**Яропуд В.М.**

д.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Yaropud V.**Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.565.9:631.244:628.84****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-1****ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНОЇ
ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОГО
ТРИТРУБНОГО
ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРА В
СИСТЕМАХ МІКРОКЛІМАТУ
ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ**

У статті представлено результати теоретичних і експериментальних досліджень адаптивного тритрубного теплоутилізатора, призначеного для енергоощадного забезпечення мікроклімату у тваринницьких приміщеннях. Обґрунтована актуальність застосування рекуперативних систем у вентиляційних комплексах, що працюють в умовах високої вологості, запиленості та агресивного газового середовища, де традиційні теплоутилізатори демонструють низьку ефективність і обмежений ресурс. Запропонована конструкція включає три коаксіальні канали з протитечіюю взаємодією повітряних потоків, адаптивні заслінки з сервоприводами, систему датчиків температури, швидкості та якості повітря, а також блок автоматизованого керування, що забезпечує динамічну стабілізацію режимних параметрів.

Проведено комплексну оцінку теплотехнічних та аеродинамічних характеристик експериментального зразка на спеціалізованому стенді. Дослідження виконано за методом повного трифакторного експерименту, що дозволило визначити вплив довжини теплоутилізатора, об'ємних витрат повітря та температури зовнішнього середовища на корисну теплову потужність. На основі експериментальних даних побудовано регресійну модель, статистично підтверджено її адекватність і визначено значущі фактори та їх взаємодії. Установлено, що система має оптимальний режим роботи за витрати повітря $V \approx 0,39 \text{ м}^3/\text{с}$, при якому досягається максимальна теплова потужність 4386 Вт за довжини $L = 8 \text{ м}$ та температури зовнішнього повітря 0°C .

Результати підтверджують ефективність тритрубної адаптивної конструкції та її переваги над традиційними рекуператорами, зокрема рівномірність нагрівання припливного повітря, зниження енергоспоживання вентиляторів і можливість стабільної роботи у складних експлуатаційних умовах. Отримані дані створюють передумови для промислового впровадження теплоутилізатора та подальшої оптимізації його конструкційних параметрів.

Ключові слова: адаптивний теплоутилізатор; тритрубний теплообмінник; рекуперація теплоти; вентиляційні системи; мікроклімат тваринницьких приміщень; корисна теплова потужність; протитечіюний теплообмін; енергоефективність; математичне моделювання; експериментальні дослідження.



Вступ. Забезпечення стабільного та контрольованого мікроклімату у тваринницьких приміщеннях є одним із ключових чинників технологічної ефективності виробництва. Порушення температурного режиму, вологості, швидкості руху повітря та газового складу призводить до суттєвого погіршення продуктивності тварин. Відомо, що навіть незначні відхилення параметрів мікроклімату можуть знизити надой корів на 10–20 %, середньодобові прирости молодняку – на 20–33 %, а загибель ослабленого приплоду у перші 10 днів сягає 40 %. Це супроводжується перерозходом кормів, підвищенням витрат на лікування, збільшенням технологічних простоїв та зменшенням довговічності приміщень і обладнання через вплив вологи, конденсату та агресивних газів [1, 2].

Функціонування систем вентиляції у холодний період року потребує значних витрат на підігрів припливного повітря. До 90 % паливно-енергетичних ресурсів, що витрачаються у тваринницьких господарствах, припадає саме на створення комфортного температурного режиму. [3, 4]. Зростання вартості енергоносіїв та необхідність зниження собівартості продукції актуалізують потребу впровадження енергоощадних технологій, зокрема систем утилізації теплоти вентиляційних викидів, які здатні повернути в приміщення значну частку раніше втраченого тепла [5].

Однак наявні конструкції теплоутилізаторів не забезпечують повною мірою вимоги тваринницьких приміщень, що характеризуються високою запиленістю, вологістю до 80 %, наявністю агресивних газів (аміак, сірководень) і біологічних забруднювачів. Роторні та інші регенеративні установки дозволяють перетікання вологи й мікроорганізмів між потоками, що є недопустимим для санітарних норм та безпосередньо впливає на здоров'я тварин [6]. Контактні теплообмінники потребують проміжного теплоносія, що ускладнює обслуговування, потребує насосного обладнання і знижує надійність роботи в агресивному середовищі. Пластинчасті рекуператори ефективні в промислових умовах, але чутливі до забруднення, мають високі гідравлічні опори та складні у промиванні [3, 5].

Кожухотрубні теплоутилізатори типу «труба в трубі» вважаються найбільш перспективними для тваринницької галузі завдяки простоті конструкції, відсутності змішування потоків та стійкості до агресивного середовища. Проте традиційні двотрубні рішення мають низку суттєвих недоліків: нерівномірність нагрівання припливного повітря, збільшення втрат тиску при зростанні

довжини теплообмінника, обмежену теплову потужність та чутливість до зміни витрат вентиляторів [7, 8]. Унаслідок цього корисна теплова потужність утилізатора значно нижча за теоретично можливу, а енергоспоживання вентиляційної системи зростає.

Вирішення цих суперечностей можливе шляхом розроблення адаптивних багатотрубних конструкцій, зокрема тритрубного концентричного теплоутилізатора. Особливість такого теплообмінника полягає у наявності двох зон теплообміну різної інтенсивності, оптимізованих для потоків припливного та витяжного повітря. Це дозволяє підвищити рівномірність прогрівання повітря, забезпечити керованість процесу теплопередачі та мінімізувати втрати тиску. Крім того, тритрубна схема дозволяє реалізувати протитокову взаємодію потоків, що в теорії забезпечує максимальну можливу теплотехнічну ефективність у порівнянні з прямотоком.

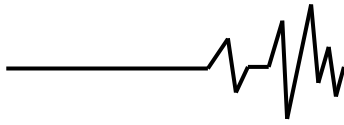
Складність розроблення таких теплоутилізаторів полягає у визначенні раціональних співвідношень діаметрів труб, довжини теплообмінної зони, режимів роботи вентиляторів, а також у забезпеченні рівномірного розподілу припливного повітря на виході. Відомо, що зміна геометрії та витрат призводить до нелінійних змін пневматичних втрат, коефіцієнтів тепловіддачі та корисної теплової потужності утилізатора. Тому дослідження цих параметрів потребує комплексного підходу, який поєднує математичне моделювання та експериментальні випробування.

Таким чином, науково-технічна проблема, що потребує вирішення, полягає у створенні адаптивного тритрубного теплоутилізатора для тваринницьких приміщень та об'єднуванні його конструкційно-технологічних параметрів, які забезпечують:

- інтенсифікацію теплообміну та збільшення корисної теплової потужності;
- зниження енергоспоживання вентиляційного обладнання;
- рівномірність температури й витрати припливного повітря;
- стабільність роботи в умовах агресивного середовища;
- дотримання санітарно-гігієнічних норм без змішування потоків повітря.

Розв'язання цієї проблеми сприятиме зниженню енерговитрат на опалення тваринницьких приміщень, підвищенню технологічної надійності вентиляційних систем та забезпеченню оптимального мікроклімату для утримання сільськогосподарських тварин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематика енергозбереження в



системах забезпечення мікроклімату тваринницьких приміщень набула особливої актуальності на тлі постійного зростання вартості енергоносіїв та підвищення вимог до зоотехнічної безпеки. Вентиляційні системи, які забезпечують видалення надлишкової вологи, шкідливих газів і тепла, виконують важливу санітарно-гігієнічну функцію, однак саме вони є головним джерелом тепловтрат у холодний період року. Через вентиляцію втрачається до 90 % теплоти, призначеної для підтримання нормативної температури повітря у приміщенні. У результаті значно зростає собівартість продукції тваринництва, а ефективність енергоспоживання залишається низькою [9, 10].

Сучасні дослідження однозначно показують, що одним з найбільш перспективних шляхів зниження енерговитрат є використання технологій утилізації теплоти витяжного повітря [11, 12, 13]. Однак широкий спектр існуючих конструкцій теплоутилізаторів не може бути впроваджений у тваринницьких приміщеннях через специфічні кліматичні та санітарні умови. Наприклад, роторні й регенеративні теплоутилізатори, незважаючи на високу ефективність у промислових системах вентиляції, дозволяють перетікання вологи, домішок та мікроорганізмів між потоками повітря. Це створює реальний ризик поширення хвороботворних бактерій і суперечить вимогам до безпеки тваринницького виробництва [14].

Контактні теплообмінні апарати також непридатні для роботи в умовах підвищеної вологості та агресивних газів, оскільки потребують циркуляційного насоса, складної системи герметизації та відзначаються низькою надійністю за інтенсивної корозійної дії атмосфер приміщень зі свинарниками або корівниками. Пластинчасті рекуператори демонструють високу теплотехнічну ефективність у промислових системах кондиціонування, проте їх практичне застосування в аграрній галузі обмежується засміченням вузьких каналів пилом, конденсатом та органічними залишками, значними гідравлічними опорами та ускладненим очищенням теплообмінних поверхонь.

У цьому контексті дослідники дедалі більше звертають увагу на кожухотрубні теплоутилізатори, що мають просту, надійну та корозійностійку конструкцію. Вони не допускають змішування потоків та характеризуються тривалим ресурсом роботи навіть за умов високої вологості та агресивного газового середовища. Однак класичні конструкції типу «труба в трубі» мають суттєві обмеження: недостатню рівномірність нагріву припливного повітря, підвищення пневматичних витрат із зростанням довжини теплообмінника та

залежність ефективності від стабільності витрати повітря.

Ці недоліки стимулювали формування нового наукового напрямку – розроблення адаптивних багатотрубних теплоутилізаторів, у яких роль кожного каналу та геометричного елемента підпорядковується оптимізації теплового та повітряного режимів. Важливою віхою у розвитку цього підходу стали теоретичні дослідження тритрубних концентричних теплоутилізаторів. Зокрема, роботи [15, 16, 17] містять комплексну математичну модель процесу теплопередачі, побудовану з урахуванням явища конденсації, що суттєво впливає на теплотехнічні характеристики апарата. Модель дозволяє отримати розподіл температур припливного та витяжного потоків уздовж довжини теплоутилізатора, визначити його теплову потужність та проаналізувати вплив геометричних параметрів на процес теплопередачі.

Особливе значення мають результати оптимізаційних розрахунків, у яких було встановлено раціональні співвідношення геометрії тритрубного теплоутилізатора [18]. При температурі навколишнього середовища $T_c = 0^\circ\text{C}$ отримано оптимальні залежності конструкційних параметрів від об'ємної витрати повітря V :

$$L = 14,776 \cdot V + 3,7335, \quad (1)$$

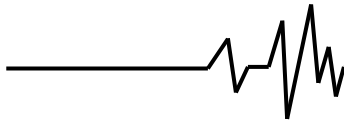
$$r_3 = 0,3619 \cdot V + 0,1523, \quad (2)$$

$$r_1 = 0,343 \cdot r_3 \quad (3)$$

$$r_2 = 0,686 \cdot r_3. \quad (4)$$

Ці залежності визначають оптимальну довжину теплообмінника та радіальні розміри коаксіальних повітропроводів, які забезпечують максимальну корисну теплову потужність при мінімальних пневматичних втратах та забезпечують високу рівномірність нагрівання припливного повітря. Такий підхід дозволив сформулювати принципово нову концепцію адаптивності теплоутилізатора, у якій геометрія апарата фактично «узгоджується» з режимами вентиляції.

Подальший розвиток досліджень показав, що конструкції з трьома коаксіальними каналами здатні забезпечити кращий контроль над тепловими потоками, ніж двотрубні аналоги. Завдяки можливості реалізації протиточної схеми руху повітря підвищується температура припливного повітря при тій самій витраті та зменшується необхідна потужність вентиляційного обладнання. Створена теоретична база стала основою для виготовлення експериментального зразка та для подальших досліджень аеродинамічних, теплотехнічних і енергетичних характеристик адаптивного тритрубного теплоутилізатора.



Таким чином, аналіз наукових джерел та проведених теоретичних досліджень свідчить, що подальше підвищення ефективності вентиляційних систем у тваринництві можливе лише шляхом оптимізації конструкційних і режимних параметрів рекуперативних теплоутилізаторів. Найбільш перспективним напрямом є створення адаптивних тритрубних теплоутилізаторів, у яких геометрія та режим роботи визначаються на основі математичних моделей, що враховують реальні теплотехнічні, аеродинамічні та експлуатаційні умови.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є експериментально-теоретичне дослідження теплотехнічної ефективності адаптивного тритрубного теплоутилізатора для систем мікроклімату тваринницьких приміщень шляхом встановлення впливу основних конструктивних і режимних параметрів на формування корисної теплової потужності, аеродинамічні втрати та рівномірність температури припливного повітря, а також обґрунтування раціональних параметрів його функціонування, що забезпечують підвищення енергоефективності вентиляційних систем порівняно з традиційними рекуперативними апаратами.

Матеріали і методи досліджень

Для експериментальної перевірки теплотехнічних та аеродинамічних характеристик адаптивного тритрубного теплоутилізатора створено спеціалізований лабораторно-експериментальний стенд [19]. Його конструкція забезпечує можливість варіювання геометричних параметрів теплоутилізатора, відтворення різних температурних умов та реалізацію контрольованих режимів подачі повітря. Схема роботи стенда та його зовнішній вигляд подані на рисунку 1. Стенд складається із секційної системи тритрубних модулів, імітатора приміщення і зовнішнього середовища, двох вентиляторних установок, електронагрівального блока та комплексу вимірювально-керуючого обладнання.

Тритрубні модулі виготовлені відповідно до рекомендацій теоретичних досліджень [15], що визначили раціональні габаритні параметри. Довжина одного модуля становить $L_m = 1$ м. Зовнішня труба має діаметр $D_m = 0,40$ м, середня труба – $D'_m = 0,274$ м, внутрішня труба – $D''_m = 0,138$ м, при товщині стінки $\delta_m = 0,0005$ м. Комбінація кількох модулів дозволяє формувати теплоутилізатор довжиною від 4 до 8 м залежно від варіанта досліду. Таке конструкторське рішення забезпечує гнучкість під час досліджень та дає змогу оцінити вплив

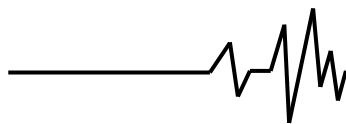
зміни довжини теплоутилізатора на його теплотехнічні параметри.

Адаптивний теплоутилізатор є конструкцією з трьох коаксіально розташованих повітропроводів, що забезпечують протиток припливного та витяжного повітря. Внутрішня труба 1 використовується для транспортування припливного повітря, яке перед подачею у приміщення проходить очищення у повітряному фільтрі 9 та може додатково підігріватися каналним нагрівачем 10. Середня труба 2 служить каналом для руху теплового витяжного повітря, яке надходить із приміщення через витяжну шахту 5. Зовнішня труба 3 є каналом для повернення припливного повітря у приміщення через систему розподільних отворів 8. Вона додатково теплоізолювана, щоб мінімізувати тепловтрати у навколишнє середовище, і нахилена під кутом $1-2^\circ$, що забезпечує самопливний відвід конденсату через трубку 4.

Реалізація адаптивного режиму роботи забезпечується системою датчиків та виконавчих механізмів. На кожному розподільному отворі 8 розташовано датчики температури 13 і датчики швидкості 14, а також заслінки 11 із сервоприводами 12. Усі елементи під'єднані до блока керування 16. Крім того, у приміщенні встановлено датчик якості повітря 17, який передає дані щодо концентрації CO_2 , аміаку та сірководню. Завдяки такій конфігурації теплоутилізатор здатний автоматично коригувати положення заслінок, інтенсивність роботи вентиляторів та режим нагріву, що забезпечує стабільність параметрів припливного повітря по всій довжині установки.

Після запуску системи блок керування 16 проводить ініціалізацію датчиків і встановлює взаємопов'язаний режим роботи припливного вентилятора 6 та витяжного вентилятора 7. Припливне повітря подається через фільтр 9 у внутрішню трубу 1, тоді як витяжне тепле повітря надходить у простір між внутрішньою і середньою трубами. Потoki рухаються назустріч один одному, що оптимізує умови теплопередачі: витяжне повітря охолоджується та віддає тепло через стінки труб, а припливний потік нагрівається ще до фази розподілу по приміщенню. Наявність протитоку підвищує теплову ефективність теплоутилізатора в порівнянні зі схемами прямотоку.

Рівномірний розподіл повітря реалізується через мережу розподільних отворів 8. Сервоприводи 12, керовані блоком 16, змінюють ступінь відкриття заслінок 11 на основі виміряних швидкостей потоку. Якщо один із отворів пропускає надлишковий об'єм повітря, його заслінка може частково прикриватися до моменту вирівнювання



швидкісного профілю вздовж труби. Температурний контроль здійснюється аналогічним чином: при зниженні температури до заданого порогу система автоматично вмикає або вимикає нагрівальний елемент 10.

Таким чином теплоутилізатор працює в режимі динамічного регулювання, забезпечуючи сталий температурний і повітряний баланс у приміщенні.

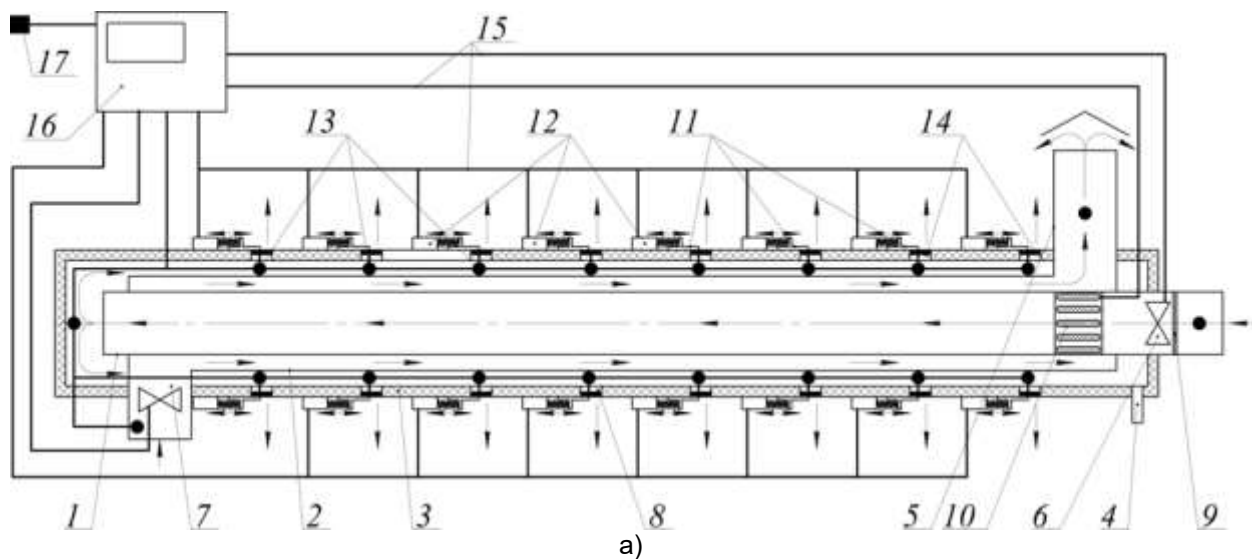
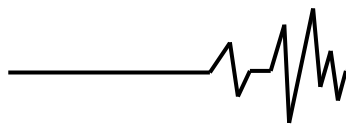


Рис. 1. Технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального стенда адаптивного тритрубного теплоутилізатора: 1 – внутрішня труба; 2 – середня труба; 3 – зовнішня труба; 4 – трубка для відведення конденсату; 5 – витяжна шахта; 6 – припливний вентилятор; 7 – витяжний вентилятор; 8 – розподільні отвори; 9 – повітряний фільтр; 10 – каналний електричний нагрівач; 11 – заслінка; 12 – сервопривод заслінки; 13 – датчик температури; 14 – датчик швидкості повітря; 15 – сигнальні проводи; 16 – блок керування; 17 – датчик якості повітря.

Оцінювання ефективності адаптивної конструкції здійснювали за критерієм корисної теплової потужності, що характеризує кількість теплоти, переданої припливному потоку з урахуванням енергетичних витрат вентиляторів:

$$\Delta N = N_Q - N_f = V \cdot \rho_{\text{н.у.}} \cdot \frac{273}{T_c} \cdot C_p (T_3(0) - T_c) - N_f \cdot 5)$$

де N_Q – потужність, яка використовується для нагріву потоку холодного повітря в теплоутилізаторі, Вт;



N_f – потужність, яка необхідна для прокачування повітря через теплоутилізатор, Вт;

$\rho_{н.у.}$ – густина повітря при нормальних умовах ($T_{н.у.} = 273\text{ K}$, $P_{н.у.} = 101325\text{ Па}$), $\rho_{н.у.} = 1,293\text{ кг/м}^3$ [20];

V – об'ємні витрати повітря в повітропроводі (вентилятора), $\text{м}^3/\text{с}$.

C_p – питома теплоємність повітря, $C_p = 1006\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ [20];

T_c , $T_z(0)$ – температура потоку повітря, що встановилася в зовнішньому середовищі та на виході теплоутилізатора відповідно, К.

Об'ємні витрати повітря в повітропроводі можуть бути визначені за формулою:

$$V = v \cdot A_i, \quad (6)$$

де v – швидкість повітря в повітропроводі, м/с ;

A_i – площа поперечного перерізу повітропроводу, м^2 .

Вимірювання швидкості й температури повітря проводили за допомогою приладу Solomat MPM 500E. Продуктивність вентиляторів регулювалася модулями FL FS1,6, а споживану електроенергію визначали за показами лічильників СО-EA05. Температурний фон зовнішнього середовища формувався каналним електронагрівачем НК-125-0,6-1.

Методика базувалася на застосуванні підходів математичного планування експериментів [21]. Варійовані фактори включали:

- довжину теплоутилізатора L (Z_1) – 4-8 м,
- об'ємні витрати повітря V (Z_2) – 0,14-0,64 $\text{м}^3/\text{с}$,
- температуру зовнішнього повітря T_c (Z_3) – 0-8 $^{\circ}\text{C}$.

Досліди проводили за схемою повного трифакторного експерименту ПФЕ 3^3 із застосуванням матриці Бокса-Бенкіна [22]. Кожен режим перевірявся у трьох повтореннях, що забезпечувало достовірність оцінювання теплотехнічних характеристик. Особливу увагу приділяли контролю роботи адаптивної системи заслінок та реагуванню системи керування на зміну швидкостей і температур, що дозволяло оцінити вплив адаптивності на загальну теплову ефективність теплоутилізатора.

Викладення основного матеріалу.

Згідно з методологією планування повного факторного експерименту ПФЕ 3^3 сформовано та реалізовано п'ятнадцять унікальних комбінацій варіювання трьох основних факторів, що визначають теплотехнічні характеристики експериментальної установки. Такий підхід забезпечив отримання репрезентативного масиву даних, достатнього для побудови достовірної математичної моделі процесу теплоутилізації. Після проведення серії дослідів експериментальні результати впорядковано відповідно до прийнятої матриці планування, що дозволило виконати порівняльний аналіз впливу кожного фактора та

їх взаємодій на корисну теплову потужність адаптивного тритрубного теплоутилізатора.

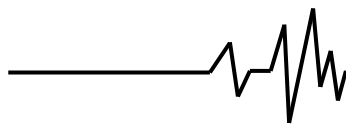
Подальша статистична обробка експериментальних даних, зокрема оцінювання коефіцієнтів регресії та визначення їх значущості, дала змогу сформулювати узагальнену регресійну залежність у закодованому вигляді. Отримана математична модель відображає закономірності зміни корисної теплової потужності під впливом варіюваних факторів та їх попарних і квадратичних взаємодій, що дозволяє адекватно описати поведінку системи в широкому діапазоні режимних параметрів:

$$\begin{aligned} \Delta N = & 2850,19 - 173,45Z_1 - 191,55Z_2 - \\ & 966,48Z^2 - 515,54Z_1Z_2 - \\ & - 2198,58Z^2_2 - 1528,02Z_3 - 119,9Z_1Z_3 - \\ & 948,67Z_2Z_3 - 183,54Z^2_3. \end{aligned} \quad (7)$$

Перевірка коректності отриманої регресійної моделі здійснювалася шляхом комплексного статистичного аналізу, що включав оцінювання однорідності дисперсій, адекватності опису процесу та відповідності моделі експериментальним даним. На рівні довірчої ймовірності 94 % встановлено, що дисперсії є однорідними: розраховане значення критерію Кохрена $G = 0,3042$ не перевищує табличного значення $G_{0,05}(2;15) = 0,344$, що свідчить про відсутність істотних коливань відтворюваності результатів у серіях паралельних дослідів.

Подальше оцінювання адекватності моделі за критерієм Фішера підтвердило її узгодженість із реальним процесом: відношення дисперсії адекватності $S_{ад}^2 = 574$ 501 до дисперсії похибки дослідів $S_y^2 = 268$ 607 дало значення критерію $F = 2,16$, яке є меншим за табличний поріг $F_{0,05}(9;30) = 2,23$. Це означає, що відхилення моделі від експериментальних даних не перевищують допустимих меж на будь-якому прийнятому рівні довірчої ймовірності, а сама модель коректно відтворює взаємодію факторів, що впливають на корисну теплову потужність теплоутилізатора.

Аналіз статистичної значущості коефіцієнтів регресійної моделі здійснювався на основі обчислених значень коефіцієнтів кореляції та критерію Стюдента. Для рівня довірчої ймовірності 94 % критичне значення становило $t_{0,05}(30) = 2,15$. Порівняння отриманих експериментальних значень t -показників із критичним порогом дало змогу встановити, що статистично значущими є коефіцієнти при таких факторах та їх взаємодіях: Z_1 , Z_1Z_2 , Z_2^2 , Z_3 , а також комбінований член Z_2Z_3 . Це означає, що саме ці параметри справляють найбільш істотний і математично підтверджений вплив на формування корисної теплової потужності теплоутилізатора.



З урахуванням відсіву статистично незначущих членів повне рівняння регресії (3) може бути приведене до спрощеного, але інформативно достатнього вигляду, який описує вплив факторів на корисну теплову потужність із високим ступенем достовірності:

$$\Delta N = 2858,19 - 966,489Z_2 - 1515,54Z_1Z_2 - 2198,58Z_2^2 - 1528,02Z_3 - 948,67Z_2Z_3. \quad (8)$$

Для подальшої інтерпретації отриманих результатів та забезпечення можливості їх практичного застосування регресійну залежність було подано у розкодованому вигляді. Така трансформація дозволяє перейти від безрозмірних змінних до реальних фізичних параметрів, які безпосередньо характеризують роботу теплоутилізатора та умови проведення експерименту. За результатами перетворень уточнена модель (4) набуває наступної аналітичної форми:

$$\Delta N = -3353,1 + 402,343 L - 1030,09 VL - 35162,2 V^2 + 33530 V - 948,67 VT_c - 13,15 T_c. \quad (9)$$

Аналіз отриманого розкодованого рівняння (5) дає підстави стверджувати, що всі досліджувані фактори роблять істотний внесок

у формування корисної теплової потужності адаптивного тритрубного теплоутилізатора (див. рисунки 2). Вплив довжини повітропроводу є однозначним: зі збільшенням його довжини зростає площа теплообміну та час взаємодії потоків, що приводить до підвищення ΔN . Аналогічно, зниження температури зовнішнього повітря збільшує температурний напір між витяжним та припливним повітрям, що також сприяє інтенсифікації теплопередачі.

Найбільш складним фактором з позиції математичного опису та фізичної інтерпретації виявилися об'ємні витрати повітря. Зміна витрати V зумовлює нелінійну реакцію системи: на початковому етапі збільшення V призводить до зростання теплопродуктивності, тоді як подальше підвищення витрати викликає спад ΔN через зменшення часу теплообміну та різке збільшення енергетичних витрат вентиляторів. Таким чином, залежність має виражений оптимум, який визначає найбільш ефективний режим роботи теплоутилізатора.

$$\max \{\Delta N(L = 8 \text{ м}; V = 0,39 \text{ м}^3/\text{с}; T_c = 0^\circ \text{C})\} = 4386 \text{ Вт}. \quad (10)$$

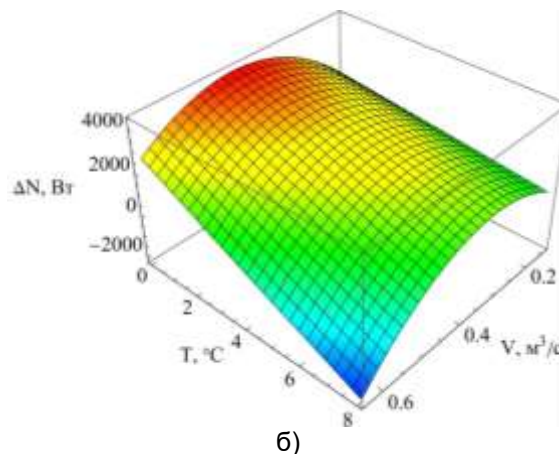
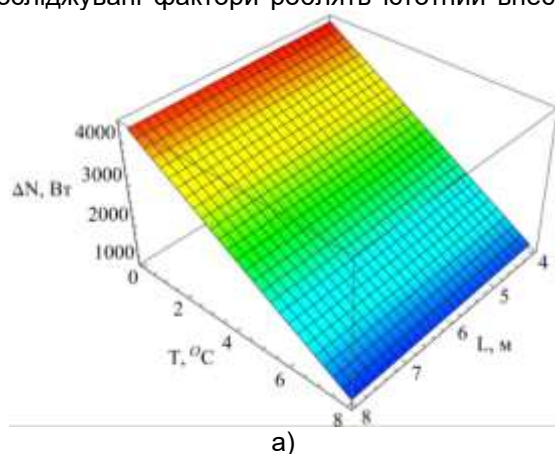
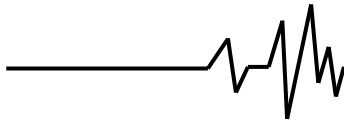


Рис. 2. Залежність корисної теплової потужності ΔN адаптивного тритрубного теплоутилізатора від довжини повітропроводу L , об'ємних витрат повітря V та температури зовнішнього повітря T_c

На графіку 2, а представлено поверхню, що характеризує зміну корисної теплової потужності ΔN залежно від довжини повітропроводу L та температури зовнішнього повітря T_c . Видно чітку тенденцію: зі збільшенням довжини адаптивного теплоутилізатора тепловий ефект системи зростає, що пояснюється збільшенням площі теплообміну та тривалішим контактом потоків у протитічному режимі. Водночас підвищення температури зовнішнього середовища зменшує тепловий градієнт між потоками припливного й витяжного повітря, що призводить до зниження ΔN . Візуально це проявляється у переході від червоних зон (максимальні значення) при $L \rightarrow 8$

м і $T_c \rightarrow 0^\circ \text{C}$ до синьо-зелених областей, які відповідають меншим значенням ΔN при коротших довжинах і вищих температурах зовнішнього повітря.

Графік 2, б демонструє залежність корисної теплової потужності ΔN від об'ємних витрат повітря V та температури зовнішнього повітря T_c . Характер поверхні свідчить про наявність оптимального значення витрати повітря, при якому ΔN досягає максимуму – перевищення цього оптимуму призводить до зниження теплопродуктивності через зменшення часу контакту потоків і зростання аеродинамічних втрат. Так само, як і на першій поверхні, підвищення T_c негативно впливає на



теплопередачу. Максимум поверхні припадає на малу температуру зовнішнього повітря та витрати повітря близько $0,39 \text{ м}^3/\text{с}$, що узгоджується з аналітичними результатами моделювання і відображено у вигляді червоної верхньої ділянки графіка.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що адаптивний тритрубний теплоутилізатор є ефективним технічним рішенням для систем вентиляції тваринницьких приміщень, у яких традиційні рекуперативні апарати демонструють недостатню надійність та теплотехнічну результативність. Запропонована конструкція, що включає три коаксіально розташовані канали, адаптивні заслінки, систему датчиків та автоматизоване керування, забезпечує стабільність повітряного режиму та підвищену рівномірність розподілу припливного повітря по довжині теплоутилізатора.

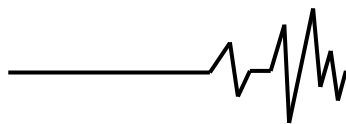
Отримана регресійна модель підтверджує істотний вплив усіх основних факторів – довжини теплообмінної секції, витрати повітря та температури зовнішнього середовища – на формування корисної теплової потужності. Збільшення довжини теплоутилізатора та зниження температури зовнішнього повітря сприяють інтенсифікації теплопередачі, тоді як зміна об'ємної витрати повітря зумовлює наявність оптимальної зони, у якій забезпечується максимальний тепловий ефект. Встановлено, що перевищення оптимальної витрати повітря призводить до зниження ΔN внаслідок зменшення часу теплового контакту та зростання аеродинамічних втрат.

Експериментальні дані підтверджують адекватність математичної моделі на 94% рівні довірчої ймовірності, що свідчить про коректність обраної методики планування експерименту. Максимальна корисна теплова потужність теплоутилізатора досягнута за умов $L = 8 \text{ м}$, $V = 0,39 \text{ м}^3/\text{с}$ та $T_c = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ і становить 4386 Вт , що істотно підвищує енергоефективність вентиляційної системи порівняно з традиційними двотрубними рекуператорами.

Таким чином, запропонований адаптивний тритрубний теплоутилізатор забезпечує енергетичну доцільність, технологічну надійність, високу рівномірність нагрівання припливного повітря та придатність до роботи в агресивних умовах тваринницьких приміщень. Отримані результати можуть слугувати основою для подальшої оптимізації конструкційних параметрів та розроблення промислових зразків енергоощадних вентиляційних систем нового покоління.

Список використаних джерел

1. Калетнік Г. М. Енергозабезпечення України та можливості задіяння потенційних джерел відтворювальної енергетики. *Вісник аграрної науки*. 2008. № 10. С. 50–55.
2. Kolechko A., Pikula O. Optimization of microclimate in livestock buildings as a key factor in preventing diseases in calves. *Modern engineering and innovative technologies*. 2025. Issue № 39 (4). P. 107-122. DOI: 10.30890/2567-5273.2025-39-04-014
3. Пришляк В. М., Яропуд В. М. Аналіз і класифікація технологічних схем теплоутилізаторів для тваринницьких приміщень. *Вісник ЖНАЕУ*. 2014. № 2 (45). Т. 4, ч. II. С. 344–350.
4. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ : Мінрегіон України, 2013. (Державні будівельні норми України).
5. Пришляк В. М., Яропуд В. М. Обґрунтування конструктивних параметрів рекуперативних теплоутилізаторів для тваринницьких приміщень. *Збірник наукових праць ВНАУ*. Серія: Технічні науки. 2014. Вип. 2 (85). С. 102–112.
6. Вакуленко Д., Мілейковський В. Моделювання ефективності теплоутилізації регенеративного пристрою за різними підходами. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2022. Т. 41. С. 32–38. DOI: 10.32347/2409-2606.2022.41.32-38.
7. Reventa GmbH. Каталог продукції. URL: <http://www.reventa.de/ru/company/efficiency> (дата звернення: 02.10.2025).
8. AgroVent. Офіційний сайт. URL: <https://agrovent.com.ua> (дата звернення: 02.10.2025).
9. Повод М. Технологія виробництва і переробки продукції свинарства : навч. посіб. Київ : Науково-методичний центр ВФПО, 2021. 360 с.
10. Горобець В. Г., Троханяк В. І. Енергоефективна система підтримання мікроклімату у птахівничих приміщеннях : монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2017. 193 с.
11. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Симуляція процесу тепломасообміну теплообмінника побічно-випарного типу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 4–15. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-1.
12. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Експериментальні дослідження ефективності функціонування систем забезпечення мікроклімату від'ємного тиску в тваринницьких приміщеннях. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2023. Вип. 53. С. 66–84. DOI:



10.32515/2414-3820.2023.53.66-84.

13. Герасимчук В. М. Оцінка і вдосконалення систем вентиляції свинарників різного призначення : дис. ... канд. с.-г. наук. 2018. 251 с.

14. Гулай Б. І., Шаповал С. П., Клименко Г. М., Сухолова І. Є., Касинець М. Є. Енергоефективні вентиляційні системи : колективна монографія. Львів : ГАЛИЧ-ПРЕС, 2020. 200 с.

15. Пришляк В. М., Яропуд В. М., Ковязін О. С., Алієв Е. Б. Обґрунтування геометричних параметрів розташування отворів у повітропроводі трьохтрубного концентричного теплоутилізатора. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2014. № 4 (46). С. 83–87.

16. Пришляк В. М., Яропуд В. М. Оптимізація технологічних параметрів тепломасообмінного процесу в теплообмінниках концентричного типу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2015. № 1 (91). С. 85–90.

17. Алієв Е. Б., Яропуд В. М. Порівняльний аналіз результатів теоретичних й експериментальних досліджень процесу функціонування теплоутилізатора для тваринницьких приміщень. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2015. Вип. 45, ч. II. С. 120–124.

18. 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.

19. Гончарук І. В., Яропуд В. М., Алієв Е. Б., Купчук І. М. Патент України на корисну модель № 148273. Адаптивний тритрубний теплоутилізатор. МПК F24F 3/052; F24F 7/04. Опубл. 21.07.2021, Бюл. № 29. 5 с.

20. Драганов Б. Х. Теплотехніка : підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : ІНКОС, 2005. 400 с.

21. Горбатенко І.Ю. Основи наукових досліджень. Київ : Вища школа, 2001. 92 с. 179.

22. Нечаєв В.П. Теорія планування експерименту. *Кондор*, 2009. 232 с.

References

1. Kaletnik, H. M. (2008). Energy supply of Ukraine and possibilities of using renewable energy sources. *Visnyk of Agrarian Science*, 10, 50–55. [in Ukrainian].

2. Kolehko, A., & Pikula, O. (2025). Optimization of microclimate in livestock buildings as a key factor in preventing diseases in calves. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, 39(4), 107–122. [https://doi.org/10.30890/2567-](https://doi.org/10.30890/2567-5273.2025-39-04-014)

[5273.2025-39-04-014](https://doi.org/10.30890/2567-5273.2025-39-04-014). [in English].

3. Pryshliak, V. M., & Yaropud, V. M. (2014). Analysis and classification of technological schemes of heat recovery units for livestock buildings. *Visnyk of Zhytomyr National Agroecological University*, 2(45), 4(II), 344–350. [in Ukrainian].

4. DBN V.2.5-67:2013. (2013). *Heating, ventilation and air conditioning*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. [in Ukrainian].

5. Pryshliak, V. M., & Yaropud, V. M. (2014). Substantiation of design parameters of recuperative heat recovery units for livestock buildings. *Collection of Scientific Works of Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical Sciences*, 2(85), 102–112. [in Ukrainian].

6. Vakulenko, D., & Mileikovskiy, V. (2022). Modeling the efficiency of heat recovery of a regenerative device using various approaches. *Ventilation, Lighting and Heat and Gas Supply*, 41, 32–38. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.41.32-38>. [in Ukrainian].

7. Reventa GmbH. (2025). *Product catalogue*. Retrieved October 2, 2025, from <http://www.reventa.de/ru/company/efficiency>. [in Ukrainian].

8. AgroVent. (2025). *Official website*. Retrieved October 2, 2025, from <https://agrovent.com.ua>

9. Povod, M. (2021). *Technology of production and processing of pig farming products*. Kyiv: Scientific and Methodological Center of Vocational Higher Education. [in Ukrainian].

10. Horobets, V. H., & Trokhaniak, V. I. (2017). *Energy-efficient microclimate maintenance system in poultry buildings*. Kyiv: Comprint. [in Ukrainian].

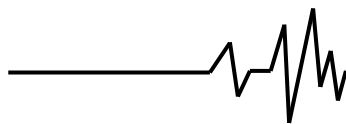
11. Kaletnik, H. M., & Yaropud, V. M. (2022). Simulation of the heat and mass transfer process of an indirect evaporative heat exchanger. *Machinery, Energy, Transport of Agro-Industrial Complex*, 1(116), 4–15. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-1-1>. [in English].

12. Kaletnik, H. M., & Yaropud, V. M. (2023). Experimental studies of the efficiency of negative-pressure microclimate systems in livestock buildings. *Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, 53, 66–84. [https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.66-](https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.66-84)

[84](https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.66-84). [in Ukrainian].

13. Herasymchuk, V. M. (2018). *Assessment and improvement of ventilation systems for pig buildings of various purposes* (PhD dissertation). [in Ukrainian].

14. Hulai, B. I., Shapoval, S. P., Klymenko, H. M., Sukholova, I. Ye., & Kasynets, M. Ye. (2020). *Energy-efficient ventilation systems*. Lviv: Halych-Pres. [in Ukrainian].



15. Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., Koviazin, O. S., & Aliiev, E. B. (2014). Substantiation of geometric parameters of hole placement in the air duct of a three-pipe concentric heat recovery unit. *Industrial Hydraulics and Pneumatics*, 4(46), 83–87. [in Ukrainian].

16. Pryshliak, V. M., & Yaropud, V. M. (2015). Optimization of technological parameters of heat and mass transfer processes in concentric-type heat exchangers. *Machinery, Energy, Transport of Agro-Industrial Complex*, 1(91), 85–90. [in Ukrainian].

17. Aliiev, E. B., & Yaropud, V. M. (2015). Comparative analysis of theoretical and experimental studies of the operation process of a heat recovery unit for livestock buildings. *Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, 45(II), 120–124. [in Ukrainian].

18. Yaropud, V. M. (2020). Study of operation processes and optimization of design and technological parameters of a three-pipe recuperator. *Machinery, Energy, Transport of Agro-Industrial Complex*, 1(108), 23–32. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-1-16>. [in English].

19. Honcharuk, I. V., Yaropud, V. M., Aliiev, E. B., & Kupchuk, I. M. (2021). Adaptive three-pipe heat recovery unit (Ukrainian utility model patent № 148273). Kyiv: Ukrainian Intellectual Property Institute. [in Ukrainian].

20. Drahanov, B. Kh. (2005). *Heat engineering* (2nd ed.). Kyiv: INKOS. [in Ukrainian].

21. Horbatenko, I. Yu. (2001). *Fundamentals of scientific research*. Kyiv: Vyshcha Shkola. [in Ukrainian].

22. Nechaiev, V. P. (2009). *Theory of experimental design*. Kyiv: Kondor. [in Ukrainian].

INVESTIGATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF AN ADAPTIVE TRIPLE- PIPE HEAT RECOVERY UNIT IN LIVESTOCK MICROCLIMATE SYSTEMS

The article presents the results of theoretical and experimental studies of an adaptive triple-pipe

heat recovery unit designed to ensure energy-efficient microclimate control in livestock buildings. The relevance of implementing recuperative systems in ventilation complexes operating under conditions of high humidity, dust concentration, and aggressive gaseous environments is substantiated, as traditional heat recovery units often demonstrate low efficiency and limited durability in such settings. The proposed design incorporates three coaxial channels with counter-flow air interaction, adaptive servo-driven dampers, a system of temperature, airflow velocity, and air-quality sensors, as well as an automated control unit that provides dynamic stabilization of operational parameters.

A comprehensive evaluation of the thermodynamic and aerodynamic characteristics of the experimental prototype was conducted on a specialized laboratory test bench. The study employed the methodology of a full three-factor experiment (PFE 3³), which enabled the determination of the influence of heat exchanger length, volumetric airflow rate, and outdoor air temperature on the useful thermal output. Based on the experimental data, a regression model was developed, its adequacy statistically confirmed, and significant factors and their interactions identified. It was established that the system exhibits an optimal operating mode at an airflow rate of approximately $V \approx 0.39 \text{ m}^3/\text{s}$, achieving a maximum thermal output of 4386 W at a length of $L = 8 \text{ m}$ and an outdoor air temperature of 0°C .

The results confirm the high efficiency of the adaptive triple-pipe configuration and its advantages over conventional recuperators, particularly in terms of uniform heating of supply air, reduced fan energy consumption, and reliable performance under challenging operational conditions. The findings create a foundation for the industrial implementation of the proposed heat recovery unit and further optimization of its structural parameters.

Keywords: adaptive heat recovery unit; triple-pipe heat exchanger; heat recuperation; ventilation systems; livestock building microclimate; useful thermal output; counter-flow heat exchange; energy efficiency; mathematical modelling; experimental studies.

Відомості про автора

Яропуд Віталій Миколайович - доктор технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com).

Yaropud Vitalii - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com).

Стаття надійшла 10.10.2025

Стаття прийнята 27.10.2025

Опубліковано 25.12.2025