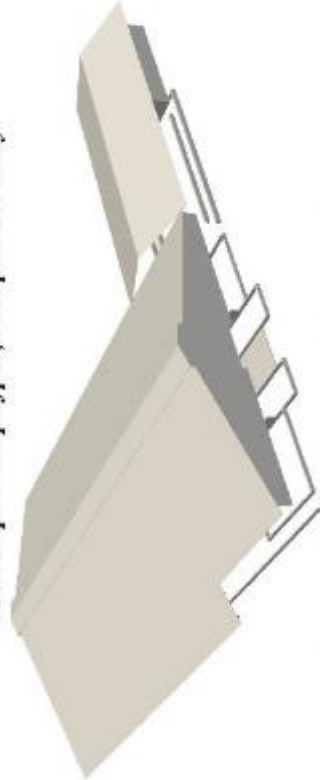
Розташування рециркуляційних вентиляторів і повітродувок на даху



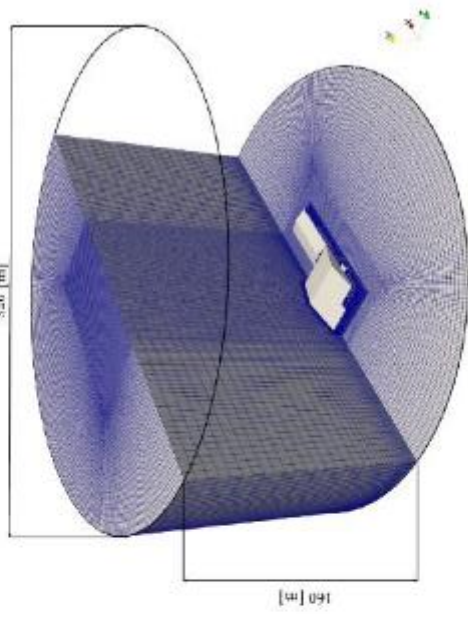
*Стійла позначено сірим кольором, кормові лінії – синім, передпогозовий бокс – зеленим, післяпогозовий бокс – червоним
Розташування джерел енергії та води*



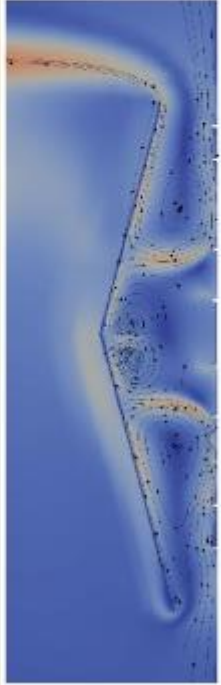
Геометрія конфігурації закритого даху



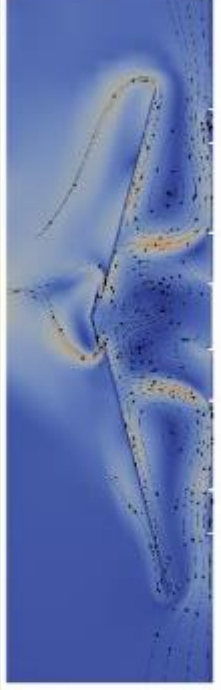
Геометрія конфігурації відкритого даху



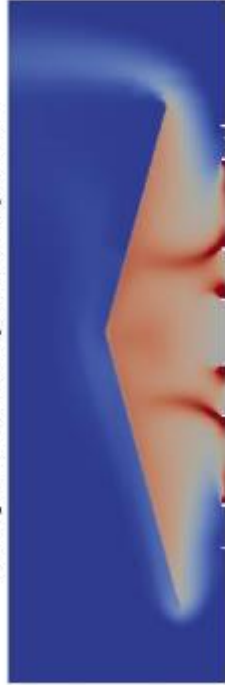
Сітка та обчислювальна область для симуляції



Поле швидкостей та ліній потоків для конфігурації із закритим дахом у зимових умовах



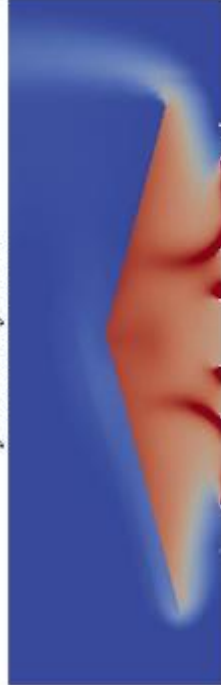
Поле швидкостей та ліній потоків для конфігурації із відкритим дахом у зимових умовах



Температурне поле для конфігурації із закритим дахом у зимових умовах



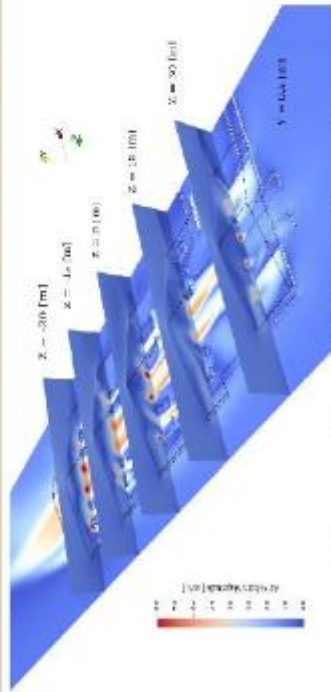
Температурне поле для конфігурації із відкритим дахом у зимових умовах



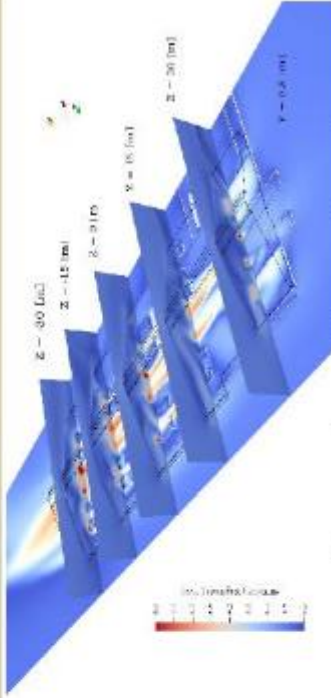
Поле вологості для конфігурації із закритим дахом у зимових умовах



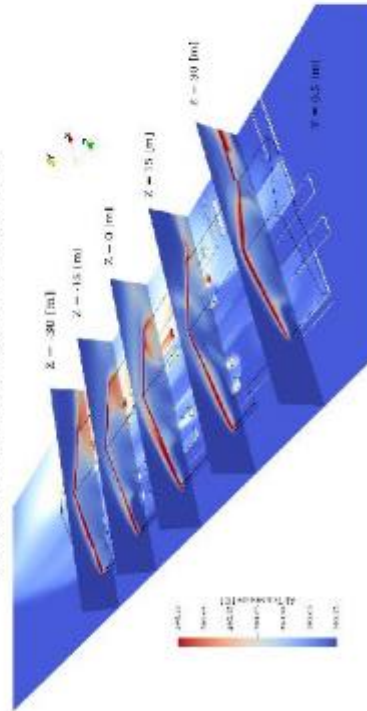
Поле вологості для конфігурації із відкритим дахом у зимових умовах



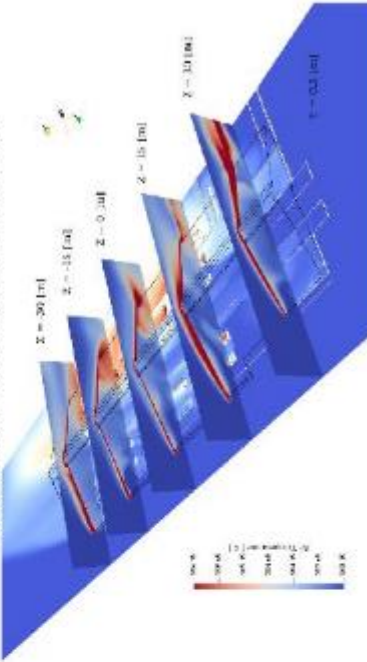
Поле швидкостей для конфігурації з закритим дахом у літніх умовах



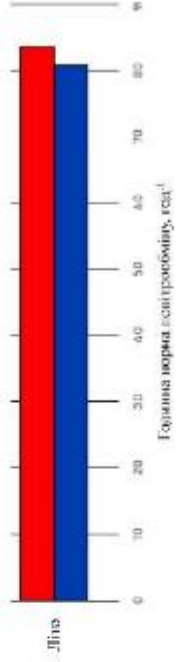
Поле швидкостей для конфігурації з відкритим дахом у літніх умовах



Температурне поле для конфігурації з закритим дахом у літніх умовах



Температурне поле для конфігурації з відкритим дахом у літніх умовах



Погодні умови, виміряна тривалість важкого дихання (HVD) та експериментальна процентна частка інтенсивності теплового стресу корів, як спостерігалось в корівнику влітку

Дата	Часовий інтервал	$T_{air,Max8h}$ [°C]	$RH_{air,Max8h}$ [%]	$DMI_{air,Max8h}$ [Вт/М²]	Тривалість важкого дихання [хв/день]	$X_{Чашно, Мілт}$ [%]	$X_{Модель, Score}$ [%]
23.06.2024	8	29,8	52,0	437	60	87,5	12,5
28.08.2024	8	29,1	50,3	370	23	95,2	4,8
02.07.2024	8	30,2	50,5	612	17	96,5	3,5
13.07.2024	8	29,2	51,2	475	57	88,1	11,9
29.07.2024	8	30,2	51,2	540	24	95,0	5,0
01.08.2024	8	29,4	53,5	576	36	92,5	7,5
Середній	8	29,6	51,4	502	36	92,5	7,5
Модел.	Стац.	30,0	55,0	500	-	-	-

Процент корів з рівнями інтенсивності теплового стресу, як передбачено методом CFD в літніх умовах

Інтенсивність теплового стресу	Індекс температурно-вологісного співвідношення (ТНІ)		Індекс еквівалентної температури для корів (ETIC)	
	Діапазон класів	X_{class} [%]	Діапазон класів	X_{class} [%]
	[°C]	[%]	[°C]	[%]
Термонейтральний	ТНІ < 68	0,0	ETIC < 23	25,3
Легкий	68 ≤ ТНІ < 72	0,0	23 ≤ ETIC < 26	70,5
Помірний	72 ≤ ТНІ < 80	25,0	26 ≤ ETIC < 31	4,2
Важкий	80 ≤ ТНІ < 90	75,0	31 ≤ ETIC < 37	0,0
Критичний	ТНІ ≥ 90	0,0	ETIC ≥ 37	0,0

$$T_{NI} = (1.8 T_{DB} + 32) - 0.0055 (100 - RH) \quad (1.8 T_{DB} - 26)$$

T_{DB} — температура сухого термометра в °C, а RH — відносна вологість у відсотках

$$ETIC = T_a + T_{rh} + T_u + T_{rad}$$

де T_a — температура повітря за сухим термометром (79 C); T_{rh} , T_u і T_{rad} — еквівалентна температура повітря, пов'язана з відносною вологістю, швидкістю повітря та сонячною радіацією відповідно (80 C).

Параметр	Варіант 1 (відкритий дах)	Варіант 2 (закритий дах)	Формули розрахунку
Капіталовкладення (грн)	620000	500000	C
Витрати на технічне обслуговування (грн)	93000	75000	$TO = 0,15 \times C$
Амортизаційні відрахування (грн)	93000	75000	$A = 0,15 \times C$
Заробітна плага (грн)	46080	23040	$ZP = H \times 3 \times T$
Загальні експлуатаційні витрати (грн)	232080	173040	$E = TO + A + ZP$
Додатковий економічний ефект (грн)	120000	-	ДЕ
Економічний ефект (грн)	179040	-	$EE = E1 - E2 + ДЕ$
Строк окупності капіталовкладень (роки)	0,67	-	$SO = (C1 - C2) / EE$

1. Мікроклімат та вентиляція в приміщеннях для утримання корів є критично важливими для забезпечення здоров'я, продуктивності та комфорту тварин. Правильна вентиляція регулює температуру, вологість і вивіду шкідливих газів, таких як аміак і метан, що позитивно впливає на екологічну стійкість ферми і тривалість експлуатації будівель. Нейтралізовані та напівізолізовані корівники є економічно вигіднішими, знижуючи вартість будівництва на 15-35 % у порівнянні з повністю ізоліованими. Вони забезпечують базовий рівень захисту від погодних умов і комфортний мікроклімат завдяки природній вентиляції. Для підтримання оптимального мікроклімату в безприв'язному боксовому утриманні використовуються сучасні системи, включаючи підйомні штори, вентиляційно-світлові дашки та автоматизовані системи контролю клімату, які сприяють постійному руху свіжого повітря і підвищують продуктивність тварин.
2. Розроблена модель, може коректно описувати взаємозв'язки між природною та механічною вентиляцією. Представлена методологія надає детальний опис як внутрішніх, так і зовнішніх потоків повітря; більше того, вона висвітлює всі критичні аспекти досліджуваних геометрій. Присутність внутрішніх стін є шкідливою через створення зон застою та гарячих точок у зонах, зайнятих тваринами. Тому необхідно обмежити присутність перешкод поблизу тварин якомога більше. Вентиляційна система правильно розмірена та спроектована, оскільки створює ефект тунельної вентиляції та забезпечує високий обмін повітря.
3. Результати симуляції у літніх умовах з існуючим макетом були порівняні з експериментальними даними з реального корівника. Виміряна процентна частка тварин у кожному класі інтенсивності теплого стресу, добре узгоджується з оцінкою за індексом еквівалентної температури для корів (ETIC) у результатах CFD. У свою чергу, індекс температури-вологи (ТН) сильно переоцінює інтенсивність теплого стресу у великої рогатої худоби. Тому рекомендується використовувати ETIC замість ТН для оцінки теплового стресу в гібридно-вентильованих корівниках.
4. CFD прогнозує дещо різну швидкість обміну повітря для макетів з відкритим і закритим дахом як в літніх, так і в зимових умовах. Для аналізованого гібридно-вентильованого корівника вплив геометрії даху на теплові умови в зонах перебування тварин є обмеженим. У порівнянні з моделлю із вентилятором, рішення з гребневими щілинами забезпечить вищий обмін повітря з нижчими витратами та споживанням електроенергії.
5. Економічний аналіз показує, що варіант 1 з відкритим дахом має більш річні експлуатаційні витрати в порівнянні з варіантом 2. Однак за рахунок створення сприятливих умов утримання корів забезпечує економічний ефект 179040 грн. Капіталовкладення можуть при цьому окупитися через 0,67 роки.