

УДК 636.4:636.083

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.66-84>

Г. М. Калетнік, проф., д-р екон. наук, В. М. Яропуд, доц., канд. техн. наук
Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна
e-mail: yaropud77@gmail.com

Експериментальні дослідження ефективності функціонування систем забезпечення мікроклімату від'ємного тиску в тваринницьких приміщеннях

Обґрунтування раціональної схеми системи забезпечення мікроклімату від'ємного тиску в тваринницьких приміщеннях на основі виробничих обстежень є основною метою проведених досліджень. За результатами досліджень встановлено, що для тваринницького приміщення із системою вентиляції наземного каналу забезпечується більше свіжого повітря в зоні перебування тварин, у порівнянні зі стельовою системою вентиляції і системою вентиляції через стінові канали.
повітря, температура, вологість, швидкість, забруднення, вентиляція, чисельне моделювання

Постановка проблеми. Якість повітря та якість мікроклімату у тваринницькому приміщенні можна охарактеризувати концентрацією забруднень (наприклад, аміаку, пилу та бактерій), а також температурою, вологістю та швидкістю повітря в зоні перебування тварин, оскільки високі концентрації забруднюючих речовин та високі температури негативно впливають на здоров'я тварин і продуктивність. Занадто низькі температури повітря або високі швидкості повітря в зоні перебування тварин також суттєво впливають на здоров'я тварин, їх поведінку та продуктивність, особливо для відлучених поросят.

Повітря у тваринницькому приміщенні містить забруднювачі, вологу та тепло, що виділяються тваринами, кормом, поверхнею підлоги та гною. Через вентиляцію видаляється забруднене повітря, волога і тепло. Система вентиляції забезпечує розподіл свіжого повітря в будівлі. Потрібно добре розуміти ефективність, з якою різні вентиляційні системи видаляють забруднення та тепло. Підвищення ефективності вентиляції є важливою стратегією для зниження концентрації забруднюючих речовин у приміщеннях для тварин [1].

Дослідження, які представлені, базуються на результатах практичних вимірювань в ході експериментальних досліджень і чисельного моделювання. Отримані уявлення про схеми повітряного потоку в зоні перебування тварин для трьох систем вентиляції, які зазвичай використовуються в приміщеннях для утримання свиней, нададуть змогу визначити їх ефективність і позбавити їх від недоліків. Вимірювання якості повітря (вмісту CO₂, температури, швидкості і вологості повітря) в зоні перебування тварин кожної системи вентиляції проводили для поросят на дорощуванні у виробничих умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сільське господарство України є провідною галуззю національної економіки. В умовах фінансово-економічної кризи перед вітчизняними сільськогосподарськими підприємствами постає важливе стратегічне завдання: з одного боку, забезпечити прибуткову діяльність, а з іншого, в майбутньому шукати шляхи розвитку, основою якого є ефективне використання с.-г відходів для енергетичної автономії сільськогосподарських підприємств [2].

Ефективна система управління сільськогосподарськими підприємствами базується на численних принципах, серед яких ключовими є системність, комплексність, відкритість, прозорість, гнучкість, висока адаптивність, оптимальне поєднання інтересів підприємства та інтересів регіонального та економічного розвитку як ціле та інші принципи. Наразі найбільш ефективне управління підприємствами сприяє розвитку аграрного ринку України в цілому [3].

Швидке зростання світового споживання енергії у тваринницьких комплексах викликало серйозну стурбованість з приводу виснаження енергетичних ресурсів. Зростання споживання енергії тваринницькими комплексами спричинено такими факторами, як зростання чисельності поголів'я тварин та підвищення вимог до забезпечення мікроклімату в приміщеннях [4].

За останні десятиліття споживання первинної енергії в тваринництві зросло на 29%. На підтримання мікроклімату у тваринницьких приміщеннях припадає велика частина загального кінцевого споживання енергії. Можна помітити, що енергія, яка використовується для охолодження, є важливою частиною загального споживання енергії, що постійно збільшується через зростаючий попит на кращий комфорт у тваринницьких приміщеннях. Енергетична політика багатьох країн світу зосереджена на скороченні споживання електричної енергії та впровадженні нових технологій, які вважаються екологічно чистими [5]. Через зростаючу потребу в кондиціонуванні та зростаючий інтерес до енергозбереження, пошук шляхів зменшення споживання твердого палива та збільшення використання відновлюваної енергії під час процесу кондиціонування у тваринницькому секторі агропромислового виробництва є надзвичайно важливим.

Тваринницький сектор агропромислового виробництва має найбільший потенціал для підвищення ефективності використання енергії. Видно, що енергія, яка використовується для охолодження повітря, є важливою частиною загального споживання енергії, яка постійно зростає у зв'язку з підвищеними вимогами до забезпечення оптимального мікроклімату у тваринницьких приміщеннях [6, 7, 8]. Найбільша частка енергозатрат тваринницьких приміщень припадає на створення нормативних параметрів мікроклімату, зокрема на підігрів припливного вентиляційного повітря. В опалювальний період теплогенеруючі пристрої цих приміщень споживають за різними оцінками від 40 до 90 % від сукупних затрат паливно-енергетичних ресурсів [9]. Тому навіть часткове зниження цих затрат приведе до суттєвого скорочення затрат на виробництво продукції тваринництва.

Ефективним способом скорочення витрат енергії тваринницьких приміщень є використання теплоти вентиляційних викидів для підігріву припливного вентиляційного повітря [10]. Складність використання теплоти повітря вентиляційних викидів полягає в тому, що викидне повітря є низькопотенційним джерелом теплової енергії [11].

Найбільш перспективними способами використання теплоти вентиляційних викидів є застосування теплообмінників (теплоутилізаторів). Теплообмінники (теплоутилізатори) вентиляційних викидів завдяки своїй ефективності знаходять все більше розповсюдження як в житлових та адміністративних приміщеннях, так і в спорудах промислового призначення. Застосування теплообмінника (теплоутилізатора) вентиляційних викидів в системі забезпечення мікроклімату тваринницьких приміщень дозволяє скоротити затрати енергії на підігрів припливного повітря до 80 % [12].

За останні два десятиліття для цілей обігріву в приміщеннях АПК було впроваджено багато нових пристроїв на основі відновлюваної енергії: нові установки рекуперації теплоти, теплові насоси, сонячні системи та багато інших [13]. Однак серед

них жодного пристрою на основі поновлюваних джерел енергії, які до цього часу не були широко застосовані в області охолодження.

Для забезпечення відведення повітря з приміщення свинарника створена автоматична вентиляційна система забору забрудненого повітря з тваринницьких приміщень [9, 14]. В результаті аналітичних досліджень даної системи математично представлено умову її ефективної роботи. Розроблена методика і реалізований на основі неї алгоритм дозволяє розраховувати площі отворів, які утворюють забірні заслінки із сервоприводами у патрубках для забору повітря. Отримані залежності зміни втрат тиску і потужності, яка необхідна для прокачування повітря через теплообмінник побічно-випарного типу циклу Майсоценка, від ширини центрального повітропроводу, витрат повітря через систему, довжини між патрубками системи і їх кількості [15]. До факторів, які викликають труднощі утилізації теплоти вентиляційних викидів тваринницьких приміщень відносяться [9]:

- значна запиленість повітря (до 6 мг/м^3);
- висока вологість повітря в приміщенні, яка при дотриманні нормативних параметрів повітряного середовища досягає 80 %;
- наявність в повітрі високої концентрації агресивних газів: аміаку – до 20 мг/м^3 , сірководню – до 10 мг/м^3 , вуглекислого газу – до 0,28 %;
- неприйнятність для більшості тваринницьких приміщень навіть часткової рециркуляції витяжного повітря;
- значна кількість технологічного обладнання, що є характерним для сучасних тваринницьких приміщень та зумовлена цим схема організації повітрообміну.

Постановка завдання. Метою досліджень є обґрунтування раціональної схеми системи забезпечення мікроклімату від'ємного тиску в тваринницьких приміщеннях на основі виробничих обстежень.

Виклад основного матеріалу. Ефективність видалення забруднень із зони перебування тварин представляється ефективністю видалення забруднень (ξ) [12]. Значення ξ визначається локальними вимірюваннями концентрацій (газоподібних) забруднюючих речовин, що викидаються у приміщенні для утримання свиней. Значення ξ у довільній точці ру момент t для будь-якого забруднення визначається як:

$$\xi_{x,p,t} = \frac{C_{x,e,t} - C_{x,i,t}}{C_{x,p,t} - C_{x,i,t}} \quad (1)$$

де $\xi_{x,p,t}$ – ефективність видалення забруднень в точці p у момент часу t для забруднення x ;

$C_{x,e,t}$ – концентрація забруднювача x у витяжному повітрі в момент часу t , мг/м^3 ;

$C_{x,p,t}$ – концентрація забруднювача x у точці p в момент часу t , мг/м^3 ;

$C_{x,i,t}$ – концентрація забруднювача x у притяжному повітрі в момент t , мг/м^3 .

Ефективність відведення теплоти від зони перебування тварин аналогічно може бути виражена через ефективність відведення теплоти (ζ). Рівняння (1) також можна використовувати для розрахунку ζ шляхом заміни локальних концентрацій на локальні значення температури.

Ефективність видалення забруднень і теплоти будуть дорівнювати одиниці в ідеально змішаному повітряному просторі. У приміщенні з ідеальним ламінарним потоком від входу до виходу та однорідно розподіленими джерелами забруднень і теплоти значення ефективності видалення забруднень і теплоти зменшуються від нескінченної кількості на вході до одиниці на виході.

Однак на практиці жодна вентиляційна система не є ідеальним ламінарним

потокотом або ідеальним змішуванням. Усі вентилязовані повітряні простори демонструють градієнти температури, вологості, забруднювачів і пилу через схеми повітряного потоку та різні місця розташування джерел забруднювачів, що призводить до значень ефективності видалення забруднень і теплоти вище або нижче одиниці. Значення ξ вище одиниці вказують, що свіже повітря спочатку потрапляє в зону перебування тварин, а потім проходить через джерела забруднювачів на шляху до виходу, що має вказувати на ефективне витіснення повітря в зону перебування тварин. Значення ξ нижче одиниці вказують на те, що концентрація забруднювача в зоні перебування тварин перевищує концентрацію забруднювача у витяжному повітрі. Ці нижчі значення можуть мати місце, коли частина свіжого повітря видаляється з приміщення, не викликаючи зміщення повітря в зоні перебування тварин, або коли довільна точка рзнаходиться поблизу джерела забруднення. Низькі значення ξ вказують на високий рівень забруднюючих речовин, які неефективно видаляються із зони перебування тварин.

Дослідження зосереджені на визначенні ефективності видалення забруднень і теплоти в зоні перебування тварин. Ефективне видалення забруднювачів із зони перебування тварин ($\xi > 1$) є бажаним за низьких показників вентиляції, що сприяє відповідній якості повітря в зоні перебування тварин та економії енергії для опалення, оскільки потрібно менше вентиляційного повітря. Ефективне відведення теплоти від зони перебування тварин ($\zeta > 1$) є бажаним за високої швидкості вентиляції, коли вентиляція в основному призначена для контролю температури в зоні перебування тварин.

У трьох приміщеннях, де знаходяться свині на дорощуванні, проведено вимірювання вмісту CO_2 і температури повітря, для визначення значень ξ і ζ . Експериментальні дослідження проводилися у виробничих умовах на свинофермах ФГ «Літагор» (Україна, Вінницька область, Козятинський район, с. Миколаївка), ТОВ «Субекон» (Україна, Вінницька область, Тиврівський район, смт Сутиски), ПСП «Агрофірма Нападівська» (Україна, Вінницька область, Вінницький район, с. Нападівка).

Свинарники побудовані за класичними проектами і мали подібні теплоізоляційні властивості. Внутрішня висота стін приміщень становила 2,20–2,40 м, найвища точка стелі знаходилась на висоті 4,00–4,20 м. План і поперечний переріз трьох приміщень показані на рис. 1–3. На рис. 1–3 також відмічені точки відбору проб. Приміщення узагальнюють три найбільш поширених системи вентиляції.

Варіант 1 (ФГ «Літагор») – система вентиляції наземного каналу (рис. 1). В приміщенні розміщені 12 груп по 25 поросят на дорощуванні. Площа підлоги становила $0,30 \pm 0,01 \text{ м}^2/\text{голову}$, з яких $56,6 \pm 0,1 \%$ є решітчастою, а $43,4 \pm 0,1 \%$ – суцільною. Загони були $3,30 \pm 0,01 \text{ м} \times 3,65 \pm 0,01 \text{ м}$. Опалення забезпечувалося трубами з гарячою водою вздовж стіни в проході для операторів і на суцільній підлозі в станках. Вентиляційне повітря попередньо нагрівалося до $5 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ у центральному проході, звідки воно надходило в наземний канал через отвір у підлозі. Повітря поступало під тверду підлогу загонів і до проходу для оператора, минаючи простір під лотками для гною, які розташовані під пластиковими планками. Повітря надходило в приміщення через щілину ($0,060 \pm 0,005 \text{ м}$ завширшки) по довжині ($7,30 \pm 0,01 \text{ м}$) підлоги проходу оператора. Середня швидкість повітря в щілині коливалася від $0,12 \text{ м/с}$ до $1,13 \text{ м/с}$, а подача повітря у вентиляційній системі – від $3,5$ до $26 \text{ м}^3/\text{год}$ на тварину.

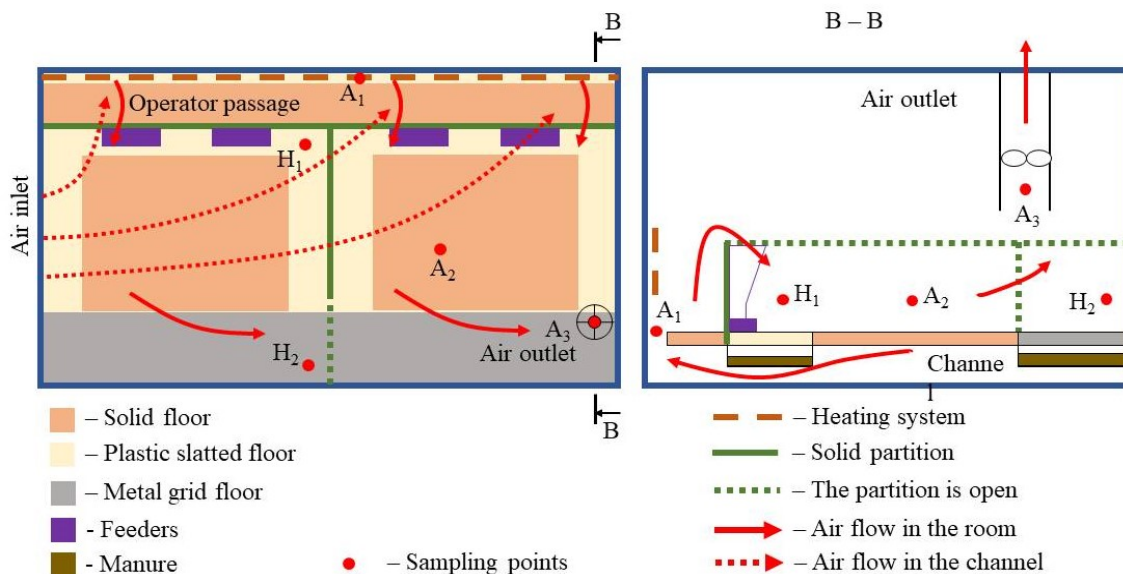


Рисунок 1 – Схема системи вентиляції наземного каналу (варіант 1)

Джерело: розроблено авторами

У конструкції передбачалося, що свіже повітря буде проходити з низькою швидкістю через вхідний отвір і заповнювати прохід оператора. Очікувалося, що звідти повітря буде перетікати через передню частину загону і через перегородку загону (висота $0,60 \pm 0,01$ м) – до тварин. Очікувалося, що в загоні повітря буде надходити до задньої частини загону, надаючи свіже повітря в зону перебування тварин і видаляючи забруднення з неї. В основі процесу вентиляції лежить витіснення та перемішування повітря. Вентиляція приводилася в дію вентилятором (діаметр $0,35 \pm 0,02$ м), який розташований у задній частині приміщення на висоті $1,00 \pm 0,01$ м, на відстані $0,05 \pm 0,01$ м від задньої стіни та $0,70 \pm 0,01$ м від бічної стіни.

Варіант 2 (ПСП «Агрофірма Нападівська») – стельова система вентиляції (рис. 2). В приміщенні розміщені 16 груп по 20 поросят на дорощуванні. Площа підлоги становила $0,90 \pm 0,01$ м²/голову, з яких $50,0 \pm 0,1$ % була решітчаста, а $50,0 \pm 0,1$ % – суцільна. Загони були $5,70 \pm 0,01$ м \times $3,00 \pm 0,01$ м. Опалення забезпечувалося теплообмінниками з гарячою водою біля зовнішньої стіни у приміщеннях. Вентиляційне повітря проходить крізь 32 стельових припливних канали ($0,30 \pm 0,01$ м \times $0,50 \pm 0,01$ м), а потім до двох витяжних шахтах (\varnothing $0,65 \pm 0,01$ м), які розміщені в центрі приміщення в стелі. Витрати повітря у витяжних шахтах коливаються від $3,5 \pm 0,1$ до $25 \pm 0,1$ м³/год на тварину. В якості охолодження в літній період використовуються форсунки зрошення, які розміщені у стінових припливних каналах, що забезпечують дрібнодисперсну подачу води продуктивністю 14–18 кг/год.

Варіант 3 (ТОВ «Субекон») – система вентиляції через стінові канали (рис. 3). В приміщенні розміщені 8 груп по 25 поросят на дорощуванні (200 голів). Площа підлоги становила $1,08 \pm 0,01$ м²/голову, з яких $94,3 \pm 0,1$ % була решітчаста, а $5,7 \pm 0,1$ % – суцільна. Загони мали розміри $4,5 \pm 0,01$ м \times $5,5 \pm 0,01$ м. Опалення забезпечувалося теплообмінниками з гарячою водою біля зовнішньої стіни у приміщеннях. Вентиляційне повітря проходить крізь 12 стінових припливних каналів ($0,35 \pm 0,01$ м \times $1,00 \pm 0,01$ м), а потім до трьох витяжних шахт (\varnothing $0,65 \pm 0,01$ м), які розміщені в центрі приміщення у стелі. Витрати повітря у витяжних шахтах коливаються від $3,5 \pm 0,1$ до $25 \pm 0,1$ м³/год на тварину. В якості охолодження в літній період використовуються форсунки зрошення, які розміщені у стінових припливних каналах, що забезпечують дрібнодисперсну подачу води продуктивністю 14–18 кг/год.

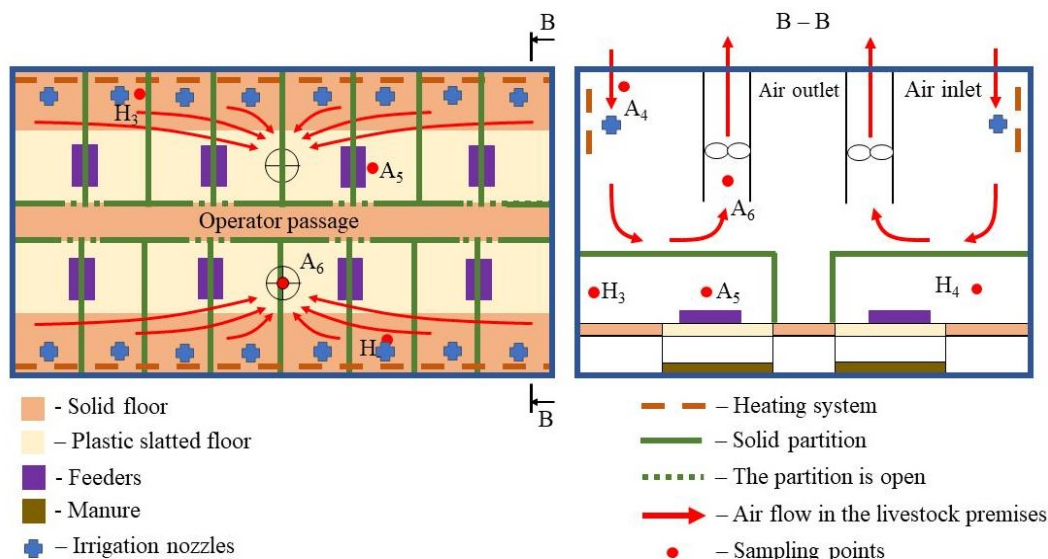


Рисунок 2 – Схема стельової системи вентиляції (варіант 2)

Джерело: розроблено авторами

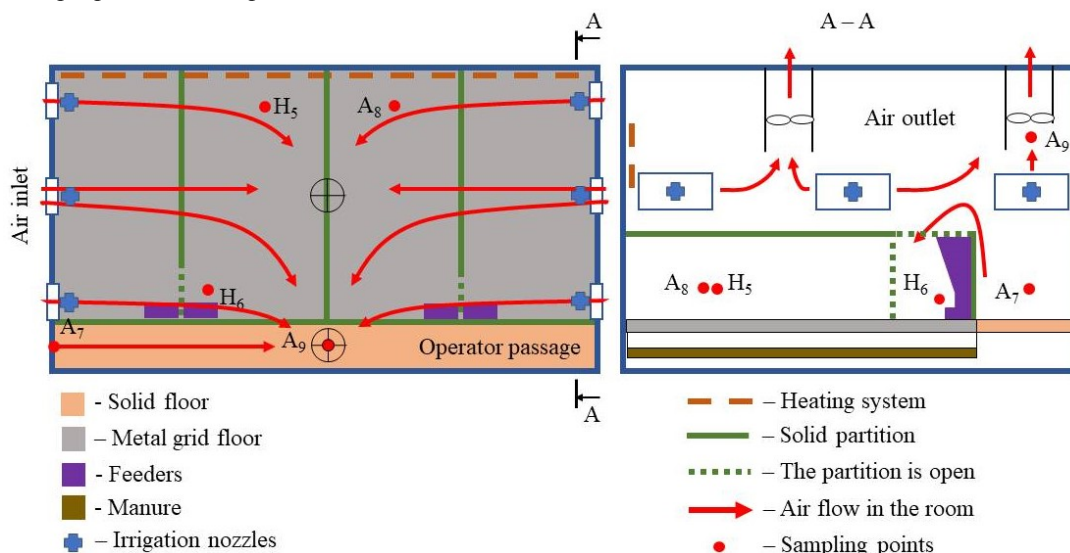


Рисунок 3 – Схема приміщенні із системою вентиляції через стінові канали (варіант 3)

Джерело: розроблено авторами

Фото з виробничих умов проведення досліджень трьох варіантів систем вентиляції свинарських приміщень представлено на рис. 4.

Контроль інтенсивності вентиляції та опалення у всіх трьох приміщень базувався на вимірній внутрішній температурі та налаштуваннях клімат-контролера взимку і влітку. Поросят відлучають з 20–21 денного віку і переводять у групові станки для дорощування до 77–78 денного віку, а саме до переведення в групу відгодівельного або ремонтного молодняку (при досягненні маси 38 кг). Тому загальний термін перебування поросят на дорощуванні складає в середньому 56–57 днів.

У перший день після відлучення поросят поміщали в приміщення, температура в якому складала 23–25 °С. Для зимового періоду (починаючи з лютого) повітря в приміщенні підігрівали за допомогою системи опалення, в літній період – охолоджували за допомогою системи зрошення повітря.

У кожному приміщенні розташовано п'ять точок відбору проб, три з яких – в зоні перебування тварин (рис. 1–3).

Міркування щодо визначення розташування цих точок відбору проб в зоні перебування тварин були такими: наявність точки відбору проб може не впливати на поведінку тварин у груповому станку; очікуються відмінності в концентрації CO₂ або температури в межах зони перебування тварин, тому точки відбору проб повинні бути розподілені таким чином, щоб це можна було виміряти. Принаймні одна з точок відбору проб має бути розташована в зоні очікуваного знаходження (відпочинку) тварин; розташування точок відбору проб має бути практичним для власника господарства.

Три точки відбору проб в приміщенні були підключені до системи ТМ-32/Н-5Т (Укрреле, Україна) та ArduinoNano (ArduinoSoftware) для вимірювання концентрації CO₂ і температури, використовуючи відповідно датчик вмісту вуглецевого газу SEN0159 (SEN0159, КНР), точність – $\pm 5\%$ і датчик температури DS18B20 (DallasSemiconductor, США), точність – $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дані записувалися послідовно кожену годину на персональний комп'ютер з використанням програмного забезпечення компанії Укрреле (Україна). Ці точки відбору проб були розташовані у зоні входу повітря, у зоні випуску повітря та в зоні перебування тварин приблизно на $0,20 \pm 0,03$ м над підлогою та позначені літерою «А» на рис. 1–3.



Система вентиляції наземного каналу



Стельова система вентиляції



Система вентиляції через стінові канали

Рисунок 4 – Загальний вигляд свинарських приміщень із різними системами вентиляції
Джерело: розроблено авторами

Ще дві точки відбору проб в зоні перебування тварин були підключені до ручної вимірювальної системи мультигазовий детектор WALCOM MGD-04 (КНР), точність $\pm 5\%$, для вимірювання концентрації CO_2 , яка реєструвалася один раз на день впродовж першого тижня партії та тричі на тиждень пізніше (по черзі вранці та вдень). Ці точки відбору проб були розташовані приблизно на $0,20 \pm 0,03$ м над підлогою та позначені літерою «Н» на рис. 1–3. Окрім цього, один раз при найвищих і найнижчих температурах навколишнього середовища проводились фотографування приміщень свинарника тепловізором FLIR T200 (Teledyne FLIR, США) для визначення градієнту розподілу температури.

З автоматичних і ручних точок відбору проб відбирали зразки повітря та транспортували через систему тефлонових труб до датчика CO_2 за межами приміщень таким чином, щоб поведінка тварин і характеристики повітряного потоку на ці показники не впливали. Термопари та система тефлонових труб були захищені від тварин перфорованими залізними трубами. У вентиляційній витяжній шахті безперервно вимірювали інтенсивність вентиляції з використанням анемометра Venetech GM8903 (КНР). Лежачу поведінку тварин реєстрували один раз на тиждень за середньою кількістю поросят, які лежали в межах кола діаметром 1 м навколо кожної точки відбору проб.

Порода поросят – трипорідний гібрид генетики PIC ($F1 \times PIC 337$). Всі дані були зібрані за період грудень–березень і червень–серпень 2022-2023 рр. Щодня світло в приміщеннях було ввімкненим з 7:00 до 16:00.

Зміна клімату стала загрозливою проблемою для всіх країн світу. Тенденція зміни клімату безпосередньо впливає на економічний розвиток будь-якої країни. Україна є аграрною країною, і кліматичні умови безпосередньо впливають на її економічну стабільність. Територія України перебуває в помірному кліматичному поясі в області помірно континентального клімату [16], який характеризується жарким літом і холодною зимою. Аналіз зміни температури повітря і вологості в навколишньому середовищі Вінницької області (рис. 5) дає змогу визначити тривалість літнього і зимового періодів 2022 р. [17].

З рис. 5 та більш розширених даних [17] видно, що температура і вологість досить суттєво коливаються впродовж доби.

Враховуючи необхідність постійного повітрообміну між тваринницьким приміщенням і навколишнім середовищем, вимогами до показників мікроклімату для різних статевікових груп очевидно виникає необхідність в зимовий період підвищувати температуру повітря з навколишнього середовища, яка потрапляє до приміщення, а в літній навпаки – знижувати її.

Окрім цього, в зв'язку із високим значенням вологості повітря (від 80 до 100 %) в навколишньому середовищі в зимовий період необхідно його осушувати під час руху його до приміщення. А в літній період при високих температурах повітря (більше 30 °C), навпаки, зволожувати припливне повітря.

У таблиці 1 наведено середні значення зовнішніх і вхідних умов під час експерименту. У приміщенні зі стельовою вентиляцією вхідне повітря зазвичай мало нижчу температуру та концентрацію CO_2 , оскільки вхідне повітря для цього приміщення витягувалося ззовні, а не з центрального проходу.

У таблиці 2 наведені результати продуктивності тварин під час дослідних партій. Незважаючи на деякі відмінності, виробничі результати в усіх трьох приміщеннях були достатніми, що вказує на те, що всі три системи вентиляції функціонували на задовільному рівні, однак з деякими недоліками. Результати продуктивності тварин не аналізувалися, оскільки експериментальні дані не були

придатні для визначення відмінностей у виробництві, спричинених системою вентиляції. Крім різниці в системах вентиляції, існували відмінності в розмірі групи, плануванні підлоги та системах годування. Щоб порівняти результати вирощування тварин, усі ці фактори повинні бути враховані, системи вентиляції повинні знаходитися в одній будівлі.

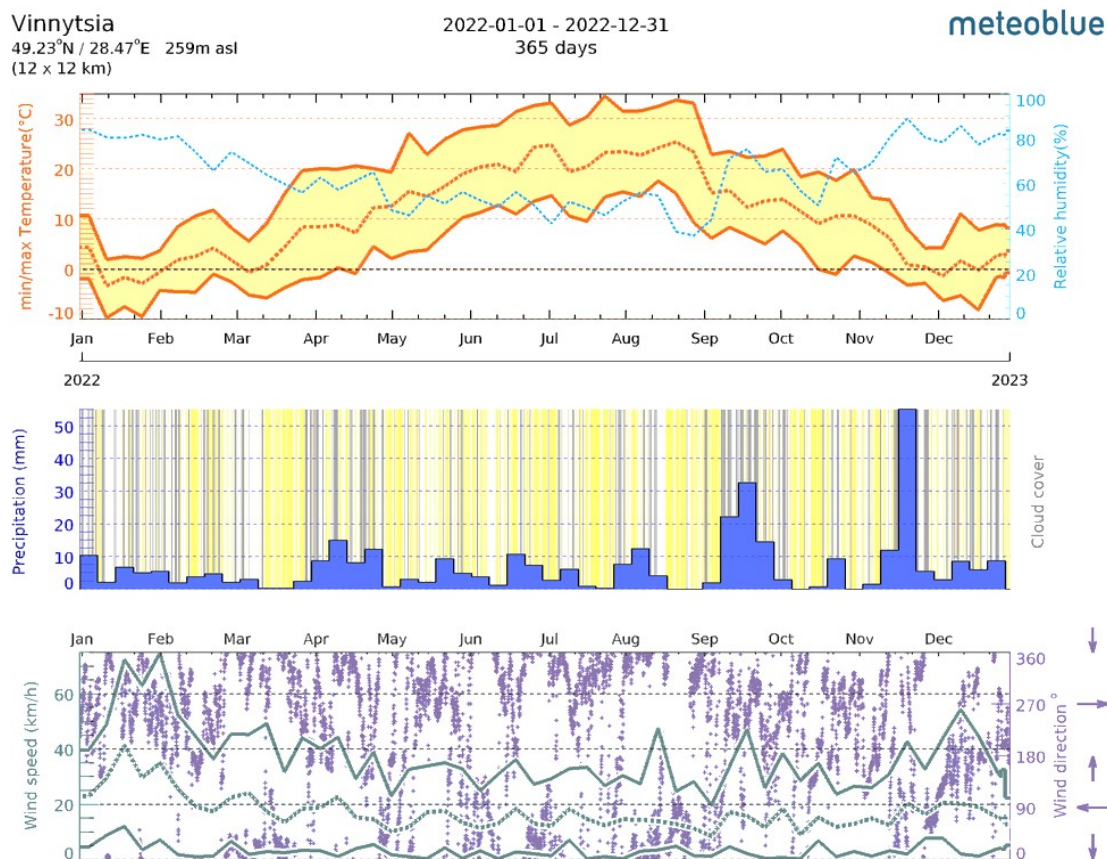


Рисунок 5 – Динаміка температури повітря, вологості та інших параметрів навколишнього середовища міста Вінниці (meteoblue.com, 2022)

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Мінімальні, максимальні та середні значення зареєстрованих концентрацій CO₂ у повітрі та його температур

Варіант системи вентиляції	Варіант 1 – система вентиляції наземного каналу		Варіант 2 – стельова система вентиляції		Варіант 3 – система вентиляції через стінові канали	
	I (зимова)	II (літня)	I (зимова)	II (літня)	I (зимова)	II (літня)
Партія	I (зимова)	II (літня)	I (зимова)	II (літня)	I (зимова)	II (літня)
Дата початку	17.12	07.06	25.01	14.06	20.01	15.06
Дата закінчення	11.02	02.08	19.02	09.08	14.02	10.08
Кількість спостережень	881	1052	721	1072	721	989
CO ₂ вхідне повітря (мг/м ³)						
Мінімум	698	633	662	628	684	623
Максимум	1243	1271	1042	1123	1222	1204
Середнє	805	747	744	735	773	736

Продовження таблиці 1

Зовнішня температура повітря (°C)						
Мінімум	- 10,5	13,6	- 10,3	12,6	- 11,4	13,5
Максимум	11,1	38,1	10,2	35,9	11,2	34,6
Середнє	2,8	23,7	3,8	21,6	3,2	24,3
Температура повітря на вході (°C)						
Мінімум	8,2	14,1	- 0,1	13,5	6,1	14,4
Максимум	15,1	34,6	13,7	35,2	15,1	32,7
Середнє	11,2	22,3	7,5	20,3	10,2	23,1

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Середня продуктивність тварин за двома партіями

Варіант системи вентиляції	Варіант 1 – система вентиляції наземного каналу		Варіант 2 – стельова система вентиляції		Варіант 3 – система вентиляції через стінові канали	
	Партія	I (зима)	II (літня)	I (зима)	II (літня)	I (зима)
Середня початкова маса поросяти (кг)	7,98 ±0,56	7,11 ±0,75	8,21 ±0,64	8,67 ±0,56	7,55 ±0,63	7,96 ±0,45
Середня кінцева вага поросяти (кг)	26,22 ±0,76	28,32 ±0,66	24,75 ±0,68	25,33 ±0,71	22,71 ±0,53	24,06 ±0,64
Середній приріст за день на порося (кг)	0,326 ±0,023	0,379 ±0,027	0,295 ±0,019	0,298 ±0,032	0,270 ±0,031	0,288 ±0,027
Середній коефіцієнт конверсії корму (кг/кг)	1,30 ±0,12	1,42 ±0,09	1,33 ±0,10	1,39 ±0,08	1,35 ±0,15	1,40 ±0,14

Джерело: розроблено авторами

Вміст CO₂ і температури, зібрані автоматичною системою, були перевірені на наявність відсутніх даних. У випадках, коли одне значення (вхід, зона перебування тварин або вихід) було відсутнє, так що ξ та ζ не можна було визначити, інші два вимірювання видалялися. Три автоматичні вимірювання (вхід, зона перебування тварин та вихід) були визначені як одне спостереження і використані для розрахунку ξ та ζ за допомогою рівняння (1) (кількість спостережень у таблиці 1). Концентрації CO₂ в зоні перебування тварин, зібрані ручною системою, були об'єднані з найближчими (за часом) концентраціями CO₂ на вході та виході, визначеними автоматичною системою. Це було визначено як одне спостереження та використано для розрахунку ξ та ζ за допомогою рівняння (1).

Середнє значення і стандартне відхилення ξ та ζ визначали для кожної точки відбору. У графічному аналізі значення ξ і ζ були нанесені на графік відносно швидкості повітря у вентиляції. Неможливо провести статистичний аналіз через взаємозв'язки між вагою тварин, станом опалення, внутрішньою температурою та швидкістю повітря у вентиляції.

Середні значення та стандартні відхилення вимірюваних концентрацій CO₂ і температури повітря в зоні перебування тварин з автоматичними вимірювальними системами наведені в таблиці 3 та на рис. 6. Середні значення коротко підсумовують роботу системи вентиляції в точках відбору проб. Значення стандартних відхилень вказують на варіацію даних і, як очікується, будуть високими, оскільки виміряні змінні безпосередньо пов'язані зі швидкістю повітря у вентиляції, яка змінюється впродовж партії та між партіями залежно від числа днів і зовнішнього клімату.

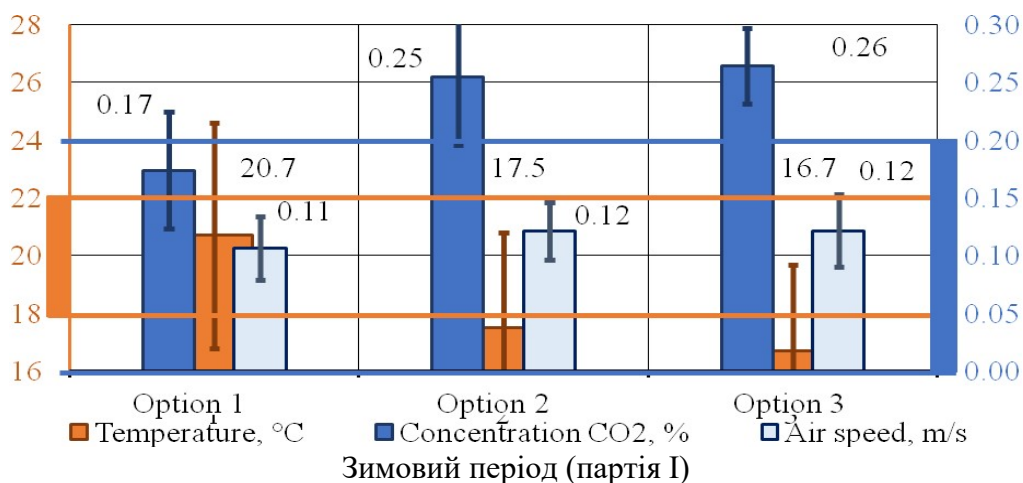
Таблиця 3 – Середнє значення автоматично зареєстрованої концентрації CO₂, температури в зоні перебування тварин та швидкості потоку повітря

Варіант системи вентиляції		Варіант 1 – система вентиляції наземного каналу		Варіант 2 – стельова система вентиляції		Варіант 3 – система вентиляції через стінові канали	
		І (зимова)	ІІ (літня)	І (зимова)	ІІ (літня)	І (зимова)	ІІ (літня)
Концентрація CO ₂ , мг/м ³	Сер.	2130	2177	3123	2642	3237	2562
	Відх.	617	830	721	832	403	707
Концентрація CO ₂ , %	Сер.	0,17	0,18	0,25	0,22	0,26	0,21
	Відх.	0,05	0,07	0,06	0,07	0,03	0,06
Температура, °С	Сер.	20,7	23,2	17,5	26,6	16,7	25,7
	Відх.	3,9	3,5	3,3	2,9	3	3,9
Швидкість потоку повітря, м ³ /год на гол.	Сер.	5,1	12,3	5,8	12,4	5,8	13,9
	Відх.	1,3	3,3	1,2	4,1	1,5	3,8
Швидкість повітря, м/с	Сер.	0,11	0,26	0,12	0,26	0,12	0,29
	Відх.	0,03	0,07	0,03	0,09	0,03	0,08

Джерело: розроблено авторами

Найнижча середня швидкість вентиляції була виміряна в приміщенні з вентиляцією наземного каналу, де середня концентрація CO₂ в зоні перебування тварин була найнижчою. Найвища середня швидкість вентиляції була зафіксована в приміщенні з пористою стельовою вентиляцією, де середня концентрація CO₂ і температура повітря в зоні перебування тварин були найвищими. У партії 2 (літній період) у всіх приміщеннях внутрішня температура та середня швидкість вентиляції були вищими, ніж в інших партіях через вищі зовнішні температури, що призвело до нижчих концентрацій CO₂.

Отримані дані (рис. 6) демонструють невідповідність нормованим значенням показників мікроклімату в зоні перебування тварин в літній період для всіх варіантів систем вентиляції. Для зимового періоду виміряні параметри мікроклімату відповідають нормованим значенням лише для системи вентиляції наземного каналу.



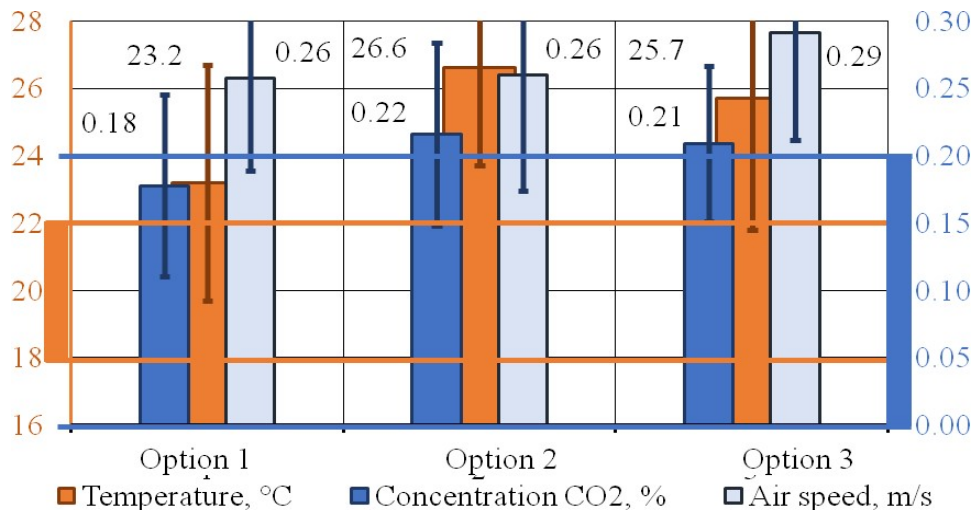


Рисунок 6 – Середні значення автоматично зареєстрованої концентрації CO₂, температури в зоні перебування тварин та швидкості повітря

Джерело: розроблено авторами

Середні значення для ξ і ζ наведені в таблиці 3 та на рис. 7. У приміщенні з вентиляцією з наземного каналу значення ξ і ζ були найвищими, як і очікувалося. У приміщенні з пористою стельовою вентиляцією ξ був найнижчим. У всіх приміщеннях були відмінності між значенням ξ і значенням ζ , що вказує на те, що розподіл теплоти несхожий на розподіл CO₂. У всіх приміщеннях значення відхилення для ξ були вищими, ніж для ζ , оскільки концентрація CO₂ коливалася більше, ніж температура.

Для трьох приміщень у таблиці 4 наведено середні значення ξ на основі всіх зареєстрованих вручну концентрацій CO₂ і порівнюваних автоматично зареєстрованих концентрацій CO₂.

У приміщенні з системою вентиляції наземного каналу відмінності у значенні ξ серед різних точок відбору проб були найбільшими, як і очікувалося, оскільки вентиляція базується на витісненні повітря. Значення ξ було найвищим на Н1, оскільки ця точка відбору проб була розташована відносно близько до джерела свіжого повітря.

Таблиця 4 – Середні значення ефективності видалення забруднень ξ і ефективності відведення теплоти ζ з зони перебування тварин

Варіант 1 – система вентиляції наземного каналу				
Партія	ξ		ζ	
	Середнє	Відхилення	Середнє	Відхилення
I (зимова)	1,37	0,41	1,12	0,06
II (літня)	1,27	0,48	1,14	0,12
Варіант 2 – стельова система вентиляції				
Партія	ξ		ζ	
	Середнє	Відхилення	Середнє	Відхилення
I (зимова)	1,01	0,28	1,01	0,02
II (літня)	1,02	0,35	0,94	0,25
Варіант 3 – система вентиляції через стінові канали				
Партія	ξ		ζ	
	Середнє	Відхилення	Середнє	Відхилення
I (зимова)	1,14	0,22	0,94	0,09
II (літня)	1,27	0,38	0,92	0,12

Значення ξ було нижчим у точці відбору проб А2 і найнижчим у точці відбору проб Н2, тому що ці точки були розташовані посередині та в задній частині, ближче до вихідного отвору для повітря. Значення ξ зменшувалося, коли повітря протікало від передньої до задньої частини станка. Вплив кількості тварин поблизу точки відбору не враховувався (табл. 5).

У приміщенні зі стельовою системою вентиляції різниця в значенні ξ серед різних точок відбору проб була більшою, ніж очікувалося (табл. 5), що вказує на те, що повітря не було однорідним. Причиною цього стала тепловіддача тварин. У місцях відпочинку тварин відбувався висхідний потік повітря, що призводило до низхідного потоку свіжого повітря в місцях, де тварини не лежали. Кількість тварин навколо точки відбору Н4 була високою порівняно з кількістю тварин навколо точки відбору Н3 (табл. 5), що пояснює вище значення ξ в Н3. Це означає, що значення ξ в зоні перебування тварин зі стельовою системою вентиляції нижчі в місцях відпочинку (лежання) тварин.

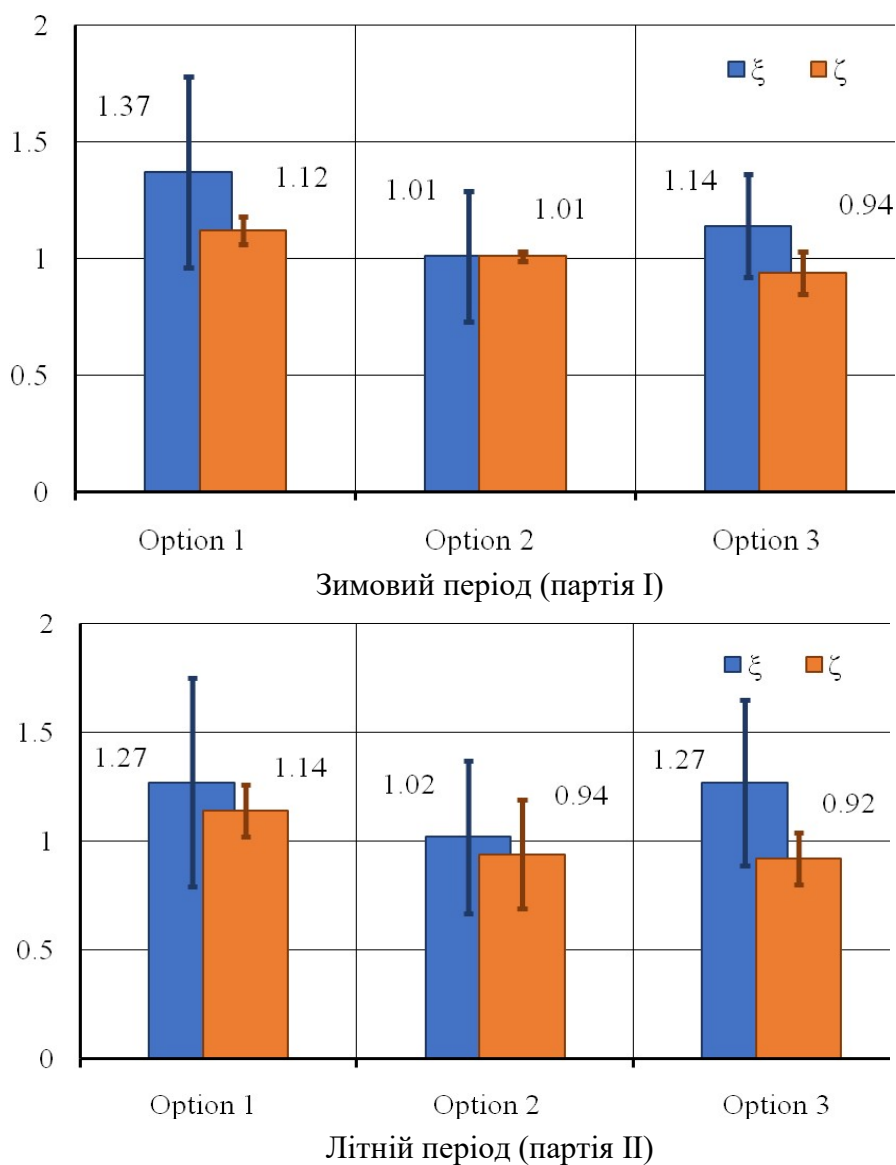


Рисунок 7 – Середні значення ефективності видалення забруднень ξ і ефективності відведення теплоти ζ з зони перебування тварин

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 5 – Середнє значення ефективності видалення забруднень ξ у різних точках відбору проб і середня кількість тварин у межах 1 м діаметра кола навколо точки відбору проб (середнє в зимовий і літній періоди)

Точка відбору проб	ξ		Кількість тварин
	Середнє	Відхилення	
Варіант 1 – система вентиляції наземного каналу			
A2	1,39	0,36	3,5
H1	1,81	0,95	4,7
H2	1,05	0,33	1,2
Варіант 2 – стельова система вентиляції			
A5	0,93	0,26	3,9
H3	1,31	0,45	2,1
H4	0,72	0,25	4,4
Варіант 3 – система вентиляції через стінові канали			
A8	1,23	0,22	3,3
H5	0,78	0,17	2,2
H6	1,15	0,35	1,6

У приміщенні з системою вентиляції через стінові канали значення ξ було найвищим у точці відбору проб A8 у задній частині одного станку. У точці відбору проб H5 значення ξ було значно нижчим, ніж у точках відбору проб H6 і A8. Це не очікувалося, але це можна пояснити структурою повітряного потоку. Коли свіже повітря надходило в приміщення, багато повітря надходило до кінця приміщення, поки воно не досягало торцевої стіни, особливо за високої швидкості повітря у вході. Це призвело до більшого витіснення повітря далі від каналів. Забруднене повітря з цих станків протікало назад до каналу через інші станки, що призвело до нижчого значення ξ у станках ближче до каналів. Значення ξ у точці H6 нижче, ніж у точці A8, що вказує на те, що концентрація CO₂ вища в передній частині, ніж у задній частині. Планування приміщення з сімома станками замість двох вплинуло на розподіл тварин як джерел CO₂ і теплоти в приміщенні.

Графічний аналіз впливу інтенсивності вентиляції на значення ефективності видалення забруднень ξ і ефективності відведення теплоти ζ для трьох приміщень представлено на рис. 8–10. Ліві осі показують середні значення ξ і ζ для класу вентиляції (0,43 м³/год на тварину). Як згадувалося раніше, значення ξ має основне значення в періоди з низькою вентиляцією, а ζ – в періоди з високою вентиляцією. Праві осі на рис. 8–10 показують відсоток часу, протягом якого швидкість вентиляції була в межах певного класу вентиляції.

У приміщенні з системою вентиляції наземного каналу значення ζ було постійним, а значення ξ зменшувалося зі збільшенням швидкості потоку повітря (рис. 8). Причина такого зменшення значення ξ полягає в тому, що швидкість повітря у вхідному отворі призвела до того, що повітряний струмінь піднімався вище в приміщення зі збільшенням вентиляції, що змінило структуру повітряного потоку. При вищих показниках вентиляції значення ξ і ζ демонструють більшу дисперсію, оскільки було менше спостережень із високими показниками вентиляції.

Для стельової системи вентиляції ξ був відносно постійним зі збільшенням вентиляції, а ζ зменшувався зі збільшенням вентиляції (рис. 9). Це можна пояснити збільшенням короткого замикання повітряного потоку: частина свіжого повітря, що

надходить через стелю, видаляється з приміщення, не досягнувши зони перебування тварини, і без відведення теплоти від неї.

У приміщенні з системою вентиляції через стінові канали (рис. 10) зі збільшенням вентиляції ζ залишається майже на тому самому рівні, близькому до 1, оскільки значення ξ зростає. Причиною цього є швидкість повітря в каналах. Зі збільшенням вентиляції швидкість повітря в канал збільшується, що змінює структуру повітряного потоку, що призводить до більшого руху повітря в задній частині приміщення ближче до точки відбору.

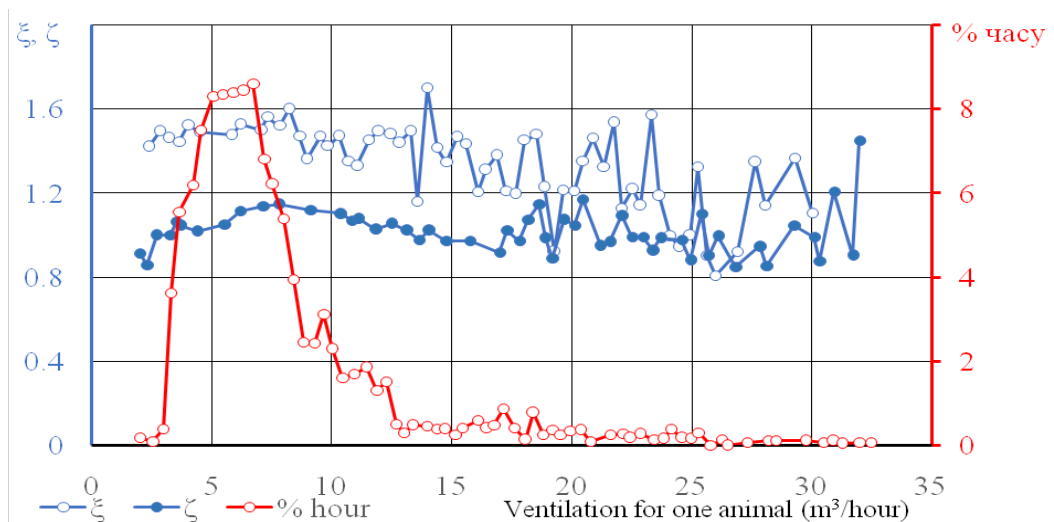


Рисунок 8 – Вплив інтенсивності вентиляції на значення ξ та ζ в точках автоматичного відбору проб і розподіл частоти інтенсивності вентиляції в приміщенні із системою вентиляції наземного каналу (варіант 1)

Джерело: розроблено авторами

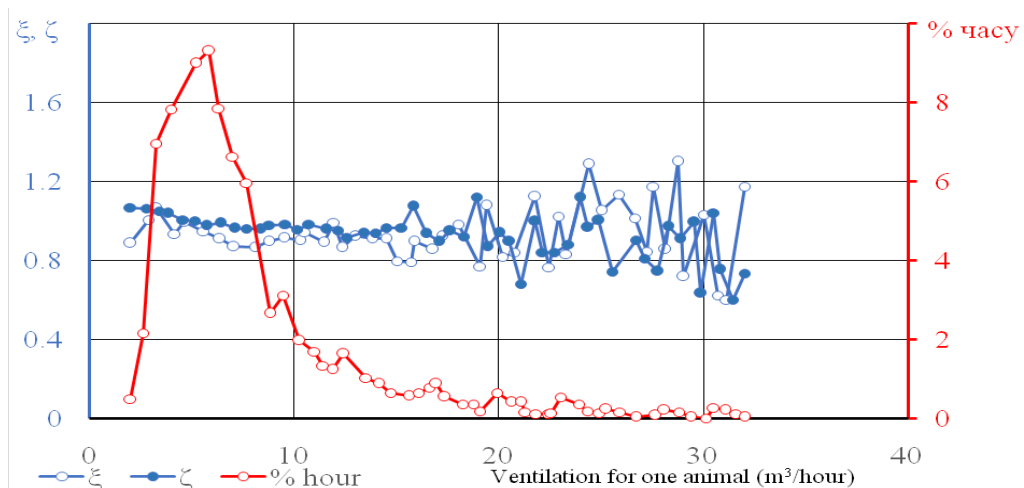


Рисунок 9 – Вплив інтенсивності вентиляції на значення ξ та ζ в точках автоматичного відбору проб і розподіл частоти інтенсивності вентиляції в приміщенні із стельовою системою вентиляції (варіант 2)

Джерело: розроблено авторами

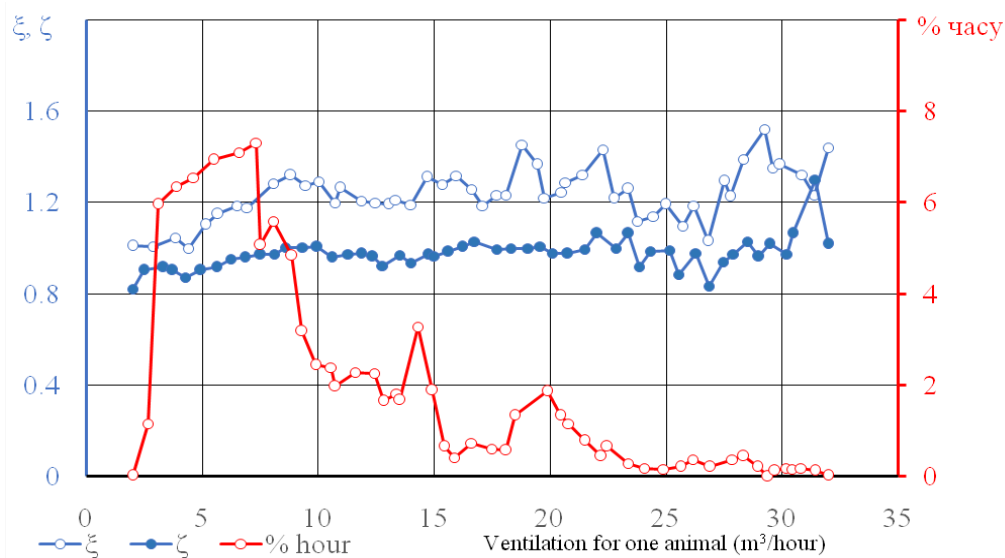


Рисунок 10 – Вплив інтенсивності вентиляції на значення ξ та ζ в точках автоматичного відбору проб і розподіл частоти інтенсивності вентиляції в приміщенні із системою вентиляції через стінові канали (варіант 3)

Джерело: розроблено авторами

Не виявлено жодного впливу зареєстрованого стану опалення приміщення на значення ξ та ζ . Вимірювальна система не змогла визначити цей ефект. Хоча момент надходження гарячої води в приміщення був зафіксований, це вказувало лише на час початку опалення; теплопередача продовжується після того, як гаряча вода перестає рухатися по трубах. Крім того, в приміщеннях з наземними каналами і стіновими каналами не проводилося розмежування між гарячим водяним підігрівом повітря в приміщенні і підігрівом підлоги.

Приміщення з наземною вентиляцією каналу показало найвище значення ξ і ζ і найнижчу концентрацію CO_2 в зоні перебування тварин, навіть якщо це приміщення мало найвищу концентрацію на вході. Вентиляція наземного каналу показала кращу якість повітря в зоні перебування тварин.

Конструкція системи вентиляції впливає на якість повітря в зоні перебування тварин. Очікується, що високе значення ξ , яке призводить до нижчих концентрацій забруднюючих речовин у холодних умовах з мінімальною вентиляцією, і високе значення ζ , що призводить до нижчих температур у теплих умовах із високою швидкістю вентиляції, покращать продуктивність тварин. Значення ξ та ζ не залежать виключно від конструкції вентиляційної системи. Одним із дуже важливих факторів є місце проведення вимірювань, що можна проілюструвати порівнянням результатів із різних точок відбору проб у кожному приміщенні. Середні значення ξ та ζ в зоні перебування тварин нададуть краще враження про ефективність витіснення повітря, але важко виміряти концентрацію CO_2 .

Системи з високими значеннями ξ та ζ , що вказують на ефективну вентиляцію в зоні перебування тварин, можуть використовувати нижчі показники вентиляції. Це можна проілюструвати налаштуваннями приміщення, які використовувалися в цьому дослідженні: налаштування вентиляції, що використовувалися в приміщенні з вентиляцією із наземним і стінними каналами, були нижчими, ніж у приміщеннях з стельовою системою вентиляцією. Це може бути важливим аспектом у зниженні витрат на очищення повітря, що є одним із способів ефективного скорочення викидів із тваринницьких приміщень.

Ефективна вентиляція може бути реалізована, за умови розташування впускного отвору повітря поблизу зони перебування тварин. Це може збільшити ризик високої швидкості повітря або протягів у зоні перебування тварин. Якість повітря та тепловий комфорт є важливими чинниками у створенні здорового мікроклімату та запобіганні проблемам зі здоров'ям тварин, належним утриманням і неоптимальним виробництвом.

Висновки. За результатами досліджень встановлено, що для тваринницького приміщення із системою вентиляції наземного каналу забезпечується більше свіжого повітря в зоні перебування тварин, у порівнянні зі стельовою системою вентиляції і системою вентиляції через стінові канали.

Для системи вентиляції наземного каналу та системи вентиляції через стінові канали на ефективність видалення забруднень ξ впливала швидкість вентиляції, яка значно залежить від віку тварини, її ваги та зовнішньої температури. Для системи вентиляції наземного каналу у виробничих умовах ефективність видалення забруднень ξ зменшувалася зі збільшенням швидкості потоку повітря у системі вентиляції. Для системи вентиляції через стінові канали ефективність видалення забруднень ξ збільшувалася зі збільшенням швидкості потоку повітря у вентиляції, оскільки точка відбору проб знаходилася в задній частині приміщення. У приміщенні зі стельовою системою вентиляції на ефективність видалення забруднень ξ суттєво впливала лежача поведінка тварин, і спостерігалось незначне зниження ефективності видалення забруднень ξ зі збільшенням вентиляції.

Дослідження виконувалися в межах науково-дослідної роботи за кошти державного бюджету України № 0123U101794 «Розробка комплексу техніко-технологічного забезпечення енерго- та ресурсоощадного виробництва продукції тваринництва у рамках ЄЗК».

Список літератури

1. Dovbnenko O. F. Results of manufacturing tests of the energy efficient microclimate providing system for protection of rolls. *Effective rabbit breeding and fur farming*. 2019. Vol. 5. P. 51–63. DOI: <https://doi.org/10.37617/2708-0617.2019.5.51-64>.
2. Patyka N., Khodakivska O., Pronko L., Kolesnyk T., Klymchuk O., Kamenschuk B., Zayed N. M. Approaches to evaluation of the agriculture competitiveness level: empirical evidense in Ukraine. *Academy of Strategic Management Journal*. 2021. Vol. 20, № 1. P. 1–15. URL: <https://r.donnu.edu.ua/handle/123456789/1534>.
3. Hmyria V., Baldynyuk V., Goncharenko M. Management of Agricultural Production Enterprises in the Globalization of the Economy: Current State and Development Prospects. *Review of Economics and Finance*. 2023. Vol. 21. P. 295–303. DOI: <https://doi.org/10.55365/1923.x2023.21.29>.
4. Макаренко П. М., Калініченка О. В., Арачій В. І. Енергоефективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти : колективна монографія. ПП «Астрая», 2019. 603 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/29381/1/1.pdf>.
5. Heßling M., Hönes K., Vatter P., Lingenfelder C. Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation – review and analysis of coronavirus photoinactivation studies. *GMS Hygiene and Infection Control*. 2020. Vol. 15. PMC7273323. DOI: <https://doi.org/10.3205/dgkh000343>.
6. Алієв Е. Б., Яропуд В. М., Білоус І. М. Обґрунтування складу енергозберігаючої системи забезпечення мікроклімату в свинарських приміщеннях. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 2 (97). С. 129–137.
7. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Теоретичні дослідження пневмовтрат повітряного теплообмінника побічно-випарного типу тваринницьких приміщень. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2021. Вип. 12. № 4. С. 35–41.
8. Adamchuk V., Dovbnenko O., Danik Yu., Skydan O. Technological aspects of energy-efficient high-quality cleaning of indoor air from harmful impurities. *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24, № 4. P. 17–24. DOI: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(4\).2021.17-24](https://doi.org/10.48077/scihor.24(4).2021.17-24).
9. Kaletnik H., Yaropud V. Research of pressure losses and justification of forms of sideevaporative heat exchangers channels in livestock premises. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99, № 7, P. 247–252. DOI: 10.15199/48.2023.07.46.

10. Randazzo T., De Cian E., Mistry N. M. Air conditioning and electricity expenditure: The role of climate in temperate countries. *Economic Modelling*. 2020. Vol. 90. P. 273–287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2020.05.001>.
11. Arun B. S., Mariappan V., Maisotsenko V. Experimental study on combined low temperature regeneration of liquid desiccant and evaporative cooling by ultrasonic atomization. *International Journal of Refrigeration*. 2020. Vol. 12. P. 100–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.11.023>.
12. Довбненко О. Ф. Обґрунтування технічних та технологічних параметрів електротехнічної системи очищення повітря тваринницьких приміщень від шкідливих домішок. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2021. № 13 (112), С. 180–186. DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-13-20>.
13. Yaropud V., Kupchuk I., Burlaka S., Poberezhets J., Babyn I. Experimental studies of design-and-technological parameters of heat exchanger. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 10, № 98. P. 57–60. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2022.10.10>.
14. Яропуд В. М. Дослідження процесу функціонування та оптимізація конструктивно-технологічних параметрів тритрубного рекуператора. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. №1 (108). С. 23–32. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-1-16
15. Zhu G., Chow T.-T., Maisotsenko V.S., Wen T. Maisotsenko power cycle technologies: Research, development and future needs. *Applied Thermal Engineering* [this link is disabled](#). 2023. Vol. 223. 120023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120023>.
16. Іванюта С. П., Коломієць О. О., Малиновська О. А., Якушенко Л. М. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь. НІСД. 2020. 110 с.
17. Vinnytsia weather archive. URL: https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/weatherarchive/vinnytsia_ukraine_689558?fcstlength=1y&year=2022&month=7. (дата звернення: 30.10.2023).

References

1. Dovbnenko, O.F. (2019). Results of manufacturing tests of the energy efficient microclimate providing system for protection of rolls. *Effective rabbit breeding and fur farming*, 5, 51-63. DOI: <https://doi.org/10.37617/2708-0617.2019.5.51-64>. [in English].
2. Patyka, N., Khodakivska, O., Pronko, L., Kolesnyk, T., Klymchuk, O., Kamenschuk, B. & Zayed, N. M. (2021). Approaches to evaluation of the agriculture competitiveness level: empirical evidense in Ukraine. *Academy of Strategic Management Journal*, 20(1), 1-15. Retrieved from <https://r.donnu.edu.ua/handle/123456789/1534>. [in English].
3. Hmyria, V., Baldynyuk, V. & Goncharenko, M. (2023). Management of Agricultural Production Enterprises in the Globalization of the Economy: Current State and Development Prospects. *Review of Economics and Finance*, 21, 295-303. DOI: <https://doi.org/10.55365/1923.x2023.21.29>. [in English].
4. Makarenko, P. M., Kalinichenka, O. V. & Aranchii, V. I. (2019). *Enerhoefektyvnist ta enerhozberezhennia: ekonomichni, tekhniko-tekhnolohichni ta ekolohichni aspekty : kolektyvna monohrafiia [Energy efficiency and energy saving: economic, technological and ecological aspects: collective monograph]*. PP «Astraia». Retrieved from <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/29381/1/1.pdf>. [in Ukrainian].
5. Heßling, M., Hönes, K., Vatter, P. & Lingenfelder, C. (2020). Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation – review and analysis of coronavirus photoinactivation studies. *GMS Hygiene and Infection Control*, 15, PMC7273323. DOI: <https://doi.org/10.3205/dgkh000343>. [in English].
6. Aliiev, E.B., Yaropud, V.M. & Bilous, I.M. (2020). Obgruntuvannia skladu enerhozberihaiuchoi systemy zabezpechennia mikroklimatu v svynarskykh prymishchenniakh [Justification of the composition of the energy saving system of microclimate support in pig farms]. *Vibrations in engineering and technology*, 2 (97), 129-137. DOI:10.37128/2306-8744-2020-2-14. [in Ukrainian].
7. Kaletnik, G.M. & Yaropud, V.M. (2021). Teoretychni doslidzhennya pnevmovtrat povitryanoho teploobminnyka pobichno-vyparnoho typu tvarynnyts'kykh prymishchen [Theoretical studies of pneumatic losses of the air heat exchanger of the indirect-evaporative type of livestock premises]. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*, 12 (4), 35–41. [in Ukrainian].
8. Adamchuk, V., Dovbnenko, O., Danik, Yu. & Skydan, O. (2021). Technological aspects of energy-efficient high-quality cleaning of indoor air from harmful impurities. *Scientific Horizons*, 24(4), 17-24. DOI: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(4\).2021.17-24](https://doi.org/10.48077/scihor.24(4).2021.17-24). [in English].
9. Kaletnik, H. & Yaropud, V. (2023). Research of pressure losses and justification of forms of sideevaporative heat exchangers channels in livestock premises. *Przegląd Elektrotechniczny*, 99(7), 247-252. DOI: 10.15199/48.2023.07.46. [in English].

10. Randazzo, T., De Cian, E. & Mistry, N. M. (2020). Air conditioning and electricity expenditure: The role of climate in temperate countries. *Economic Modelling*, 90, 273-287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2020.05.001>. [in English].
11. Arun, B.S., Mariappan, V. & Maisotsenko, V. (2020). Experimental study on combined low temperature regeneration of liquid desiccant and evaporative cooling by ultrasonic atomization. *International Journal of Refrigeration*, 12, 100-109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.11.023>. [in English].
12. Dovbnenko, O.F. (2021). Obgruntuvannya tekhnichnykh ta tekhnolohichnykh parametriv elektrotekhnichnoi systemy ochyshchennia povitria tvarnynytskykh prymishchen vid shkidlyvykh domishok [Justification of the technical and technological parameters of the electrotechnical system for cleaning the air of livestock premises from harmful impurities]. *Mechanization and electrification of agriculture*, 13(112), 180-186. DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-13-20>. [in Ukrainian].
13. Yaropud, V., Kupchuk, I., Burlaka, S., Poberezhets, J. & Babyn, I. (2022). Experimental studies of design- and-technological parameters of heat exchanger. *Przegląd Elektrotechniczny*, 10(98), 57-60. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2022.10.10>. [in English].
14. Yaropud, V.M. (2020). Doslidzhennia protsesu funkcionuvannya ta optymizatsiia konstruktyvno-tekhnolohichnykh parametriv tryrubnoho rekuperatora [Research of the functioning and optimization process of the structural-technological parameters]. *Engineering, Energy, Transport AIC*, 1(108), 23-32. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-1-16. [in Ukrainian].
15. Zhu, G., Chow, T.-T., Maisotsenko, V.S. & Wen, T. (2023). Maisotsenko power cycle technologies: Research, development and future needs. *Applied Thermal Engineering* [this link is disabled](#), 223, 120023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120023>. [in English].
16. Ivaniuta, S.P., Kolomiets, O.O., Malynovska, O.A. & Yakushenko, L.M. (2020). *Zmina klimatu: naslidky ta zakhody adaptatsii: analit. Dopovid* [Climate Change: Consequences and Adaptation Measures: Analyt.report]. NISD. [in Ukrainian].
17. Vinnytsia weather archive. *meteoblue.com*. Retrieved from https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/weatherarchive/vinnytsia_ukraine_689558?fcstlength=1y&year=2022&month=7.

Hryhorii Kaletnik, Prof., DSc.,

Vitalii Yaropud, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

Experimental Studies of the Effectiveness of Systems for Providing Negative Pressure Microclimate in Livestock Premises

The microclimate of livestock premises is determined by a set of physical, chemical and biological parameters inside the premises for keeping animals and is characterized by the following parameters: air temperature, internal surfaces of walls, ceilings, floors, windows, doors, and other internal structures; humidity of air, internal surfaces of walls, ceiling, floor, windows, doors, and other internal structures; the speed and direction of air flows in the locations of animals, manure, inflow and exhaust channels, windows and doors; the gas composition of the air - the concentration of carbon dioxide, ammonia, hydrogen sulfide, carbon monoxide; the presence of dust and microorganisms in the air; the intensity of natural and artificial lighting; optical radiation; the level of industrial noise, the degree of air ionization.

The substantiation of the rational scheme of the negative pressure microclimate system in livestock premises on the basis of production surveys is the main goal of the conducted research. According to the results of the research, it was found that for the livestock room with the ventilation system of the ground channel, more fresh air is provided in the area where the animals are staying, in comparison with the ceiling ventilation system and the ventilation system through the wall channels.

For the ground duct ventilation system and the wall duct ventilation system, the efficiency of contaminant removal was influenced by the ventilation rate, which is significantly dependent on the animal's age, weight, and outdoor temperature. For the ventilation system of the above-ground channel in production conditions, the efficiency of pollution removal decreased with an increase in the speed of the air flow in the ventilation. For the wall duct ventilation system, the efficiency of pollutant removal increased as the ventilation air flow rate increased, as the sampling point was located at the back of the room. In a room with a ceiling ventilation system, the efficiency of contaminant removal was significantly influenced by the lying behavior of animals, and a slight decrease in the efficiency of contaminant removal was observed with increasing ventilation.

air, temperature, humidity, speed, pollution, ventilation, numerical simulation

Одержано (Received) 04.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 15.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023