

**Грушецький С.М.**

к.т.н., доцент

Рудь А.В.

к.т.н., доцент

Корчак М.М.

к.т.н., доцент

Краснолуцький П.П.

к.т.н., доцент

**Заклад вищої освіти
«Подільський державний
університет»**

Hrushetskyi S.Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**Rud A.**Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**Korchak M.**Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**Krasnolutskyi P.**Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor

**Higher educational
institution «Podillia State
University»**

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ
ФОРМУВАННІ МІКРОКЛІМАТУ В
ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕННЯХ ©
2026 by Грушецький С.М., Рудь А.В.,
Корчак М.М., Краснолуцький П.П. is
licensed under CC BY 4.0

УДК 631.22:628.8**DOI: 10.37128/2306-8744-2026-1-12**

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ ФОРМУВАННІ МІКРОКЛІМАТУ В ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕННЯХ

У статті проведено комплексний аналіз сучасного стану та перспектив впровадження інноваційних технологій для формування оптимального мікроклімату в приміщеннях для утримання сільськогосподарських тварин. Обґрунтовано, що створення стабільного температурно-вологісного режиму, належної швидкості руху повітря та допустимої концентрації шкідливих газів є визначальним фактором реалізації генетичного потенціалу продуктивності тварин та збереження їхнього здоров'я.

Особливу увагу приділено інтелектуальним системам автоматизованого керування, які базуються на принципах «Інтернету речей» (IoT) та штучного інтелекту. Розглянуто механізми роботи сучасних енергоефективних вентиляційних систем, зокрема систем із рекуперацією тепла, які дозволяють суттєво знизити енерговитрати в зимовий період. Описано технології адіабатичного охолодження (системи туманоутворення) та їхню ефективність у боротьбі з тепловим стресом у великої рогатої худоби та свиней в умовах глобального потепління.

Досліджено інноваційні підходи до моніторингу середовища за допомогою безконтактних сенсорів та тепловізійних камер, що дозволяють виявляти зони дискомфорту тварин у режимі реального часу. Автор акцентує увагу на використанні відновлюваних джерел енергії (сонячних колекторів, геотермальних теплових насосів) для забезпечення автономності тваринницьких комплексів. Визначено, що інтеграція цифрових платформ для аналізу великих даних (Big Data) дозволяє прогнозувати зміни мікроклімату та автоматично адаптувати роботу обладнання, мінімізуючи вплив людського фактора.

У висновках підкреслено, що перехід від традиційних методів регулювання параметрів середовища до прецизійного (точного) тваринництва забезпечує не лише покращення добробуту тварин, але й підвищує економічну рентабельність виробництва за рахунок зниження витрат кормів та енергоресурсів.

Ключові слова: мікроклімат, тваринницькі приміщення, інноваційні технології, автоматизація, енергоефективність, вентиляція, тепловий стрес, прецизійне тваринництво, IoT-датчики, рекуперація тепла.

Вступ. Сучасне тваринництво перебуває на етапі глобальної технологічної трансформації, де перехід від традиційних методів господарювання до концепції «Тваринництва 4.0» стає безальтернативним шляхом розвитку. Одним із найбільш критичних аспектів у цій системі є формування та підтримка оптимального мікроклімату в

тваринницьких приміщеннях. Мікроклімат – це складний комплекс фізичних та хімічних параметрів середовища (температура, вологість, газовий склад, швидкість руху повітря, рівень освітленості та запиленості), які безпосередньо впливають на фізіологічний стан, імунну резистентність та продуктивні якості тварин.



Проблема полягає в тому, що традиційні системи вентиляції та обігріву часто не здатні оперативно реагувати на різкі зміни зовнішніх кліматичних умов, що призводить до виникнення критичних станів у тварин, зокрема теплового стресу або переохолодження. Невідповідність параметрів мікроклімату нормативним вимогам спричиняє перевитрату кормів (до 15-20%), зниження приросту живої маси та продуктивності (на 10-30%), а також зростання захворюваності та падежу поголів'я. В умовах стрімкого подорожчання енергоносіїв та посилення екологічних стандартів, пошук інноваційних, енергоефективних та інтелектуальних рішень для керування параметрами середовища стає першочерговим завданням для галузі.

Зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Дане дослідження безпосередньо пов'язане з реалізацією загальнодержавних та міжнародних програм щодо забезпечення продовольчої безпеки та сталого розвитку агропромислового комплексу. Наукова актуальність роботи зумовлена необхідністю розробки та впровадження систем прецизійного тваринництва (Precision Livestock Farming – PLF), які дозволяють здійснювати індивідуальний підхід до кожної одиниці поголів'я через моніторинг середовища в зоні безпосереднього перебування тварини.

Практична значущість завдання полягає у:

- енергонезалежності – розробка технологій із використанням рекуперації тепла та відновлюваних джерел енергії дозволяє мінімізувати собівартість продукції;

- цифровізації – інтеграція датчиків IoT та алгоритмів машинного навчання в системи клімат-контролю дає змогу прогнозувати ризики та автоматизувати прийняття рішень без участі оператора;

- екологізації – зниження викидів аміаку, метану та вуглекислого газу в атмосферу через оптимізацію повітрообміну сприяє виконанню «Зеленого курсу» та зменшенню антропогенного навантаження на довкілля.

Таким чином, вирішення проблеми розробки та впровадження інноваційних технологій формування мікроклімату є стратегічно важливим для підвищення конкурентоспроможності вітчизняного тваринництва на світовому ринку, забезпечення добробуту тварин та отримання екологічно безпечної продукції.

Аналіз останніх досліджень. Питання оптимізації мікроклімату в тваринництві протягом останнього десятиліття трансформувалося з суто інженерного завдання вентиляції приміщень у

мультидисциплінарну проблему, що охоплює біологію, енергетику та цифрові технології.

Енергозберігаючі системи забезпечення мікроклімату. Підвищення ефективності функціонування техніко-технологічного забезпечення мікроклімату свинарських приміщень шляхом обґрунтування концепції та параметрів адаптивних мехатронних систем енергозберігаючих технічних засобів зробили такі вчені, як Алієв, Яропуд та ін. [1].

Цифровізація та концепція Precision Livestock Farming (PLF). Значний внесок у розвиток інтелектуальних систем моніторингу та застосування цифрових технологій у галузі тваринництва зробили такі вчені, як Солоня С. В., Скоромна О. І., Огороднічук Г. М. [2, 3]. У їхніх працях обґрунтовано, що майбутнє галузі належить системам «розумної ферми», де датчики IoT (Internet of Things) вимірюють параметри не в цілому по цеху, а безпосередньо в зоні перебування тварини (так званій «мікроклімат на рівні носа»). Дослідження Гарсія-Дієго [4] підтверджують, що використання бездротових сенсорних мереж дозволяє створювати динамічні теплові карти приміщень, виявляючи «мертві зони» зі стоячим повітрям.

Боротьба з тепловим стресом та адаптивне охолодження. У зв'язку з глобальними кліматичними змінами особливу актуальність здобули роботи Уест [5] та Кольє [6]. Автори детально проаналізували вплив температурно-вологісного індексу (THI) на фізіологію тварин. Сучасні дослідження акцентують увагу на перевагах адиабатичного охолодження (дрібнодисперсного розпилення води) та високошвидкісних вентиляторів великого діаметру (HVLS), які дозволяють знизити відчутну температуру на 5-8°C.

Машини та обладнання в тваринництві [7] присвячені застосуванню комплексної механізації, як відомо, вигідніше впроваджувати на великих спеціалізованих підприємствах з добре відпрацьованою технологією виробництва. У цьому разі скорочується термін окупності капіталовкладення в технічні засоби і забезпечується вища технологічна та економічна віддача. Водночас не менш важливо механізувати виробничі процеси і на тваринницьких підприємствах малих форм власності (орендні, підсобні, приватні тощо), для яких характерним є дефіцит робочої сили.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значний масив досліджень, залишається недостатньо вивченим питання комплексної інтеграції різних інноваційних систем в єдину екосистему. Більшість існуючих рішень фокусуються на окремих параметрах (тільки температура або тільки вентиляція), не враховуючи



їхню синергію з автоматизованими системами годівлі та гноєвидалення. Крім того, існує потреба в адаптації дорогих західних технологій PLF до умов вітчизняних ферм з обмеженим бюджетом, що потребує пошуку більш доступних, але ефективних інженерних рішень.

Мета та завдання дослідження Мета роботи полягає у науковому обґрунтуванні та розробці комплексного підходу до впровадження інноваційних енергоефективних технологій формування мікроклімату в тваринницьких приміщеннях, що базуються на принципах прецизійного тваринництва (PLF) та інтелектуального керування, для підвищення продуктивності тварин та зниження собівартості продукції.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі основні завдання:

- проаналізувати вплив сучасних кліматичних змін на параметри внутрішнього середовища тваринницьких ферм та оцінити ефективність існуючих систем вентиляції та опалення в екстремальних температурних режимах;

- дослідити техніко-економічні показники використання систем рекуперації тепла та адіабатичного охолодження, визначивши потенціал енергозбереження при їх інтеграції в типові проекти ферм;

- розробити концептуальну схему інтелектуальної системи моніторингу, яка включає мережу IoT-датчиків для збору даних про концентрацію шкідливих газів (NH₃, CO₂, H₂S), вологість та температурні градієнти всередині приміщення;

- вивчити можливості застосування алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування критичних станів мікроклімату та автоматичної корекції роботи кліматичного обладнання з мінімальною інерційністю;

- оцінити біологічний та економічний ефект від впровадження прецизійних технологій керування середовищем, зокрема через аналіз конверсії корму та динаміки приросту живої маси тварин.

Виклад основного матеріалу.

Формування мікроклімату в сучасних тваринницьких приміщеннях базується на синергії трьох ключових напрямків: енергоефективної вентиляції, інтелектуального моніторингу (IoT) та адаптивного охолодження.

Енергоефективна вентиляція та рекуперація тепла

Традиційні системи вентиляції взимку призводять до значних втрат теплової енергії (до 70% загальних тепловтрат приміщення), оскільки нагріте тваринами повітря просто видалається

назовні. Інноваційним рішенням є впровадження пластинчастих або трубчастих рекуператорів.

Принцип роботи полягає у передачі тепла від відпрацьованого повітря до припливного без їхнього змішування. Це дозволяє:

- підтримувати температуру припливного повітря на рівні +10...+12°C навіть при зовнішній температурі -15°C без додаткових витрат палива;

- знизити вологість у приміщенні, що автоматично зменшує концентрацію аміаку (NH₃) та запобігає розвитку патогенної мікрофлори.

Інтелектуальні системи моніторингу на базі IoT

Сучасна концепція передбачає відмову від одного центрального датчика температури. Замість цього використовується мережа розподілених бездротових сенсорів, що інтегровані в єдину цифрову платформу.

Ключові параметри, що контролюються в режимі реального часу:

- газовий склад – датчики електрохімічного типу вимірюють рівень CO₂ та NH₃. При перевищенні порогу в 20 ppm для аміаку, система автоматично збільшує кратність повітрообміну;

- швидкість повітря – використання анемометрів дозволяє уникати протягів, які є критичними для молодняку (швидкість не повинна перевищувати 0,3 м/с у зимовий період);

- тепловізійний аналіз – встановлення стаціонарних ІЧ-камер дозволяє системі розпізнавати скупчення тварин (ознака холоду) або їхню надмірну млявість (ознака перегріву).

Технології протидії тепловому стресу

В умовах літніх максимумів звичайна вентиляція часто не справляється. Інноваційним стандартом стають системи адіабатичного охолодження (туманоутворення) високого тиску (70–100 бар).

Вода, розпилена до стану мікрокрапель (5–10 мікрон), миттєво випаровується, поглинаючи тепло з повітря. Це знижує температуру в секції на 5–12°C. Важливим елементом є автоматизація за індексом THI (Temperature-Humidity Index). Розрахунок ведеться за формулою [7]

$$THI = 0.8 \cdot T + RH \cdot \frac{T - 14.4}{100} + 46.4 \quad (1)$$

де T – температура повітря (°C), RH – відносна вологість (%). При досягненні $THI > 72$ (для ВРХ) система автоматично вмикає цикли зрошення та посиленої вентиляції.

Штучний інтелект у керуванні

Найвищим досягненням сучасних інновацій у тваринництві є інтеграція нейронних мереж для реалізації предиктивного (прогностичного) керування. На відміну від

реактивних систем, штучний інтелект аналізує метеорологічні прогнози на 12-годинний горизонт і завчасно коригує параметри теплових насосів або вентиляційних штор. Такий підхід нівелює ефект інерційності мікроклімату, гарантуючи стабільність внутрішнього середовища навіть за умови різких коливань зовнішніх атмосферних факторів.

Ефективність системи вентиляції нерозривно пов'язана з алгоритмізацією її роботи. Впровадження автоматизації є критично необхідним для вирішення таких ключових завдань [7]:

оперативне регулювання – система забезпечує своєчасну активацію обладнання на основі широкого спектра показників (таймінг, температурний режим, рівень вологості, інтенсивність освітлення), зберігаючи можливість переходу на ручне керування в екстрених випадках;

стабілізація технологічних параметрів – автоматика підтримує задані рівні температури та вологості з точністю, яка є недосяжною при ручному регулюванні. Це критично важливо для підтримки високої продуктивності тварин;

комплексний захист обладнання – забезпечується моніторинг стабільності напруги, контроль фаз для трифазних двигунів, а також захист електрокалориферів від критичного перегріву та водяних теплообмінників від замерзання;

дотримання технологічних алгоритмів – автоматизація гарантує правильну черговість операцій під час пусконаладжувальних робіт та зупинки системи. Наприклад, для запобігання пожежі при вимкненні установки з електрокалорифером система спершу деактивує нагрівальний елемент і лише через три хвилини – вентилятор, після чого закриває повітряні клапани.

моніторинг та аварійне сповіщення – інтелектуальні модулі забезпечують візуалізацію робочих параметрів у реальному часі та миттєве світлозвукове оповіщення про будь-які відхилення чи аварії. Завдяки хмарним технологіям дані доступні оператору на дисплеї контролера або через віддалений доступ (ПК, смартфон) через інтернет-канали.

Система кондиціонування та вентиляції як об'єкт керування є достатньо складним технічним пристроєм (рис. 1) [7].

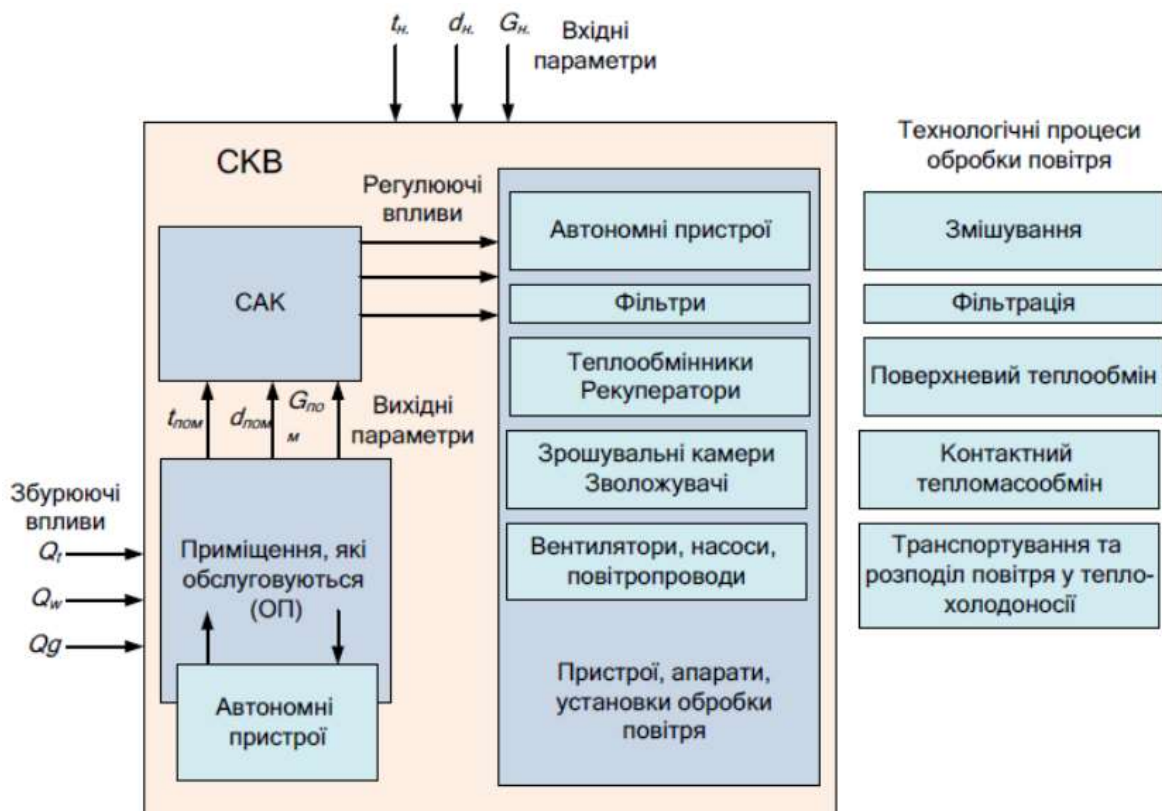


Рис. 1. Структурна схема системи кондиціонування та вентиляції як складової комплексу «людина-виробниче середовище-техніка»: t_n , d_n , G_n – температура, вологість, витрата зовнішнього повітря; $t_{пом}$, $d_{пом}$, $G_{пом}$ – температура, вологість, витрата повітря в приміщенні; Q_t , Q_w , Q_g – теплове, вологісне й газове навантаження

Зоотехнічні та санітарно-гігієнічні вимоги (табл. 1) щодо мікроклімату зводяться до підтримання всіх його параметрів в таких межах, за яких в зонах утримання забезпечуються комфортні

умови для тварин і птиці, при яких останні є постійно здоровими, а всі фізіологічні процеси в їх організмах протікають з високою ефективністю [7].

Таблиця 1

Нормативні параметри мікроклімату в тваринницьких приміщеннях

Призначення приміщення	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с	Освітлення, лк	Допустима концентрація CO ₂ , л/м ³
Корівники	8-10	70-80	0,4-0,5	50-70	2,5
Для відгодівлі тварин	6-10	70-80	0,3	20-30	2,5
Телятники	12-15	40-75	0,3-0,5	50-70	2,5
Родильне відділення	15-20	40-75	0,3-0,5	50-70	2,5
Доїльно-молочне відділення	12-15	60-75	0,3-0,5	70-75	2,5
Свинарники-маточники	18-22	40-70	0,2-0,5	70-75	2,5
Свинарники-відгодівельники	14-20	40-75	0,4-0,7	50-70	2,5
Вівчарні	6-10	75-80	0,3-0,5	20-30	3,0
Пташники для утримання птиці: на підлозі у кліткових батареях	16-18	60-70	0,2-0,3	15-20	–
	16-18	60-70	0,2-0,3	18-20	–
Конюшні	8	80	0,3-0,5	20-30	3,0

Вибір системи і технічних рішень та засобів організації мікроклімату здійснюється залежно від необхідної кратності повітрообміну у тому чи іншому приміщенні подано на рисунках 2-5 [7, 8, 9, 10].

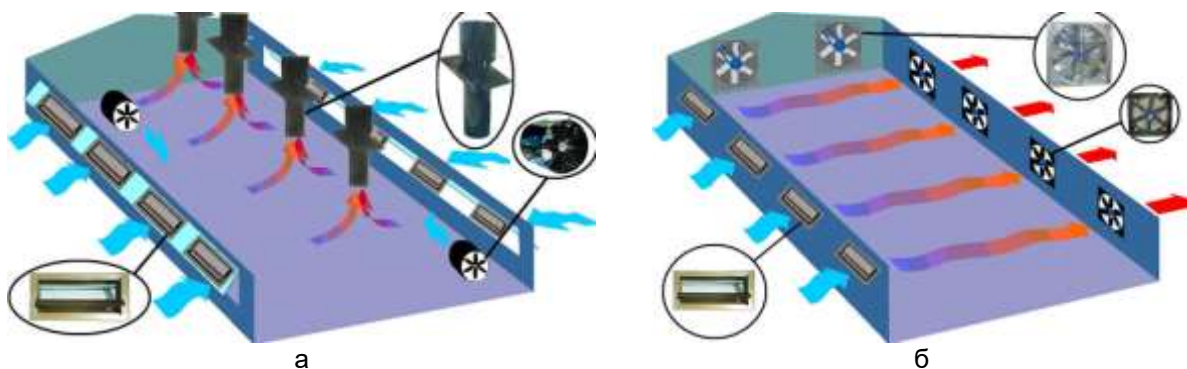


Рис. 2. Вентиляція: а) за допомогою витяжних шахт; б) бокова за допомогою осьових вентиляторів

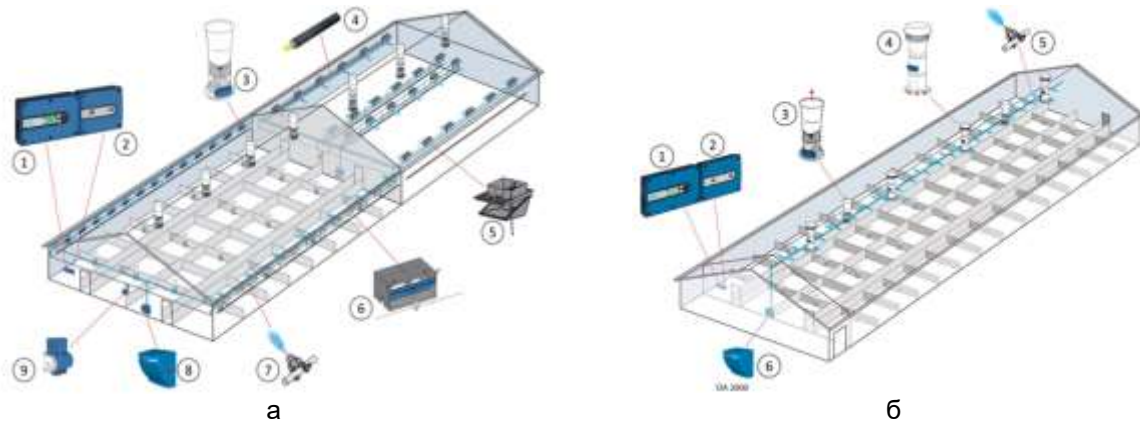


Рис. 3. Система вентиляції: а) від'ємного тиску: 1 – контролер мікроклімату; 2 – система аварійного відкриття; 3 – витяжна шахта; 4 – труба системи централізованого опалення; 5 – припливний клапан в стелі; 6 – припливний клапан в стіні; 7 – форсунка системи кондиціонування; 8 – насос системи кондиціонування; 9 – сервомотор приводу клапанів; б) рівного тиску «Skov»: 1 – контролер мікроклімату; 2 – система аварійного відкриття; 3 – витяжна шахта; 4 – припливна шахта; 5 – форсунка системи кондиціонування; 6 – насос системи кондиціонування.

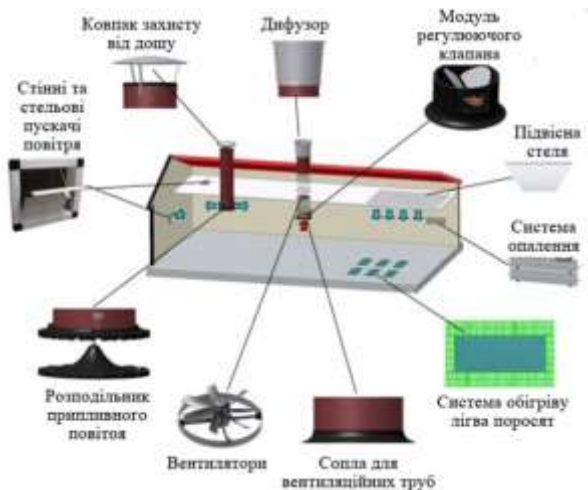


Рис. 4. Схема розміщення приладів для вентиляції.

При виборі схеми вентиляції необхідно перевагу надати нагнітальній системі. Це дозволяє утримувати в приміщенні більший тиск ніж ззовні. При відкриванні дверей в холодну пору року повітря виходить із приміщення і запобігає переохолодженню і захворюванню тварин (особливо молочного поголів'я).

Слід також враховувати необхідність у високій надійності процесу вентиляції. Для цього використовується багатовентиляторна схема (як мінімум 2 вентилятори).

При подачі повітря по трубопроводах обов'язково використовуються відцентрові вентилятори. При однаковій потужності із основними вентиляторами вони мають більший напір і меншу подачу.

Визначаємо подачу вентилятора [7].

$$B_{\text{вент}} = \frac{2 \cdot B_{\text{max}}}{n_{\text{вен}}} \quad (2)$$

де 2 – вентилятори працюють світловий день, тому їх подачу збільшують у 2 рази; $n_{\text{вен}}$ – кількість вентиляторів у приміщенні.

Визначається діаметр повітропроводу по якому повітря подається в приміщення

$$d = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{B_{\text{вент}}}{\pi \cdot V}} \quad (3)$$

де V – швидкість руху повітря у трубопроводі, $V = 15 \text{ м/с}$.

Напір вентилятора визначається за формулою

$$H = h_{\text{тр}} + h_{\text{м}} \quad (4)$$

де H – повний напір вентилятора, Па; $h_{\text{тр}}$ – втрати напору від тертя повітря по стінах труби. Визначаються за формулою

$$h = \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{L}{2 \cdot d} \quad (5)$$

де ρ – густина повітря ($\rho = \frac{353}{273 + t_{\text{зов}}}$), кг/м^3 ; λ – коефіцієнти опору руху повітря в трубі, $\lambda = 0,02$; d – діаметр трубопроводу, м; L – довжина трубопроводу, м; $h_{\text{м}}$ – місце втрати напору. Приймають $h_{\text{м}} = 0,1h_{\text{тр}}$.

Розраховується потужність електродвигуна для приводу вентилятора

$$N = \frac{B_{\text{вент}} \cdot H}{3600 \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{пер}}} \quad (6)$$

де $\eta_{\text{в}}$ – к.к.д. відцентрового вентилятора, $\eta_{\text{в}} = 0,5$ – к.к.д. передачі, $\eta_{\text{пер}} = 0,95$.

Висновки. Проведене дослідження дозволяє зробити наступні узагальнюючі висновки:

1. Технологічна трансформація. Впровадження інноваційних систем мікроклімату в тваринництві перейшло від етапу простої механізації до інтелектуального керування.



Перехід до концепції Precision Livestock Farming (PLF) дозволяє контролювати параметри середовища з високою точністю, що є критичним для сучасних високопродуктивних кросів та порід.

2. Енергетична ефективність. Використання систем рекуперації тепла у поєднанні з інтелектуальними алгоритмами вентиляції дозволяє скоротити витрати на енергоносії до 35-50%. Це не лише підвищує рентабельність виробництва, а й суттєво зменшує вуглецевий слід тваринницьких підприємств, відповідаючи сучасним екологічним стандартам.

3. Біологічний ефект. Оптимізація мікроклімату за допомогою систем адиабатичного охолодження та автоматизованого контролю газового складу повітря мінімізує ризики виникнення теплового стресу та респіраторних захворювань. Це забезпечує стабільну конверсію корму та зростання продуктивності на 15-20% у порівнянні з традиційними методами утримання.

4. Роль цифровізації. Інтеграція IoT-датчиків та хмарних платформ для аналізу Big Data створює фундамент для предиктивного (прогностичного) менеджменту, де система здатна нейтралізувати негативні чинники ще до моменту їхнього впливу на фізіологічний стан тварини.

Подальший розвиток наукових пошуків у даному напрямку має зосереджуватися на наступних аспектах:

- мультисенсорна інтеграція – розробка комплексних систем, які б аналізували не лише параметри повітря, а й біометричні дані тварин (температуру тіла, рухову активність, частоту дихання) для створення зворотного зв'язку між організмом і кліматичним обладнанням;

- альтернативна енергетика – дослідження можливостей повної автономізації тваринницьких комплексів шляхом комбінування біогазових установок, сонячних панелей та геотермальних насосів для потреб опалення та охолодження;

- машинне навчання – удосконалення алгоритмів штучного інтелекту для розпізнавання патернів поведінки тварин за допомогою комп'ютерного зору, що дозволить коригувати локальний мікроклімат у окремих зонах приміщення;

- економічне моделювання – розробка методик точного розрахунку термінів окупності інноваційного обладнання для господарств різного масштабу, що сприятиме активнішому залученню інвестицій у модернізацію аграрного сектору.

Список використаних джерел

1. 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. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2020-2-14>

2. Солоня О. В. Застосування сучасних мехатронних систем та роботизованих комплексів у АПК України. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 3 (110). С. 71–76. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-3-7>

3. Солоня С. В., Скоромна О. І., Огороднічук Г. М. Застосування цифрових технологій у галузі тваринництва. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 4 (123)/2023. С. 43-50. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-4-5>

4. Garcia-Diego A. G., Merenda M. Wireless Sensor Networks for Livestock Monitoring: A Review. *Sensors*. 2023. Vol. 23(4). 1845.

5. West J. W. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 86. Issue 6. P. 2131–2144.

6. Collier R. J., Gebremedhin K. G. Thermal biology of domestic animals. *Annual Review of Animal Biosciences*. 2020. Vol. 8. P. 21–43.

7. Іванишин В.В., Грушецький С.М., Рудь А.В. *Машини та обладнання в тваринництві : підручник*. Кам'янець-Подільський : ПДАТУ : ТОВ «Друкарня «Рута», 2021. 468 с. (ISBN 978-617-8021-28-3).

8. Topix Agro. (2015). *Skov - Dynamic MultiStep ventilation system* [Video]. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Q5P5CZ7S1ss> (дата звернення: 16.02.2026).

9. All-in solutions for pigs. SKOV website. URL: <https://www.skov.com/climate/pigs/> (дата звернення: 16.02.2026).

10. Skov Combi-Tunnel Ventilation System URL: <https://lnk.ua/AVM2y2JNo> (дата звернення: 16.02.2026).

References

1. Aliev, E. B., Yaropud, V. M., & Bilous, I. M. (2020). Obgruntuvannya skladu enerhozberihaiuchoi systemy zabezpechennia mikroklimatu v svynarskykh prymishchenniakh [Substantiation of the composition of energy-saving microclimate control systems in pig houses]. *Vibrations in Engineering and Technology*, (2), 129–137. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2020-2-14> [in Ukrainian].

2. Solon, O. V. (2020). Zastosuvannia suchasnykh mechatronnykh system ta robotyzovanykh kompleksiv u APK Ukrainy [Application of modern mechatronic systems and robotic complexes in the agro-industrial complex of Ukraine]. *Technique, Energy, Transport of AIC*, (3), 71–76. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-3-7> [in Ukrainian].

3. Solon, S. V., Skoromna, O. I., & Ohorodnichuk, H. M. (2023). Zastosuvannia tsyfrovyykh tekhnolohii u haluzi tvarynnytstva [Application of digital technologies in the livestock industry]. *Technique, Energy, Transport of AIC*, (4), 43–50. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-4-5> [in Ukrainian].



4. Garcia-Diego, A. G., & Merenda, M. (2023). Wireless sensor networks for livestock monitoring: A review. *Sensors*, 23(4), 1845. <https://doi.org/10.3390/s23041845> [in English].

5. West, J. W. (2021). Effects of heat stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2131–2144. [in English].

6. Collier, R. J., & Gebremedhin, K. G. (2020). Thermal biology of domestic animals. *Annual Review of Animal Biosciences*, 8, 21–43. [in English].

7. Ivanyshyn, V. V., Hrushetskyi, S. M., & Rud, A. V. (2021). *Mashyny ta obladnannia v tvarynnytsvi: pidruchnyk* [Machines and equipment in animal husbandry: textbook]. Kamianets-Podilskyi: PDAU; Ruta. [in Ukrainian].

8. Topix Agro. (2015). *Skov - Dynamic MultiStep ventilation system* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Q5P5CZ7S1ss> (Accessed: February 16, 2026). [in English].

9. SKOV. (n.d.). *All-in solutions for pigs*. SKOV Website. <https://www.skov.com/climate/pigs/> (Accessed: February 16, 2026). [in English].

10. SKOV. (n.d.). *Skov Combi-Tunnel Ventilation System*. <https://lnk.ua/AVM2y2JNo> (Accessed: February 16, 2026). [in English].

INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR MICROCLIMATE FORMATION IN LIVESTOCK HOUSING ROTARY WORKING BODY OF ROOT HARVEST MACHINES

The paper presents the results of theoretical and experimental studies aimed at The article provides a comprehensive analysis of the current state and prospects for implementing innovative technologies to create an optimal microclimate in livestock housing facilities. It is substantiated that the establishment of a stable temperature and humidity regime, appropriate air velocity, and permissible concentrations of harmful gases are decisive factors for realizing the genetic

productivity potential of animals and maintaining their health.

Special attention is paid to intelligent automated control systems based on the principles of the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI). The mechanisms of modern energy-efficient ventilation systems are considered, particularly systems with heat recovery (recuperation), which significantly reduce energy consumption during the winter period. The study describes adiabatic cooling technologies (fogging systems) and their effectiveness in counteracting heat stress in cattle and pigs under global warming conditions.

Innovative approaches to environmental monitoring using non-contact sensors and thermal imaging cameras, which allow for the real-time detection of animal discomfort zones, are investigated. The author emphasizes the use of renewable energy sources (solar collectors, geothermal heat pumps) to ensure the autonomy of livestock complexes. It is determined that the integration of digital platforms for Big Data analysis allows for predicting microclimate changes and automatically adapting equipment operation, thereby minimizing the impact of the human factor.

The conclusions emphasize that the transition from traditional methods of environmental parameter regulation to Precision Livestock Farming (PLF) ensures not only improved animal welfare but also increases the economic profitability of production by reducing feed and energy resource costs. The implementation of "smart" climate control is a key step towards sustainable and competitive agriculture in the digital age.

Keywords: microclimate, livestock housing, innovative technologies, automation, energy efficiency, ventilation, heat stress, precision livestock farming, IoT sensors, heat recovery.

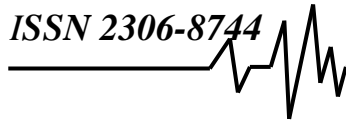
Відомості про авторів

Грушецький Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії та точного землеробства імені Михайла Самокиша Заклад вищої освіти «Подільський державний університет» (м. Кам'янець-Подільський, вул. Шевченка, 12, e-mail: g.sergiy.1969@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0487-6152>).

Рудь Анатолій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри агроінженерії та точного землеробства імені Михайла Самокиша Заклад вищої освіти «Подільський державний університет» (м. Кам'янець-Подільський, вул. Шевченка, 12, e-mail: anatoliyrujd@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7206-7103>).

Корчак Микола Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії та точного землеробства імені Михайла Самокиша Заклад вищої освіти «Подільський державний університет» (м. Кам'янець-Подільський, вул. Шевченка, 12, e-mail: nikolaykorchak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8726-1881>).

Краснолуцький Петро Петрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії та точного землеробства імені Михайла Самокиша Заклад вищої освіти «Подільський державний університет» (м. Кам'янець-Подільський, вул. Шевченка, 12, e-mail: kppster@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2469-3190>).



Serhii Hrushetskyi – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Mykhailo Samokysh Department of Agroengineering and Precision Agriculture, Higher educational institution «Podillia State University» (12 Shevchenka St., Kamianets-Podilskyi, e-mail: g.sergiy.1969@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0487-6152>).

Anatoliy Rud – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Mykhailo Samokysh Department of Agroengineering and Precision Agriculture, Higher educational institution «Podillia State University» (12 Shevchenka St., Kamianets-Podilskyi, e-mail: anatoliyrudj@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7206-7103>).

Mykola Korchak – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Mykhailo Samokysh Department of Agroengineering and Precision Agriculture, Higher educational institution «Podillia State University» (12 Shevchenka St., Kamianets-Podilskyi, e-mail: nikolaykorchak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8726-1881>).

Petro Krasnolutskyi – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Mykhailo Samokysh Department of Agroengineering and Precision Agriculture, Higher educational institution «Podillia State University» (12 Shevchenka St., Kamianets-Podilskyi, e-mail: kppster@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2469-3190>).

Стаття надійшла 20.02.2026

Стаття прийнята 04.03.2026

Опубліковано 17.04.2026