

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-105>

УДК 631.223.3:628.86:533.6

ЯРОПУД ВІТАЛІЙ

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>

e-mail: yaropud77@gmail.com

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ТИСКУ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВИДАЛЕННЯ ЗАБРУДНЕНОГО ПОВІТРЯ

У роботі виконано аналітичні та експериментальні дослідження втрат тиску у вентиляційній системі видалення забрудненого повітря тваринницьких приміщень. Актуальність зумовлена необхідністю забезпечення нормативних параметрів мікроклімату за мінімальних енерговитрат за умов просторової неоднорідності повітряного середовища. Мета дослідження полягає в розробленні та аналітичному обґрунтуванні закономірностей втрат тиску у вентиляційній системі видалення забрудненого повітря свинарських приміщень, що забезпечує підвищення енергоефективності роботи вентиляторного обладнання, рівномірність повітрообміну та стабільність параметрів мікроклімату.

Виконано повнофакторні експерименти на лабораторному стенді та повномасштабній моделі з використанням вентиляторів змінної продуктивності, сервоприводів заслінок, датчиків тиску, температури і газоаналізу. За показниками повного й статичного тиску визначено швидкість потоку та витрати повітря; оброблення даних здійснювали у середовищі Arduino IDE з оцінкою середніх значень та СКВ. Побудовано регресійні моделі й передаточні функції виконавчих елементів.

Проведені аналітичні та експериментальні дослідження дозволили встановити закономірності зміни втрат тиску у вентиляційній системі видалення забрудненого повітря тваринницьких приміщень. Визначено, що величина пневматичних втрат істотно залежить від кута повороту витяжних заслінок, швидкості потоку та довжини повітропроводів. Отримані рівняння регресії і передаточні функції описують реальні процеси з високим коефіцієнтом кореляції ($R = 0,94$), що підтверджує адекватність побудованої моделі.

Результати можуть бути використані під час проектування та модернізації мехатронних вентиляційних систем у свинарських комплексах.

Ключові слова: вентиляційна система, втрати тиску, свинарські приміщення, мікроклімат, витяжні заслінки, сервоприводи, передаточна функція, енергоефективність, повітрообмін.

YAROPUD VITALII

Vinnitsia National Agrarian University

ANALYTICAL STUDIES OF PRESSURE LOSSES IN THE VENTILATION SYSTEM FOR CONTAMINATED AIR REMOVAL

The paper presents analytical and experimental studies of pressure losses in the ventilation system for removing contaminated air from livestock premises. The relevance of the research lies in the need to ensure the regulatory parameters of the microclimate with minimal energy consumption under spatial nonuniformity of the air environment. The aim of the study is to develop and analytically substantiate the regularities of pressure losses in the ventilation system for contaminated air removal in pig facilities, which ensures increased energy efficiency of fan operation, uniform air exchange, and stability of microclimate parameters.

Full-factor experiments were carried out on a laboratory bench and a full-scale model using variable-capacity fans, servo-driven dampers, pressure, temperature, and gas sensors. The velocity and flow rate of air were determined based on total and static pressure indicators; data were processed in the Arduino IDE environment with the calculation of mean values and standard deviations. Regression models and transfer functions of the actuators were constructed.

The conducted analytical and experimental studies made it possible to establish the regularities of pressure loss variation in the ventilation system for removing contaminated air from livestock premises. It was determined that the magnitude of pneumatic losses significantly depends on the damper rotation angle, airflow velocity, and duct length. The obtained regression equations and transfer functions describe the actual processes with a high correlation coefficient ($R = 0.94$), confirming the adequacy of the developed model.

The results can be used in the design and modernization of mechatronic ventilation systems in pig farming complexes.

Keywords: ventilation system, pressure losses, pig facilities, microclimate, exhaust dampers, servomotors, transfer function, energy efficiency, air exchange.

Стаття надійшла до редакції / Received 12.09.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.09.2025

Постановка проблеми

Стрімкий розвиток сектора альтернативної енергетики у світі, зокрема впровадження біоенергетичних, сонячних, геотермальних та вітрових технологій, а також загальна тенденція до подорожчання традиційних паливних ресурсів (газу, вугілля, нафтопродуктів) спонукає до переосмислення підходів у тваринництві щодо використання енергоресурсів і технологічних процесів. Зростаюча увага до енергоефективності та екологічної безпеки сільськогосподарського виробництва сприяє усуненню низки недоліків, які ще донедавна вважалися системними у галузі. У сучасних умовах

розвитку прогресивних технологій, цифровізації та впровадження мехатронних систем управління мікрокліматом багато традиційних проблем тваринництва – надмірне енергоспоживання, нерациональний повітрообмін, нестабільність параметрів мікроклімату – поступово втрачають актуальність. Це дозволяє не лише частково або повністю спростувати попередні уявлення про обмеження енергоефективності тваринницьких приміщень, а й закласти основу для створення нових концепцій сталого виробництва, орієнтованого на мінімізацію витрат і скорочення викидів у довкілля [1].

Підтримання оптимального мікроклімату у тваринницьких приміщеннях є однією з ключових передумов стабільної продуктивності тварин, зниження захворюваності та ефективного використання енергоресурсів. Вентиляційні системи забезпечують регулювання складу повітряного середовища, видалення надлишкової вологи, вуглекислого газу, аміаку, сірководню та інших шкідливих газів, що утворюються внаслідок життєдіяльності тварин і процесів розкладання органічних речовин. Проте традиційні системи видалення повітря, які застосовуються у більшості свинарських і птахівничих комплексів, не враховують просторової неоднорідності параметрів повітря та часто працюють із надлишковими витратами енергії.

Особливої уваги потребує проблема пневматичних втрат тиску у вентиляційних каналах, що суттєво впливають на продуктивність системи та споживану потужність вентиляторів. Значна частка енергії витрачається на подолання опорів тертя та місцевих опорів, які виникають під час руху повітря по каналах різного діаметра, у місцях розгалужень, звужень, вигинів і при зміні швидкості потоку. Недооцінка цих факторів призводить до перевантаження електродвигунів, зниження ефективності повітрообміну та нерівномірного розподілу швидкостей у каналах. Внаслідок цього окремі ділянки приміщення можуть залишатися із підвищеною концентрацією шкідливих газів, тоді як інші вентилюються з надлишковими витратами повітря.

Існуючі методики розрахунку втрат тиску базуються переважно на спрощених моделях рівномірного потоку, що не враховують специфіку розгалужених мереж, змінну геометрію каналів та взаємний вплив локальних витяжних патрубків. Для адаптивних або мехатронних систем вентиляції, які працюють у динамічних умовах зі змінними витратами повітря, такі підходи є недостатніми. Тому постає необхідність побудови аналітичної моделі втрат тиску, яка б враховувала гідравлічні та геометричні параметри системи, характер руху потоку (ламінальний або турбулентний), опори у трійниках і колінах, а також ефект «звільненого динамічного тиску», що виникає під час зміни швидкості по довжині повітропроводу.

Розв'язання цієї задачі дозволить встановити залежності між конструктивно-технологічними параметрами вентиляційної системи (довжиною і діаметром каналів, кількістю відгалужень, відстанню між патрубками, коефіцієнтами шорсткості та місцевих опорів) і втратами тиску по довжині повітропроводу. Це, у свою чергу, створює підґрунтя для оптимізації енергоспоживання вентиляційного обладнання, розробки алгоритмів керування заслінками із сервоприводами та підвищення рівня автоматизації процесів регулювання мікроклімату у тваринницьких приміщеннях.

Аналіз останніх джерел

На основі узагальнення сучасних підходів до організації утримання свиней [2, 3] у провідних країнах Європи та в Україні встановлено, що найбільш ефективною та перспективною є інтенсивна технологія утримання з використанням частково або повністю щільних підлог у капітальних ізольованих приміщеннях. Такі споруди поділяються на секції, спеціалізовані для окремих технологічних груп тварин (свиноматки, поросята на дорощуванні, відгодівельники), що забезпечує стабільність параметрів мікроклімату та санітарно-гігієнічних умов утримання. Такий підхід відповідає рекомендаціям Європейської федерації тваринницької науки (EAAP) і нормам ДСТУ ISO 14644-3:2018 щодо контролю повітряного середовища у виробничих приміщеннях.

Дослідження параметрів мікроклімату у свинарських приміщеннях [4, 5, 6] показують, що відхилення температури, вологості або швидкості руху повітря від оптимальних значень викликає порушення терморегуляції організму тварин, підвищення рівня стресу, зниження апетиту та приростів живої маси. Так, за результатами експериментів [4, 7, 8], зниження температури на 3–4 °C нижче оптимального зменшує середньодобові прирости на 7–10 %, а перевищення вологості понад 80 % спричиняє підвищення частоти респіраторних захворювань майже удвічі. Підвищена концентрація вуглекислого газу (понад 0,25 %) і аміаку (понад 20 мг/м³) погіршує обмін речовин і знижує репродуктивні показники свиноматок [5, 9].

Згідно з нормами [10], оптимальні параметри мікроклімату для відгодівельників становлять:

- температура повітря 16–22 °C,
- відносна вологість 60–75 %,
- швидкість руху повітря 0,2–0,4 м/с,
- концентрація аміаку не більше 20 мг/м³,
- концентрація CO₂ – до 0,25 %,
- вміст сірководню – не більше 5 мг/м³.

Підтримання зазначених параметрів вимагає високої стабільності систем регулювання повітрообміну, особливо у приміщеннях з великою щільністю поголів'я. Результати численних досліджень [11, 12] доводять, що ефективна вентиляція є ключовим чинником забезпечення здоров'я

тварин і зниження енергоспоживання системи мікроклімату. Зокрема, робота [13] підтвердила, що оптимізація структури вентиляційної мережі та впровадження динамічного керування заслінками дозволяють зменшити витрати електроенергії на 12–18 %, забезпечуючи при цьому рівномірний розподіл швидкості повітря в зоні тварин.

Аналіз сучасних систем підтримання мікроклімату [14] свідчить, що найбільш поширеною у світовій практиці є система вентиляції з від'ємним тиском. Її основними перевагами є конструкційна простота, надійність, енергоощадність та можливість автоматизації керування повітрообміном. Повітря в таких системах видаляється через вентилятори, створюючи розрідження, завдяки якому свіже повітря надходить через регульовані клапани або заслінки. Проте класичні рішення мають і суттєві обмеження: нерівномірність повітрообміну у віддалених зонах приміщення, складність регулювання локальних потоків повітря, а також недостатню ефективність видалення важких газів (NH_3 , H_2S), які концентруються у нижніх шарах.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення автоматизованих адаптивних вентиляційних систем, що реагують на поточні параметри газового складу та температури повітря. У дослідженнях [15] запропоновано систему видалення забрудненого повітря з індивідуальним регулюванням витрат через кожен патрубок за допомогою витяжних заслінок із сервоприводами та датчиків якості повітря. Залежно від показників концентрації газів та температури, блок керування змінює положення заслінки, оптимізуючи локальний повітрообмін.

Подібні інтелектуальні системи дозволяють мінімізувати енергоспоживання вентиляторів, підвищити однорідність розподілу швидкостей повітря, а також забезпечити сталі параметри мікроклімату для груп тварин різного віку. Використання адаптивних систем вентиляції на основі сенсорних мереж і сервокерованих заслінок дозволяє підвищити рівномірність розподілу повітряних потоків у тваринницьких приміщеннях, знизити локальні концентрації шкідливих газів (NH_3 , CO_2) і зменшити енергоспоживання вентиляторів.

Таким чином, результати аналізу свідчать, що забезпечення нормативних параметрів мікроклімату у свинарських приміщеннях є можливим лише за умови використання адаптивних мехатронних вентиляційних систем, здатних до автоматичного регулювання локальних потоків повітря. Це створює передумови для підвищення енергоефективності виробництва, покращення добробуту тварин і зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

Мета роботи: розроблення та аналітичне обґрунтування закономірностей втрат тиску у вентиляційній системі видалення забрудненого повітря свинарських приміщень, що забезпечує підвищення енергоефективності роботи вентиляторного обладнання, рівномірність повітрообміну та стабільність параметрів мікроклімату.

Матеріали і методи досліджень

Основним елементом адаптивної вентиляційної системи видалення забрудненого повітря є витяжні заслінки із сервоприводами, які забезпечують регульований повітрообмін залежно від локального рівня забруднення. Заслінка виконана у вигляді диска, що обертається навколо осі, розташованої в її площині. Під час проходження повітряного потоку через повітропровід частина потоку огинає заслінку, внаслідок чого виникає пневматичний опір, який призводить до зменшення швидкості потоку і, відповідно, зниження тиску на виході.

Для визначення коефіцієнта зниження швидкості потоку, втрат тиску та споживаної потужності вентилятора залежно від кута повороту заслінки було проведено комплекс лабораторних експериментів. Лабораторна установка (рис. 1) включала вентилятор CF4113HBL-1000U-A99, продуктивність якого регулювалася димером d-001 P/W, електролічильник Bodasan PMB01-EU для контролю потужності, сервопривід MG90S, модуль керування Arduino Uno та систему вимірювання параметрів повітряного потоку.

Для вимірювання тиску використовувалася модернізована трубка Прандтля, під'єднана до датчика MPX5100DP, а температуру повітря фіксував аналоговий сенсор LM35. Передача даних відбувалася через плату керування Arduino Uno до персонального комп'ютера, на якому працювало середовище Arduino IDE. У цьому середовищі застосовано функцію осцилографа для визначення середніх значень тиску і температури та їх середньоквадратичних відхилень.

За показниками повного p_1 і статичного p_2 тисків визначали швидкість повітряного потоку V та витрати повітря q , перераховані на площу вихідного отвору, відповідно до залежностей [15]:

$$V = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} gRT \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}, \quad (1)$$

$$q = 3600V \frac{\pi D_p^2}{4} = 900\pi D_p^2 \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} gRT \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}, \quad (2)$$

де T – температура повітря, К; $\gamma = 1,4$ – показник адиабати; $R = 287$ Дж/(кг·К) – газова стала для повітря; D_p – діаметр повітропроводу, м.

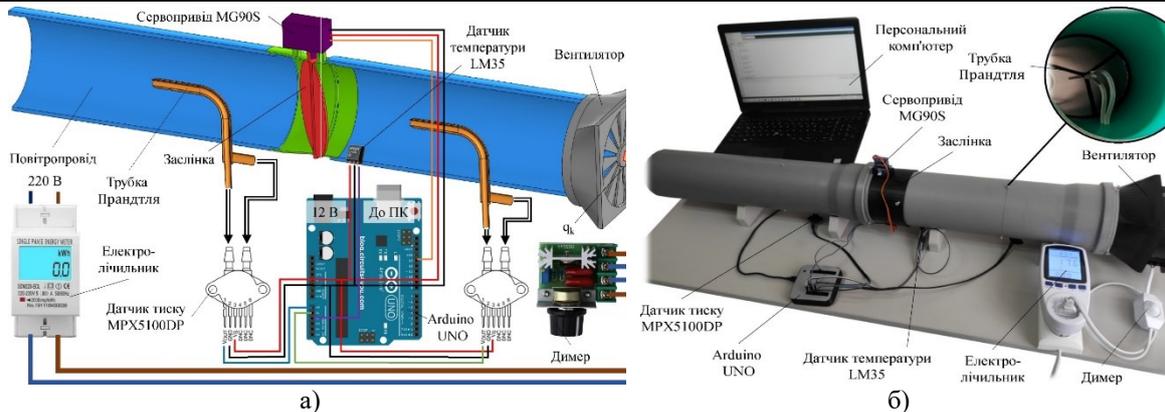


Рис. 1. Схема (а) та загальний вигляд (б) лабораторного обладнання для дослідження режимів роботи витяжної заслінки

Факторами дослідження було обрано кут повороту заслінки β (від 10° до 90°) та швидкість повітряного потоку V , створену вентилятором, на відстані $3D_p$ (≈ 330 мм) від заслінки. Дослідження проводили за повнофакторним планом $9 \times 9 = 81$ дослід, що забезпечує статистичну достовірність результатів. Критеріями оцінки обрано швидкість потоку повітря до і після заслінки та споживану потужність вентилятора N .

Наступним етапом було експериментальне дослідження повномасштабної моделі вентиляційної системи видалення забрудненого повітря (рис. 2). Установа складалася з чотирьох модулів, з'єднаних повітропроводом довжиною L і діаметром $D = 110$ мм. На одному кінці було встановлено відцентровий вентилятор DUNDAR CT 16.4, швидкість обертання якого регулювалася частотним перетворювачем CFW300, підключеним до комп'ютера для зчитування електричних параметрів.

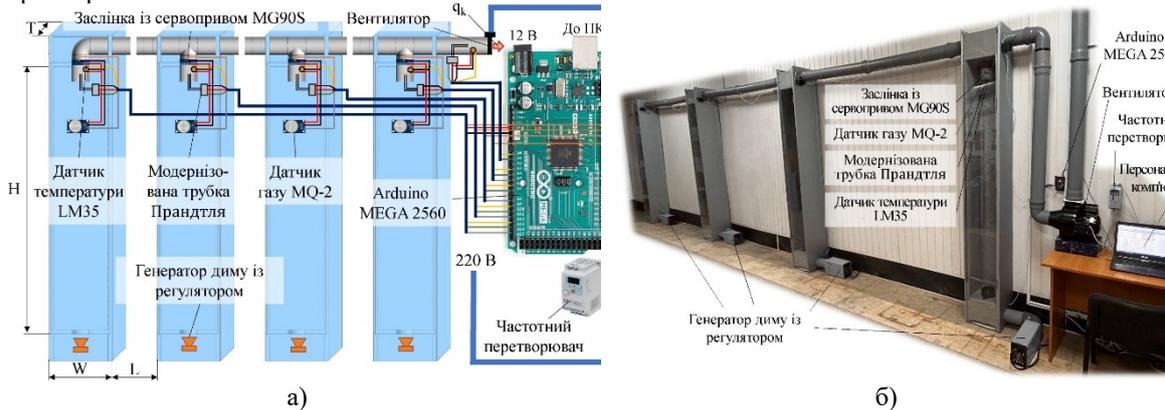


Рис. 2. Схема (а) та загальний вигляд (б) лабораторного станда для дослідження вентиляційної системи видалення забрудненого повітря

Кожен модуль являв собою короб із розмірами $H = 2500$ мм, $W = 400$ мм, $T = 400$ мм. Бічні та задня стінки виготовлені з екструдованого пінополістиролу, передня – з прозорого акрилу, що забезпечувало можливість візуального контролю процесу. У верхній частині модулів встановлено трійники або кутники для приєднання повітропроводів, а у нижній – заслінки із сервоприводами MG90S, керовані від плати Arduino MEGA 2560.

Для моніторингу параметрів середовища у фітинги повітропроводів вмонтовано датчики тиску MPX5100DP, датчики температури LM35 і газові сенсори MQ-2, що реагували на концентрацію диму. Зчитування інформації виконувалося в реальному часі за допомогою мікроконтролера Arduino, підключеного до персонального комп'ютера зі встановленим середовищем Arduino IDE. Для фіксації динаміки сигналів використовувалася функція осцилографа, що дозволяла визначати середні значення параметрів і їх дисперсії.

Імітацію забруднення повітря здійснювали за допомогою генератора диму Antari F-80/Z, розташованого в нижній частині модулів. У дослідженні розглядали три основні фактори: витрати повітря Q_{in} , $m^3/год$, довжину повітропроводу між модулями L_0 та співвідношення концентрації газів у модулях $n_{g1}:n_{g2}:n_{g3}:n_{g4}$. План експерименту формували за принципом повного факторного експерименту $5^2 = 25$ дослідів. Контрольним варіантом вважалося співвідношення концентрацій 1:1:1:1.

Критеріями оцінки приймали швидкість повітряного потоку перед заслінками, відхилення її від середнього значення та споживану потужність вентилятора N . Отримані результати використовували для порівняння з аналітичною моделлю, що дозволило уточнити передаточну функцію системи керування з урахуванням інерційності виконавчих елементів.

Для опису поведінки дискретної системи керування вентиляцією застосовано узагальнену

передаточну функцію:

$$W(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} y(k)z^{-k}}{\sum_{k=0}^{\infty} u(k)z^{-k}}, \quad (3)$$

де $W(z)$ – передаточна функція системи; $u(k)$ та $y(k)$ – вхідний і вихідний дискретні сигнали; $U(z)$ та $Y(z)$ – їх z -перетворення.

Таким чином, проведені дослідження дозволяють комплексно оцінити аеродинамічні характеристики вентиляційної системи та визначити вплив конструктивних і режимних параметрів на втрати тиску, швидкість і енергоспоживання.

Результати досліджень

Перший етап експериментальних досліджень проводився на лабораторному стенді для визначення динаміки зміни швидкості повітряного потоку до і після витяжної заслінки під час її повороту на заданий кут β (рис. 3).

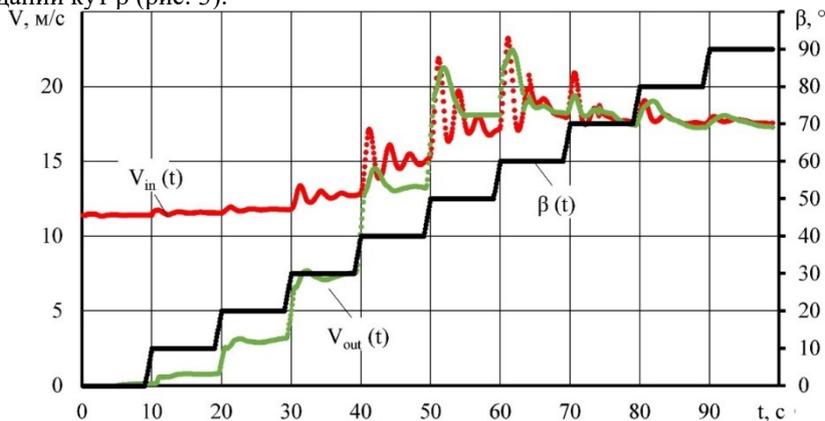


Рис. 3. Динаміка зміни швидкості на вході та виході із заслінки $V_{in}(t)$, $V_{out}(t)$ при повороті на заданий кут $\beta(t)$

Аналіз отриманих графіків показав, що під час поетапного відкриття заслінки від 10° до 90° швидкість повітряного потоку на вході $V_{in}(t)$ збільшується від 11,4 м/с до 18,0 м/с, тоді як на виході $V_{out}(t)$ зростає від 0,08 м/с до 17,8 м/с. У момент відкриття заслінки (тривалістю близько 1 с) спостерігається різкий стрибок швидкості як на вході, так і на виході, що пояснюється переходом потоку до турбулентного режиму. Після стабілізації положення заслінки параметри швидкості поступово вирівнюються. Подальші розрахунки виконувалися для стаціонарних значень V_{out} .

Більш детальний аналіз динаміки показує, що процес зміни швидкості має інерційний характер і супроводжується короткочасними коливаннями амплітуди потоку. Це свідчить про наявність зони нестабільного обтікання заслінки, де виникають вихори та локальні пульсації тиску. У момент максимального відкриття потоку спостерігається вирівнювання профілю швидкості по перерізу каналу, що є ознакою встановлення стабільного турбулентного режиму руху.

Під час часткового перекриття отвору ($\beta = 30\text{--}60^\circ$) формується компромісна зона, у якій відбувається перерозподіл динамічного і статичного тисків, а також зростає коефіцієнт місцевого опору. Цей ефект призводить до тимчасового збільшення навантаження на вентилятор і зростання енергоспоживання системи.

Змінюючи вхідну швидкість потоку за допомогою димера та кут повороту заслінки β ($10^\circ\text{--}90^\circ$), отримано масив експериментальних даних, на основі якого побудовано тривимірну поверхню залежності вихідної швидкості від параметрів керування (рис. 4).

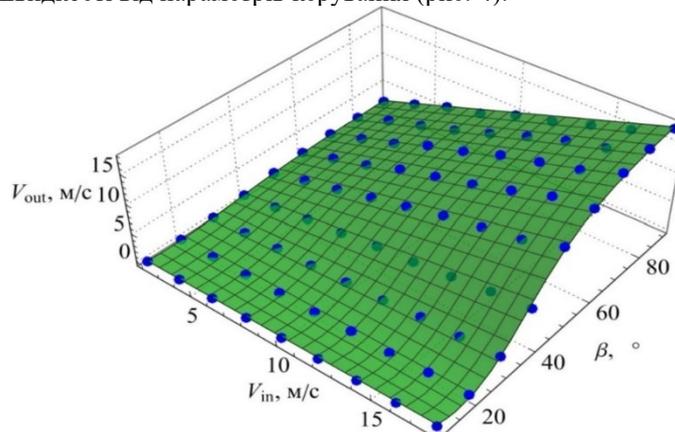


Рис. 4. Залежність вихідної швидкості потоку повітря V_{out} від вхідної швидкості V_{in} і кута повороту заслінки β

З графіка видно, що між величинами V_{in} та β існує нелінійна залежність типу арктангенса. У закодованому вигляді апроксимоване рівняння має вигляд:

$$V_{out} = 5,42863 + 5,59269 X_1 \times \text{arctg}(1,35715 + 3,31601 X_2 + 1,98998 X_2^2), \quad (4)$$

X_1, X_2 – закодовані значення факторів V_{in} і β . Розрахований критерій Фішера $F = 41,99$ перевищує табличне значення $F_{кр} = 2,45$, що підтверджує статистичну достовірність рівняння. Коефіцієнт кореляції $R = 0,784$ характеризує зв'язок між експериментальними та розрахунковими даними як високий.

У розкодованому вигляді рівняння (4) має форму:

$$V_{out} = 0,0446 + 0,689 V_{in} \times \text{arctg}(0,331 - 0,0436 \beta + 0,001302 \beta^2). \quad (5)$$

Враховуючи діаметр повітропроводу D_p , витрати повітря через заслінку можна подати як:

$$q_{out}(V_{in}, \beta, D_p) = (3600 \pi D_p^2 / 4) \cdot (0,0446 + 0,689 V_{in} \times \text{arctg}(0,331 - 0,0436 \beta + 0,001302 \beta^2)) = \\ = 126,02 D_p^2 + 1947,5 D_p^2 V_{in} \times \text{arctg}(0,331 - 0,0436 \beta + 0,001302 \beta^2). \quad (6)$$

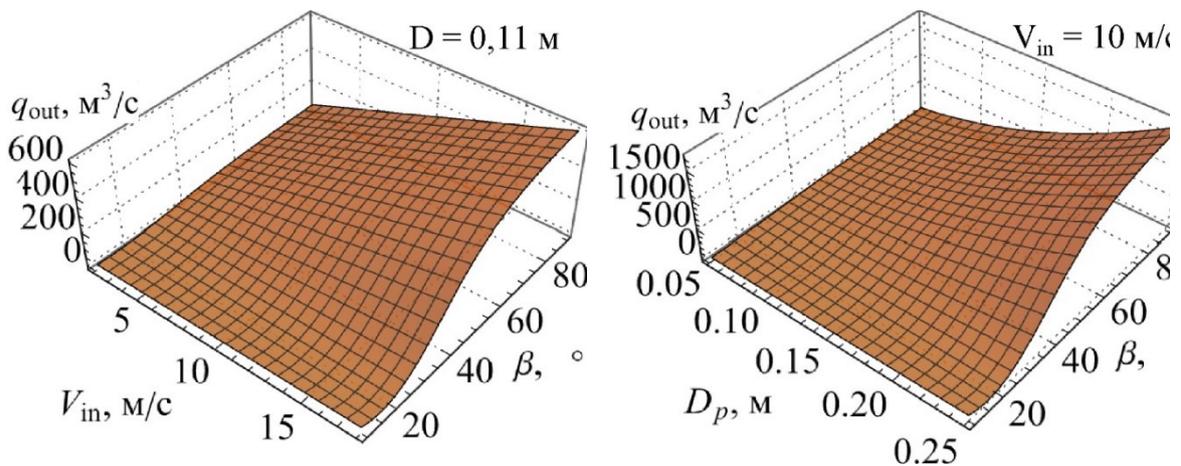


Рис. 5. Залежність витрат повітря q_{out} через заслінку від вхідної швидкості V_{in} і кута повороту заслінки β

Коефіцієнт зниження швидкості потоку ι визначається як відношення швидкостей до і після заслінки:

$$\iota = V_{out} / V_{in} = 0,0446 / V_{in} + 0,689 \times \text{arctg}(0,331 - 0,0436 \beta + 0,001302 \beta^2). \quad (7)$$

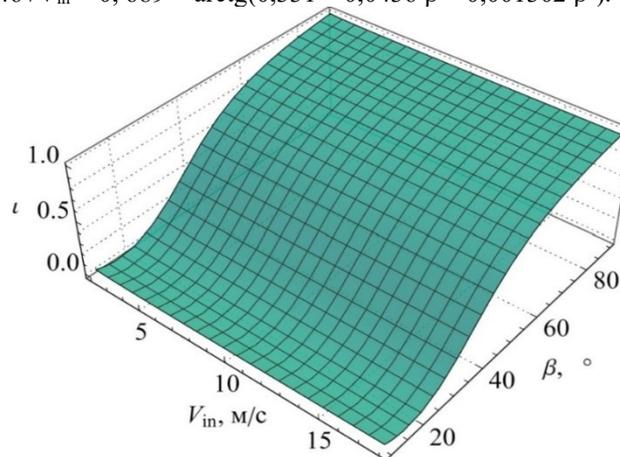


Рис. 6. Залежність коефіцієнта зниження швидкості потоку ι від вхідної швидкості V_{in} і кута повороту заслінки β

Параметр ι практично не залежить від V_{in} , а визначається головним чином кутом повороту β , що свідчить про домінуючу роль геометричного чинника у формуванні опору.

Далі визначали споживану вентилятором потужність N_{damp} залежно від тих самих факторів. У закодованому вигляді модель описується рівнянням:

$$N_{damp} = 49,7015 + 41,3971 X_1 + 20,1834 X_1^2 - 4,84245 X_2 - 3,34054 X_1 X_2 - 0,324002 X_2^2, \quad (8)$$

Після розкодування отримано:

$$N_{damp} = 30,33 - 0,0167 \beta - 0,611 V_{in} - 0,0104 \beta V_{in} + 0,3154 V_{in}^2, \quad (9)$$

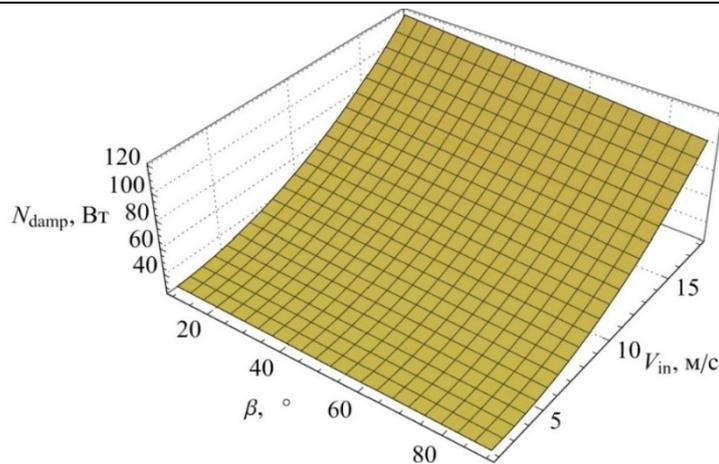


Рис. 7. Залежність споживаної вентилятором потужності N_{damp} від вхідної швидкості V_{in} і кута повороту заслінки β

З рисунку видно, що зі зростанням швидкості потоку V_{in} потужність вентилятора N_{damp} збільшується майже лінійно, а при закритті заслінки спостерігається додаткове зростання енергоспоживання на 18–20 %, що пояснюється збільшенням гідравлічного опору.

Для подальшого синтезу алгоритму роботи автоматизованої системи керування проведено перехід від залежності (5) до еквівалентної площі отвору витяжного патрубку:

$$\sigma_{\text{out}} = \sigma_{\text{in}} V_{\text{in}} / (0,0446 + 0,689 V_{\text{in}} \times \arctg(0,331 - 0,0436 \beta + 0,001302 \beta^2)), \quad (10)$$

За діаметра патрубка $D = 0,11$ м отримаємо:

$$\sigma_{\text{out}} = 0,0095 V_{\text{in}} / (0,0446 + 0,689 V_{\text{in}} \times \arctg(0,331 - 0,0436 \beta + 0,001302 \beta^2)). \quad (11)$$

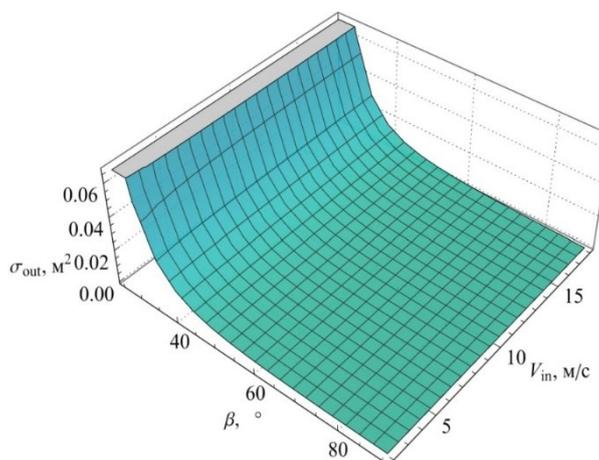


Рис. 8. Залежність умовної площі отвору σ_{out} у патрубку для видалення повітря від вхідної швидкості V_{in} і кута повороту заслінки β

Аналіз графіка показує, що умовна площа отвору σ_{out} залежить переважно від кута повороту заслінки β , що дозволяє використовувати дану функцію як передаточну характеристику виконавчого механізму. Спростуючи рівняння, отримуємо:

$$\sigma_{\text{out}} = 0,0138 / \arctg(0,331 - 0,0436 \beta + 0,001302 \beta^2). \quad (12)$$

Другий етап експериментів проводився для повномасштабної вентиляційної системи, що складалася з чотирьох модулів, об'єднаних повітропроводом різної довжини L_0 ". Результати показали, що середня швидкість потоку перед заслінками становила 3,2–15,8 м/с залежно від витрат $Q_{\text{in}} = 100$ –500 м³/год, а варіація не перевищувала 3–4 %.

Споживану потужність вентилятора N у закодованому вигляді описано рівнянням:

$$N = 106,05 + 52,7607 X_1 - 0,0000401818 X_1^2 + 136,447 X_2 + 0,864 X_1 X_2 + 84,421 X_2^2, \quad (13)$$

Після розкодування отримано остаточну форму:

$$N = 127,02 - 17,85 L_0'' - 0,8203 Q_{\text{in}} + 0,118 L_0'' Q_{\text{in}} + 0,00211 Q_{\text{in}}^2. \quad (14)$$

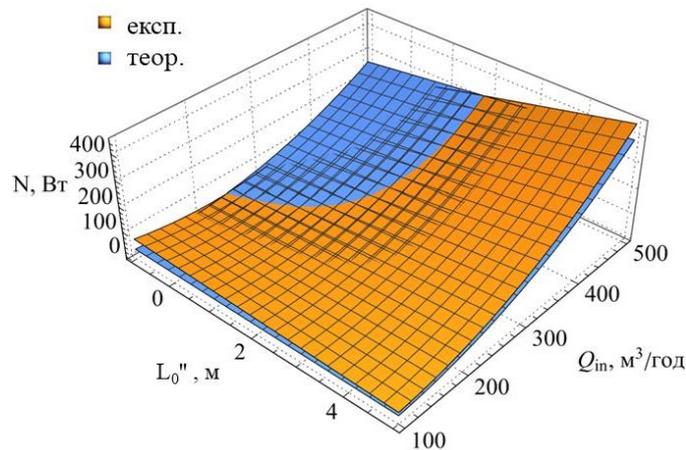


Рис. 9. Залежність споживаної потужності N від довжини повітропроводу L_0 і витрат повітря Q_{in}

Зі збільшенням витрат повітря Q_{in} та довжини повітропроводу L_0 спостерігається зростання енергоспоживання системи. Отримані результати добре узгоджуються з розрахунковими даними, а коефіцієнт кореляції $R = 0,94$ підтверджує високу точність і адекватність запропонованої моделі.

Висновки

Проведені аналітичні та експериментальні дослідження дозволили встановити закономірності зміни втрат тиску у вентиляційній системі видалення забрудненого повітря тваринницьких приміщень. Визначено, що величина пневматичних втрат істотно залежить від кута повороту витяжних заслінок, швидкості потоку та довжини повітропроводів. Отримані рівняння регресії і передаточні функції описують реальні процеси з високим коефіцієнтом кореляції ($R = 0,94$), що підтверджує адекватність побудованої моделі.

Встановлено, що застосування адаптивної системи з сервокерованими заслінками забезпечує рівномірний розподіл повітряних потоків та стабільність параметрів мікроклімату у всіх зонах приміщення. Запропоновані аналітичні залежності можуть бути використані при проектуванні мехатронних систем вентиляції та оптимізації режимів роботи автоматизованих систем мікроклімату у свинарських комплексах.

Література

1. Калетнік Г. М. Перспективи підвищення енергетичної автономії підприємств АПК в рамках виконання енергетичної стратегії України. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2019. Вип. 4. С. 90–98.
2. Лихач В. Я., Лихач А. В. *Технологічні інновації у свинарстві : монографія*. Київ : ФОП Ямчинський О. В., 2020. 291 с.
3. Інформаційний сайт з питань свинарства. URL: <http://www.svinovodstvo.com.ua>
4. Самохіна Є. А., Повод М. Г., Милостивий Р. В. Параметри мікроклімату в свинарських приміщеннях влітку за різних систем вентиляції та їхній вплив на продуктивність лактуючих свиноматок і ріст підсисних поросят. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Тваринництво*. 2018. Вип. 2. С. 218–223.
5. Ткачук О. Д. Вплив мікроклімату на основні показники резистентності свиней. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2010. № 2. С. 136–140.
6. Демчук М. В., Решетнік А. О. Мікроклімат та ефективність роботи системи вентиляції в реконструйованих приміщеннях для свиней в різні періоди року. *Науковий вісник ЛНАУ*. 2006. Т. 8, № 1 (28). С. 36–42.
7. Яропуд В. М. Дослідження ефективності процесу функціонування мехатронної системи забезпечення мікроклімату тваринницьких приміщень. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 1 (124). С. 56–72. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-7
8. Яропуд В. М. Експериментальні дослідження вентиляційної системи нагнітання чистого повітря. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. № 4 (333). С. 251–258. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-339-4-40
9. Kaletnik G. M., Yaropud V. M. Experimental studies of the effectiveness of systems for providing a negative pressure microclimate in livestock premises. *Design, Production and Operation of Agricultural Machines*. 2023. Issue 53. P. 66–84. DOI: [10.32515/2414-3820.2023.53.66-84](https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.66-84)
10. *Відомчі норми технологічного проектування. Свинарські підприємства (комплекси, ферми, малі ферми)*. ВНТП-АПК-02.05. Міністерство аграрної політики України. 2005. 98 с.
11. Долгіх Д. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів ґрунтового теплообмінника для вентиляції тваринницьких приміщень : дис. канд. техн. наук : 05.05.11. 2017. 178 с.
12. Buoi E., Cialini C., Costa A. Air Quality Assessment in Pig Farming: The Italian Classyfarm.

Animals. 2023. Vol. 13, No. 14. P. 2297. DOI: 10.3390/ani13142297

13. Norton T., Sun D. W., Grant J., Fallon R., Dodd V. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresource Technology*. 2007. Vol. 98, No. 12. P. 2386–2414. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.11.025

14. Яропуд В. М., Алієв Е. Б. Результати обстеження стану забезпечення мікроклімату в свинарнику із системою вентиляції від'ємного тиску. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 2 (113). С. 168–177. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-2-17

15. Yaropud V. Experimental studies of the ventilation system for the intake of contaminated air. *Scientific Journal of TNTU (Ternopil)*. 2024. Vol. 116, No. 4. P. 100–110. DOI: [10.33108/visnyk_tntu2024.04.100](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2024.04.100)

References

1. Kaletnik, H. M. (2019). Prospects for increasing the energy autonomy of agro-industrial enterprises within the framework of Ukraine's energy strategy. *Visnyk ahraryoi nauky Prychornomoria*, (4), 90–98.
2. Lykhach, V. Ya., & Lykhach, A. V. (2020). *Technological innovations in pig farming: monograph*. Kyiv: FOP Yamchynskiy O. V.
3. Pig farming information website. (2024). Retrieved October 10, 2024, from <http://www.svinovodstvo.com.ua>.
4. Samokhina, Ye. A., Povod, M. H., & Mylostyvyi, R. V. (2018). Microclimate parameters in pig houses in summer under different ventilation systems and their impact on the productivity of lactating sows and the growth of suckling piglets. *Visnyk of Sumy National Agrarian University. Series: Animal Science*, (2), 218–223.
5. Tkachuk, O. D. (2010). The influence of microclimate on the main indicators of pigs' resistance. *Visnyk of Poltava State Agrarian Academy*, (2), 136–140.
6. Demchuk, M. V., & Reshetnik, A. O. (2006). Microclimate and efficiency of ventilation systems in reconstructed pig houses in different periods of the year. *Scientific Bulletin of Lviv National Academy of Veterinary Medicine*, 8(1(28)), 36–42.
7. Yaropud, V. M. (2024). Study of the efficiency of functioning of a mechatronic system for ensuring the microclimate of livestock premises. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*, 1(124), 56–72. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-7.
8. Yaropud, V. M. (2024). Experimental studies of the ventilation system for supplying clean air. *Visnyk of Khmelnytskyi National University. Series: Technical Sciences*, 4(333), 251–258. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-339-4-40.
9. Kaletnik, G. M., & Yaropud, V. M. (2023). Experimental studies of the effectiveness of systems for providing a negative-pressure microclimate in livestock premises. *Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (53), 66–84. DOI: 10.32515/2414-3820.2023.53.66-84.
10. Departmental technological design standards. Pig enterprises (complexes, farms, small farms). VNTP-APK-02.05. (2005). Ministry of Agrarian Policy of Ukraine. 98 p.
11. Dolhikh, D. (2017). *Justification of design and technological parameters of a ground heat exchanger for ventilation of livestock premises: PhD thesis (05.05.11)*. 178 p.
12. Buoi, E., Cialini, C., & Costa, A. (2023). Air quality assessment in pig farming: The Italian Classyfarm. *Animals*, 13(14), 2297. DOI: 10.3390/ani13142297.
13. Norton, T., Sun, D.-W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Technology*, 98(12), 2386–2414. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.11.025.
14. Yaropud, V. M., & Aliiev, E. B. (2021). Results of the survey of microclimate maintenance in a pig house with a negative-pressure ventilation system. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*, 2(113), 168–177. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-2-17.
15. Yaropud, V. (2024). Experimental studies of the ventilation system for the intake of contaminated air. *Scientific Journal of TNTU (Ternopil)*, 116(4), 100–110. DOI: 10.33108/visnyk_tntu2024.04.100.