



УДК 636.4:636.083.3

DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-7

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ**ЯРОПУД Віталій Миколайович**, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет**Vitalii YAROPUD**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Agrarian University

Розвиток тваринницької галузі є основою продовольчої безпеки України. Одним із напрямків вирішення цього завдання є покращення умов утримання тварин, у тому числі покращення мікроклімату тваринницьких та птахівницьких приміщень. Сучасні технології утримання тварин пред'являють високі вимоги до мікроклімату в тваринницьких приміщеннях. На думку вчених, фахівців тваринництва та технологів, продуктивність тварин на 50...60 % визначається кормами, на 15...20 % – доглядом та на 10...30 % – мікрокліматом у тваринницькому приміщенні. Відхилення параметрів мікроклімату від встановлених оптимальних меж призводить до скорочення надої молока на 10...20 %, приросту живої маси – на 20...35 %, збільшення відходу молодняка до 5...40 %, зменшення несучості курей - на 30...35 %, витрати додаткової кількості кормів, скорочення терміну служби обладнання, машин та самих будівель, зниження стійкості тварин до захворювань, негативно впливає обслуговуючий персонал.

В статті представлено конструктивно-технологічну схему мехатронної системи забезпечення нормативного мікроклімату тваринницьких приміщень, яка дозволяє підвищити ефективність забезпечення нормативного мікроклімату тваринницьких приміщень шляхом застосування мехатронної системи керування процесом знезараження повітря за допомогою ультрафіолетового випромінювання бактерицидних ламп. За результатами чисельного моделювання повітряного теплообмінника побічно-випарного типу встановлено розподіл температурного поля, векторного поля швидкостей і абсолютної вологості повітря в каналах різної форми (квадрат, рівносторонній трикутник, коло). Розрахований коефіцієнт температурної ефективності теплообмінника із каналами трикутної форми є найбільшим на відміну від квадратної і круглої форм. Порівняльний аналіз розподілу вологості у каналах різної форми підтверджує те, що зменшення абсолютної вологості потоку теплового повітря відбувається раніше у теплообміннику побічно-випарного типу із трикутними каналами.

Ключові слова: мікроклімат, повітря, вологість, температура, охолодження, мехатронна система, теплообмінник, параметри, чисельне моделювання, залежності, тваринницьке приміщення.

Ф. 6. Таб. 1. Рис. 18. Літ. 18.

1. Постановка проблеми

Світові тенденції до зростання цін на традиційні паливні ресурси, що використовуються для генерації електричної енергії, вимагають від підприємств аграрного сектора здійснення заходів щодо диверсифікації джерел постачання електроенергії та підвищення рівня енергетичної автономії. Попри існуючу загальну думку стосовно низької ефективності впровадження вітрової та сонячної енергетики в природно-кліматичних умовах України, досвід високорозвинених країн говорить інше:

– реалізація проєктів щодо впровадження автономних систем енергопостачання підприємств АПК на базі СЕС та ВЕС має екологічні та економічні переваги перед традиційним електропостачанням;

– сучасний розвиток технологій дозволяє здійснювати конверсію сонячної та вітрової енергії в електричну на територіях, що раніше (20-30 років тому) вважалися непридатними для такого виду енергетики [1].

Розвиток органічного сектору є особливо важливим та перспективним для вітчизняних аграріїв, споживачів та держави в цілому, особливо в контексті забезпечення продовольчої безпеки, здорового харчування та збереження навколишнього природного середовища. За стратегічною ціллю 1 «Забезпечення стимулюючої та дорадчої аграрної політики» Стратегічного курсу політики у сфері



розвитку агропромислового сектору, одним із шляхів досягнення стратегічної цілі є підтримка органічного виробництва. Ще одним із шляхів досягнення цілі є забезпечення розвитку сталого виробництва, де завданням для Уряду ставиться заохочення сталого сільськогосподарського виробництва, захисту навколишнього природного середовища і тварин, поширення застосування методів органічного виробництва і використання біотехнологій, «кліматично розумного» сільського та лісового господарства із скороченням викидів парникових газів та адаптацією до зміни клімату, сталого управління природними ресурсами та збереження і примноження біорізноманіття [2].

Мікроклімат свинарського приміщення визначається сукупністю температури, відносної вологості, хімічного і механічного складу повітря. Кожен з перерахованих показників окремо має суттєвий вплив на продуктивність тварин і повинен підтримуватися в строгих рамках, обумовлених фізіологічними потребами і можливостями тварин [3].

Забезпечення оптимального мікроклімату в свинарських приміщеннях пов'язано зі значними витратами теплової та електричної енергії, на що витрачається до 15 % коштів виробників. В опалювальний період теплогенеруючі пристрої свинарських приміщень різного призначення споживають до 90 % сукупних затрат паливо-енергетичних ресурсів, в літній період року охолоджувачі повітря споживають до 50 %. І навіть часткове зниження цих затрат приведе до значного скорочення витрат енергії на виробництво, а значить знизить її собівартість. Постійно зростаюча вартість енергоносіїв ускладнює ситуацію й загострює проблему впровадження енергозберігаючих технологій, а також актуалізує народногосподарську проблему зниження питомих енерговитрат на виробництво продукції тваринництва [4].

У промисловому тваринництві створення оптимального мікроклімату залежить від багатьох факторів і здійснюється через ряд компромісів. В даний час є дані, на підставі яких можна точно встановити ті чинники середовища, які необхідні для прояву генетично обумовлених здібностей тварин. Однак забезпечення термонейтральної зони пов'язано з великими капіталовкладеннями, високими цінами на енергоносії та останнім часом вимагає все більших експлуатаційних витрат. До тих пір, поки в ціноутворенні не настануть істотні зрушення, замість формування термонейтральної зони доцільно створювати оптимальне продуктивне середовище, яке є компромісом між великими витратами на виробництво продукції та кількістю і якістю тваринницької продукції. З огляду на те, що розміри капіталовкладень і витрати по експлуатації можуть значно змінюватися протягом короткого часу, характерні для оптимального продуктивного середовища мікрокліматичні умови також не можуть залишатися незмінними, навіть з огляду на той факт, що вимоги тварин до їх навколишнього середовища практично не змінюються протягом тривалого часу [5, 6].

Існуюче обладнання для забезпечення мікроклімату у свинарському приміщенні або повноцінно відповідає існуючим вимогам при цьому витрачається досить велика кількість енергії, або є економічними і не забезпечують оптимальні параметри мікроклімату [7]. Так до недоліків відомого обладнання [8] можна віднести відсутність використання теплової енергії утилізованого повітря і автоматичного переключення системи забезпечення мікроклімату для літнього (охолодження припливного повітря) і зимового (нагрівання припливного повітря) періодів. Це призводить до збільшення витрат енергії для забезпечення мікроклімату у свинарському приміщенні. Окрім при використанні обладнання [9] цього присутнє нераціональне використання теплової енергії утилізованого повітря, яка може бути використана для охолодження припливного повітря у літній період року і нагрівання його у зимовий період. Відсутність локального регулювання повітряного потоку не дає змогу створювати індивідуальний мікроклімат для різних груп тварин. Недоліками обладнання [10] є відсутність системи автоматичного регулювання параметрів мікроклімату, недостатній ступінь охолодження і нагрівання повітряного потоку, який можна компенсувати шляхом використання альтернативних джерел енергії. Кожна з цих установок працює виключно для охолодження або нагрівання припливного повітряного потоку, тобто непередбачена система перемикання режимів роботи. Окрім цього в конструктивно-технологічних схемах даних установок непередбачене автоматичне підкачування води, необхідної для зволоження повітря, та її утилізації. Враховуючи те, що система [11] для нагнітання повітря знаходиться під землею для забезпечення геотермального нагрівання (або охолодження), можливе утворення осередків розповсюдження мікроорганізмів (бактерій, грибів), які можуть потрапляти до тваринницького приміщення. Тому головним недоліком запропонованої системи є відсутність бактерицидної безпеки припливного повітря.

Сучасні системи створення мікроклімату включають підсистеми: система вентиляції - забезпечує регулювання газового складу та частково температури повітря (у літній період) в



приміщенні; системи кондиціонування та опалення - забезпечують регулювання температури повітря в приміщенні.

Для забезпечення відведення повітря з приміщення свинарника створена автоматична вентиляційна система забору забрудненого повітря з тваринницьких приміщень [12]. За результатами аналітичних досліджень даної системи математично представлено умову її ефективної роботи. Розроблена методика і реалізований на основі неї алгоритм дозволяє розраховувати площі отворів, які утворюють забірні заслінки із сервоприводами у патрубках для забору повітря. Отримані залежності зміни втрат тиску і потужності, яка необхідна для прокачування повітря через теплообмінник побічно-випарного типу циклу Майсоценка, від ширини центрального повітропроводу, витрат повітря через систему, довжини між патрубками системи та їх кількості [5, 13]. За результатами аналітичних досліджень втрат тиску повітряного теплообмінника побічно-випарного типу циклу Майсоценка, що використовується в розробленій вентиляційній системі забору забрудненого повітря з тваринницьких приміщень, отримані залежності втрат тиску і потужності від кількості каналів, площі перерізу каналів, середньої швидкості повітря в каналах за умови їх рівності і їх форми (квадрат, рівносторонній трикутник, коло) [6].

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Теплообмінник побічно-випарного типу має систему каналів, яка представлена на рис. 1. Теплообмінник містить незалежні робочі канали і з'єднанні вологі і сухі канали [14].

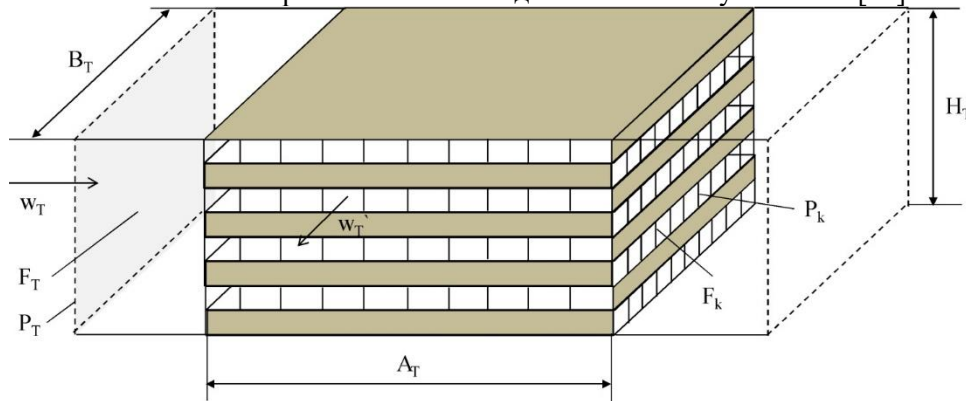


Рис. 1. Розрахункова схема теплообмінника побічно-випарного типу

Розглянемо спочатку рух повітря через робочі канали. Повітря проходить три ділянки. Перша ділянка - це розподіл потоку повітря з повітропроводу великого діаметру у канали меншого діаметру. Втрати тиску розраховуються за формулою

$$\Delta p_{\text{тк}} = \eta_1 \left(1 - \frac{N_k F_k}{F_T} \right) \frac{\rho (w_T)^2}{2} \quad (1)$$

де η_1 – коефіцієнт пом'якшення удару, $\eta_1 = 0,5$ [15]; N_k – кількість каналів; F_T – площа перерізу вхідного повітропроводу, м^2 ; F_k – площа перерізу каналу, м^2 ; w_T – середня швидкість повітря в робочих каналах теплообмінника побічно-випарного типу.

Друга ділянка - це переміщення потоку повітря по каналам. Втрати тиску розраховуються за формулою:

$$\Delta p_k = 0,11 N_k \frac{P_k A_T \rho w_T^2}{4 F_k} \sqrt{\frac{17 \mu_a P_k}{F_k \cdot w_k \cdot \rho} + \frac{\psi_k P_k}{4 F_k}}, \quad (2)$$

де P_k – периметр перерізу каналу, м^2 ; A_T – довжина робочого каналу, м^2 ; ψ_k – еквівалентна шорсткість стінок робочого каналу [16]; μ_a – динамічна в'язкість повітря, $\mu = 18,27 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ [16].

Третя ділянка - це злиття потоку повітря з каналів у повітропровід великого діаметру. Втрати тиску розраховуються за формулою:

$$\Delta p_{\text{кт}} = \eta_2 \left(1 - \frac{N_k F_k}{F_T} \right) \frac{\rho (w_T)^2}{2} \quad (3)$$

де η_2 – коефіцієнт пом'якшення удару, $\eta_2 = 0,5$ [16].

Наступним етапом розглянемо рух повітря через з'єднанні вологі і сухі канали. При цьому



повітря проходить п'ять ділянок. Перша ділянка - це розділення потоку повітря з повітропроводу великого діаметру у канали меншого діаметру. Втрати тиску $\Delta p_{\text{Тк}}$ розраховуються за формулою (1). Друга ділянка - це переміщення потоку повітря по сухим каналам. Втрати тиску $\Delta p_{\text{к}}$ розраховуються за формулою (2). Третя ділянка - це втрати тиску в просторовому (кільцевому) повороті на 180° $\Delta p_{\text{к}180}$ [6]

$$\Delta p_{\text{к}180} = \zeta_{\text{к}80} \frac{\rho (w_{\text{Т}}')^2}{2}, \quad (4)$$

де $\zeta_{\text{к}180}$ - коефіцієнт місцевого опору для просторового (кільцевого) повороту на 180° , згідно [16] $\zeta_{\text{к}180} = 2$.

Четверта ділянка - це переміщення потоку повітря по вологим каналам. Втрати тиску $\Delta p_{\text{к}}''$ розраховуються за формулою (2). П'ята ділянка - це злиття потоку повітря з вологих каналів у повітропровід великого діаметру. Втрати тиску $\Delta p_{\text{КТ}}$ розраховуються за формулою (3).

Загальні втрати тиску через теплообмінник побічно-випарного типу дорівнюють сумі втрат тиску на всіх вищезазначених ділянках. Приймаючи однакову кількість $N_{\text{к}}$ і розмір (площа $F_{\text{к}}$ і периметр $P_{\text{к}}$) робочих, сухих і вологих каналів отримуємо формулу для розрахунку пневмовтрат повітряного теплообмінника побічно-випарного типу

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{Т}} &= \Delta p_{\text{Тк}} + \Delta p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{КТ}} + \Delta p_{\text{Тк}} + \Delta p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{к}180} + \Delta p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{КТ}} = \\ &= \frac{\rho (w_{\text{Т}})^2}{2} \left[\eta_1 \left(1 - \frac{N_{\text{к}} F_{\text{к}}}{F_{\text{Т}}} \right) + 0,11 N_{\text{к}} \frac{P_{\text{к}} A_{\text{Т}}}{4 F_{\text{к}}} \sqrt{\frac{17 \mu_{\text{а}} P_{\text{к}}}{F_{\text{к}} \cdot w_{\text{Т}} \cdot \rho} + \frac{\psi_{\text{к}} P_{\text{к}}}{4 F_{\text{к}}}} + \eta_2 \left(1 - \frac{N_{\text{к}} F_{\text{к}}}{F_{\text{Т}}} \right)^2 \right] + \\ &+ \frac{\rho (w_{\text{Т}}')^2}{2} \left[\eta_1 \left(1 - \frac{N_{\text{к}} F_{\text{к}}}{F_{\text{Т}}} \right) + 0,11 N_{\text{к}} \frac{P_{\text{к}} B_{\text{Т}}}{4 F_{\text{к}}} \sqrt{\frac{17 \mu_{\text{а}} P_{\text{к}}}{F_{\text{к}} \cdot w_{\text{Т}} \cdot \rho} + \frac{\psi_{\text{к}} P_{\text{к}}}{4 F_{\text{к}}}} + \zeta_{\text{к}80} + \right. \\ &\left. + 0,11 N_{\text{к}} \frac{P_{\text{к}} B_{\text{Т}}}{4 F_{\text{к}}} \sqrt{\frac{17 \mu_{\text{а}} P_{\text{к}}}{F_{\text{к}} \cdot w_{\text{к}} \cdot \rho} + \frac{\psi_{\text{к}} P_{\text{к}}}{4 F_{\text{к}}}} + \eta_2 \left(1 - \frac{N_{\text{к}} F_{\text{к}}}{F_{\text{Т}}} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

де $B_{\text{Т}}$ - довжина сухого і вологого каналів, м²; $\psi_{\text{к}}$ - еквівалентна шорсткість стінок сухого і вологого каналів [16]; $w_{\text{Т}}$ - середня швидкість повітря в сухих і вологих каналах теплообмінника побічно-випарного типу, м/с.

Основними критеріями для вибору рекуперативних теплообмінників є [17, 18]:

- коефіцієнт температурної ефективності, який визначається формулою [15]:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{T_{\text{к}2} - T_{\text{н}2}}{T_{\text{н}1} - T_{\text{к}1}}, \quad (6)$$

де $T_{\text{к}2}$ - температура припливного повітря на виході з теплообмінника (теплоутилізатора), °С; $T_{\text{н}2}$ - температура припливного (зовнішнього) повітря на вході в теплообмінник (теплоутилізатор), °С; $T_{\text{н}1}$ - температура витяжного повітря на вході в теплообмінник (теплоутилізатор), °С; $T_{\text{к}1}$ - температура витяжного повітря на виході з теплообмінника (теплоутилізатора), °С;

- санітарно-гігієнічні показники: забруднень, які проходять через рекуператор не повинно бути, необхідно максимально забезпечити можливість контролю за якістю повітря і його очищенням;

- енергетична ефективність: дана величина характеризує питоме енергоспоживання, тобто як багато споживає рекуперативний теплообмінник (теплоутилізатор) для повернення від видаленого повітря одиниці теплоти;

- експлуатаційні характеристики: конструкція повинна бути придатною до ремонту, мати тривалий термін служби, вимагати мінімального обслуговування.

- вартість конструкції.

Для дослідження процесу тепломасообміну теплообмінника побічно-випарного типу із різною формою каналів проведемо чисельне моделювання в програмному пакеті Star CCM+. В якості моделей для сітки континуума були обрані такі: генератор багатограничних комірок, генератор поверхневої сітки і екструдер комірок. Базовий розмір комірки складав 0,001 м, а максимальне відношення розмірів зв'язаних ребр сітки - 1,3. Схема розташування каналів і загальний вигляд розрахованої сітки теплообмінника побічно-випарного типу показано на рис. 2-4.

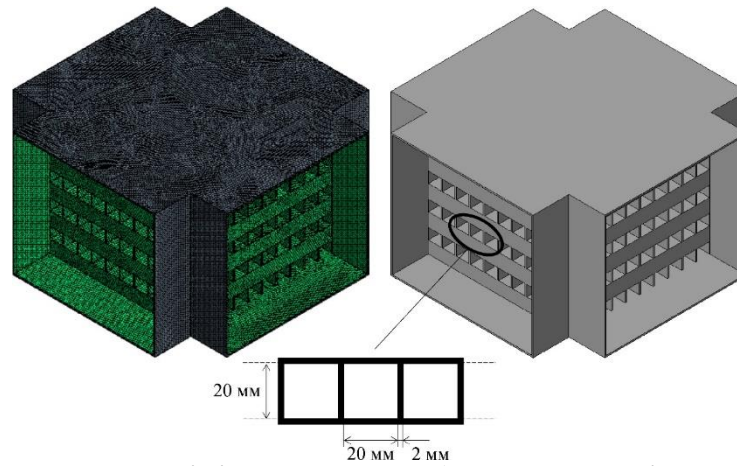


Рис. 2. Схема розташування каналів і загальний вигляд розрахованої сітки теплообмінника побічно-випарного типу із квадратними каналами

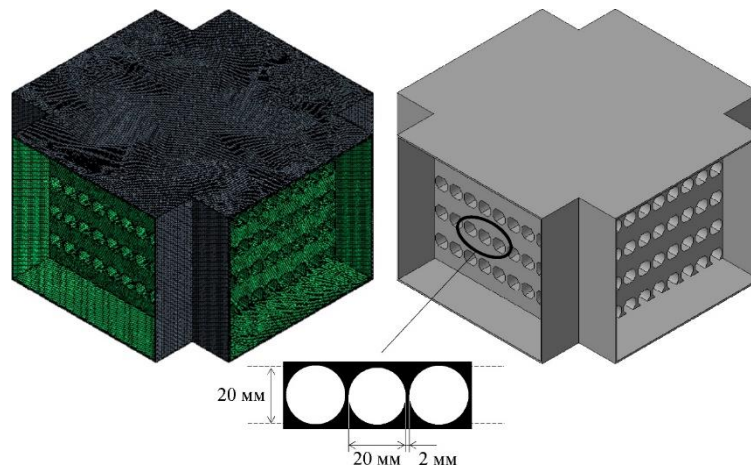


Рис. 3. Схема розташування каналів і загальний вигляд розрахованої сітки теплообмінника побічно-випарного типу із круглими каналами

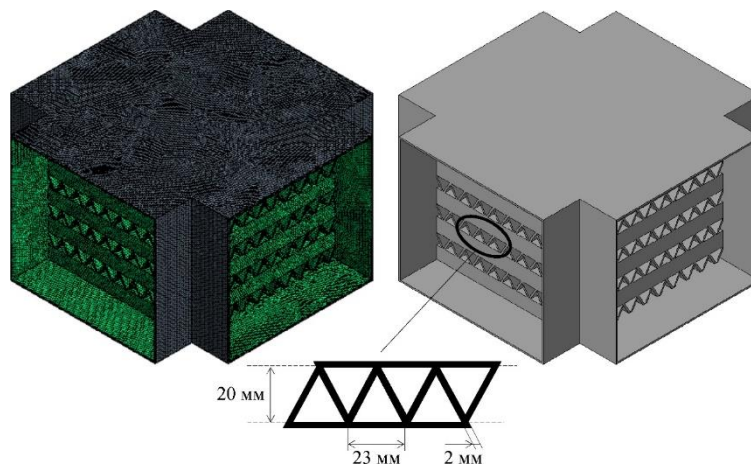


Рис. 4. Схема розташування каналів і загальний вигляд розрахованої сітки теплообмінника побічно-випарного типу із трикутними каналами

За фізичні моделі сухих і вологих каналів обрані такі: тривимірна, Ейлерова багатофазна модель, метод роздільної течії і об'ємної рідини VOF, модель фазової взаємодії, модель роздільної багатофазної температури. Потік течії підпорядковується рівнянню Нав'є-Стокса і k - ϵ -моделі турбулентності. Ейлерові фази були такі: повітря і вода. Фаза повітря підпорядковувалася моделям реального газу МАСВП-ПР97 (пар) і турбулентної течії. Фаза води підпорядковувалася моделям реального газу Ван-дер-Ваальса і турбулентної течії.



За фізичні моделі стінок теплообмінника обрані такі: тривимірна модель матеріалу твердого тіла, постійна щільність, модель енергії роздільного твердого тіла.

Фізико-механічні властивості усіх фаз моделювання зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості фаз моделювання

Властивість	Фаза повітря	Фаза води	Стінка
Динамічна в'язкість, Па·с	$1,85508 \cdot 10^{-5}$	$1,26765 \cdot 10^{-5}$	-
Молекулярна маса, кг/моль	28,9664	18,0153	-
Коефіцієнт теплопровідності, В/(м·К)	0,0260305	0,0253325	0,44
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	1003,62	1938,19	1700,0

Вирішувач обрано стаціонарний. Кількість внутрішніх інерцій дорівнювала 10.

Геометричні розміри теплообмінника побічно-випарного типу і граничні умови моделювання представлені на рис. 5. На вході в теплообмінник потік повітря дорівнював $Q_1 = Q_2 = 100 \text{ м}^3/\text{год}$, температура була $t_1 = 30 \text{ °C}$, $t_2 = 0 \text{ °C}$ абсолютна вологість - $x_1 = x_2 = 5 \text{ г/кг}$. Навколо теплообмінника встановлена теплоізоляція, тобто теплообмін з навколишнім середовищем не відбувається.

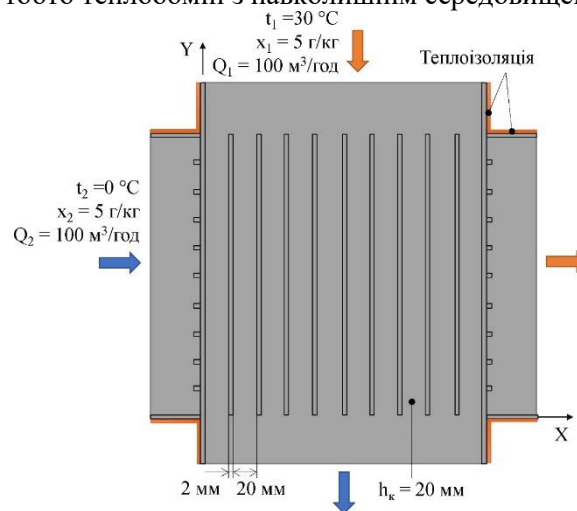


Рис. 5. Геометричні розміри теплообмінника побічно-випарного типу циклу і граничні умови моделювання

3. Мета та завдання дослідження

Метою досліджень є підвищення ефективності забезпечення нормативного мікроклімату тваринницьких приміщень шляхом застосування мехатронної системи керування процесом знезараження повітря за допомогою ультрафіолетового випромінювання бактерицидних ламп.

Поставлене завдання вирішується шляхом створення такої мехатронної системи забезпечення мікроклімату свинарських приміщень, в якій є можливість:

- переключати напрямки руху повітряного потоку для забезпечення роботи системи у зимовий і літній періоди;
- контролювати рух повітря, яке необхідно утилізувати за параметрами його якості (вмісту сірководню, вуглекислого газу і аміаку);
- забезпечувати локальний мікроклімат у кожному станку, де утримуються тварини;
- раціонально використовувати теплову енергію ґрунту, як джерело альтернативної енергії;
- проводити автоматичне підкачування води, необхідної для зволоження повітря, та її утилізації.

4. Виклад основного матеріалу

Для вирішення поставленої мети розроблено конструктивно-технологічну схему мехатронної системи забезпечення мікроклімату тваринницьких приміщень (рис. 6).

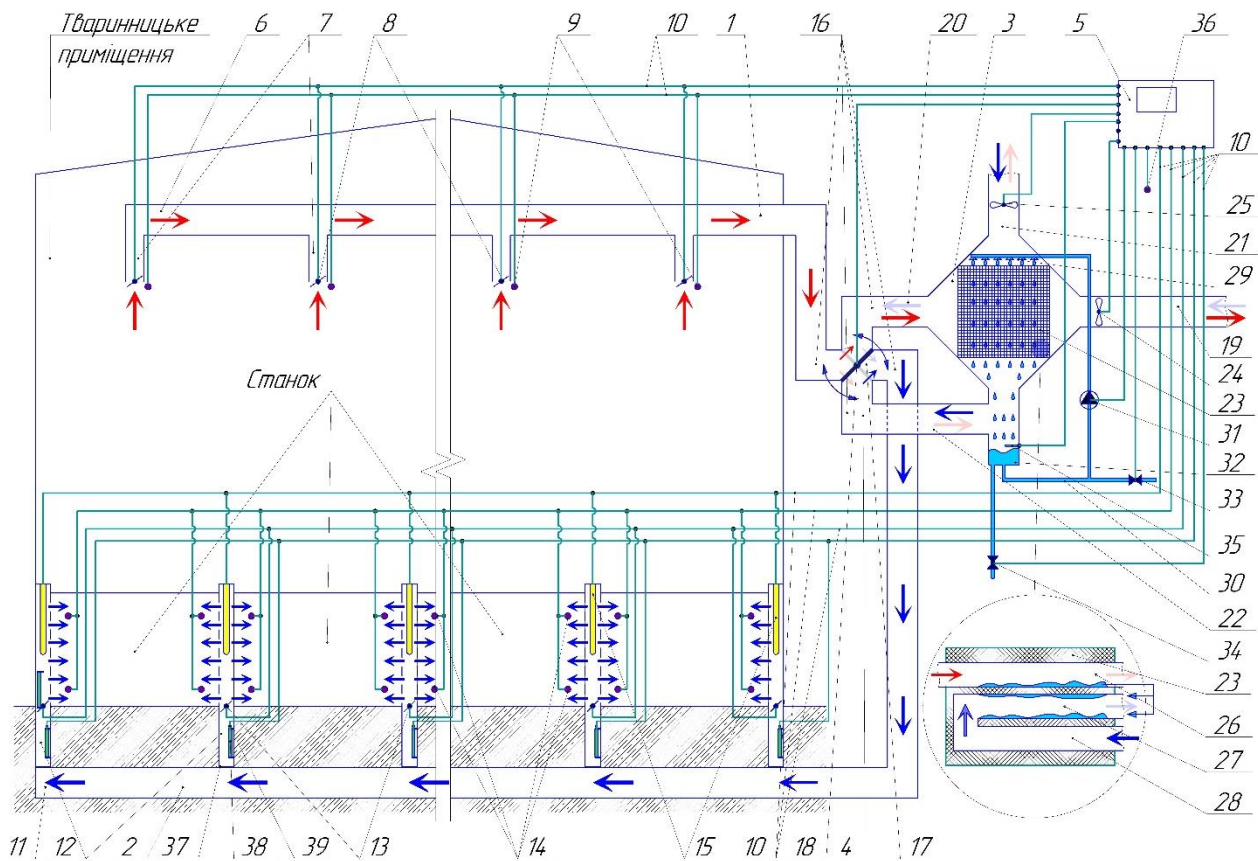


Рис 6. Конструктивно-технологічна схема мехатронної системи забезпечення мікроклімату свинарських приміщень:

1 – вентиляційна система забору забрудненого повітря; 2 – вентиляційна система нагнітання чистого повітря; 3 – повітряний теплообмінник побічно-випарного типу; 4 – чотириходовий клапан; 5 – блок керування; 6 – центральний повітропровід для забору повітря; 7 – патрубки для забору повітря; 8 – забірні заслінки з сервоприводами; 9 – датчики температури, вологості та якості повітря; 10 – засоби електричних проводів; 11 – центральний повітропровід для нагнітання повітря; 12 – патрубки для нагнітання повітря; 13 – нагнітальні заслінки з сервоприводами; 14 – датчики температури та вологості повітря; 15 – нагрівальні елементи; 16 – патрубки; 17 – центральна порожнина; 18 – обертова заслінка з сервоприводом; 19 – зовнішній патрубок для робочого повітря; 20 – внутрішній патрубок для робочого повітря; 21 – зовнішній патрубок для утилізованого повітря; 22 – внутрішній патрубок для утилізованого повітря; 23 – набір перехресних каналів; 24 – нагнітальний вентилятор; 25 – витяжний вентилятор; 26 – робочі канали; 27 – вологі канали; 28 – сухі канали; 29 – форсунки для подачі води; 30 – система трубопроводів; 31 – водяна помпа; 32 – резервуар для забору води; 33 – електромагнітний кран для доливання води; 34 – електромагнітний кран для зливання води; 35 – датчик рівня води; 36 – зовнішні датчики температури та вологості; 37 – пилові фільтри; 38 – бактерицидні лампи; 39 – датчик випромінювання

Мехатронна система забезпечення нормативного мікроклімату тваринницьких приміщень працює наступним чином. Оператор на блоці керування 5 встановлює задані діапазони значень параметрів локального мікроклімату (температури, вологості, швидкості потоку повітря) для кожного станка, де утримуються тварини. Також оператор на блоці керування 5 встановлює граничні значення якості повітря за вмістом сірководню, вуглекислого газу і аміаку. Далі відбувається запуск мехатронної системи забезпечення нормативного мікроклімату тваринницьких приміщень. Інформація щодо значень температури, вологості і якості повітря (вмісту сірководню, вуглекислого газу і аміаку) з датчиків температури, вологості та якості повітря 9, датчиків температури та вологості повітря 14, зовнішніх датчиків температури та вологості 36 по засобах електричних проводів 10 передається до блока керування 5. Ця інформація порівнюється між собою та з даними, які задав оператор.

Якщо задана температура оператором вища за температуру на зовнішній стороні



тваринницького приміщення (зимовий період), то блок керування передає сигнал до обертової заслінки з сервоприводом 18, яка встановлюється в таке положення, яке дозволяє з'єднати систему забору забрудненого повітря 1 із внутрішнім патрубком для робочого повітря 20 теплообмінника побічно-випарного типу 3. У свою чергу вентиляційна система нагнітання чистого повітря 2 з'єднується з внутрішнім патрубком для утилізованого повітря 22 теплообмінника побічно-випарного типу 3. Блок керування 5 запускає нагнітальний вентилятор 24 у напрямку подачі повітря з тваринницького приміщення на його зовнішню сторону, а витяжний вентилятор 25 у протилежному напрямку подачі повітря з зовнішньої сторони у тваринницьке приміщення.

У залежності від якості повітря над станками, що визначено з використанням датчиків температури, вологості та якості повітря 9 та граничних значень, які встановлені оператором, блок керування 5 по засобах електричних проводів передає сигнал до забірних заслінок із сервоприводами 8. Якщо виміряні значення якості повітря менші за граничні значення, які встановлені оператором, то забірні заслінки з сервоприводом 8 закриваються. В протилежному випадку забірні заслінки з сервоприводом 8 відкриваються на кут, який прямопорційний відповідній різниці значень якості повітря і граничних значень. Повітря засмоктується у патрубки для забору повітря 7 і формується у потік, який переміщується по центральному повітропроводу для забору повітря 6 системи забору забрудненого повітря 1. Далі потік повітря потрапляє до патрубків 16 і центральної порожнини 17 чотириходового клапана 4. Після цього потік повітря надходить до внутрішнього патрубка для робочого повітря 20 і далі до набору перехресних каналів 23 теплообмінника побічно-випарного типу 3. Цей потік повітря проходить крізь робочі канали 26, де охолоджується і зменшується вологість, утворюючи при цьому конденсат. Даний процес відбувається за рахунок теплообміну крізь стінки, які сполучають робочі канали 26 і вологі канали 27. Далі охолоджений потік повітря подається на зовнішню сторону тваринницького приміщення по зовнішньому патрубку для робочого повітря 19.

Одночасно з вищезазначеним, холодний сухий потік повітря з зовнішньої сторони тваринницького приміщення потрапляє до зовнішнього патрубка для утилізованого повітря 21. Далі холодний сухий потік повітря переміщується до набору перехресних каналів 23 теплообмінника побічно-випарного типу 3, де він продовжує свій рух спочатку по сухому каналу 28, а потім по вологому каналу 27. У сухому каналі 28 холодний сухий потік повітря нагрівається за рахунок теплообміну крізь стінки, які сполучають вологі канали 27 і сухі канали 28, а у вологому каналі 27 вже теплий сухий потік повітря збагачується вологою і продовжує нагріватися.

Зайва волога, під дією сили гравітації, стікає до низу у резервуар для забору води 32. У початковий момент часу блок керування 5 по засобах електричних проводів закриває електромагнітний кран для зливання води 34. Окрім цього блок керування 5 вмикає водяну помпу 31, яка відкачує зібрану воду з резервуара для забору води 32 і направляє її по системі трубопроводів 30 до форсунок для подачі води 29. Вода з форсунок для подачі води 29 омиває вологі канали 27. Рівень води в резервуарі для забору води 32 визначається з використанням датчика рівня 35, який по засобах електричних проводів 10 передає дану інформацію до блока керування 5. Якщо рівень води нижчий за заданий, то блок керування 5 відкриває електромагнітний кран для доливання води 33 і вода з системи водоспоживання тваринницького приміщення потрапляє до системи трубопроводів 30. У протилежному випадку блок керування 5 закриває електромагнітний кран для доливання води 33 та відкриває електромагнітний кран для зливання води 34 і вода з резервуару для забору води 32 надходить до системи видалення гною.

Теплий вологий потік повітря після вологих каналів 27 надходить до внутрішнього патрубка для утилізованого повітря 22, який сполучений з патрубками 16 і центральною порожниною 17 чотириходового клапана 4. Далі теплий вологий потік повітря потрапляє до центрального повітропроводу для нагнітання повітря 11 вентиляційної системи нагнітання чистого повітря 2, де через патрубки для нагнітання повітря 12, пройшовши пилові фільтри 37 і бактерицидні лампи 38, потрапляє у середину тваринницького приміщення безпосередньо в станки, в яких утримуються тварини. Наявність пилових фільтрів 37 і бактерицидних ламп 38 очищають і знезаражують припливне повітря. Враховуючи те, що центральний повітропровід для нагнітання повітря 11 знаходиться під підлогою нижче рівня промерзання ґрунту, то додатково відбувається процес геотермального нагрівання потоку теплового вологого повітря. У разі зниження інтенсивності ультрафіолетового випромінювання, яке фіксує датчик випромінювання 39, блок керування сигналізує про незадовільну роботу бактерицидних ламп 38.

Інформація з датчиків температури та вологості повітря 14 по засобах електричних проводів 10 надходить до блока керування 5, де порівнюється з заданими оператором параметрами локального мікроклімату у кожному станку окремо. У разі необхідності додаткового нагрівання потоку повітря в



певному станку блок керування 5 вмикає відповідний нагрівальний елемент 15 і повністю відкриває нагнітальну заслінку з сервоприводом 13. Якщо температура повітря вище або дорівнює необхідній, то блок керування 5 вмикає відповідний нагрівальний елемент 15 і частково закриває нагнітальну заслінку з сервоприводом 13. Ступінь закриття нагнітальної заслінки з сервоприводом 13 прямопропорційно залежить від різниці заданої і вимірної температури.

Розглянемо випадок, коли задана температура оператором нижча за температуру на зовнішній стороні тваринницького приміщення (літній період). Блок керування передає сигнал до обертової заслінки з сервоприводом 18, яка встановлюється в таке положення, яке дозволяє з'єднати систему забору забрудненого повітря 1 із внутрішнім патрубком для утилізованого повітря 22 теплообмінника побічно-випарного типу 3. У свою чергу вентиляційна система нагнітання чистого повітря 2 з'єднується з внутрішнім патрубком для робочого повітря 20 теплообмінника побічно-випарного типу 3. Блок керування 5 запускає нагнітальний вентилятор 24 у напрямку подачі повітря з зовнішньої сторони тваринницького приміщення в середину тваринницького приміщення, а витяжний вентилятор 25 - у протилежному напрямку подачі повітря з тваринницького приміщення на зовнішню його сторону.

У залежності від якості повітря над станками, що визначено з використанням датчиків температури, вологості та якості повітря 9 та граничних значень, які встановлені оператором, блок керування 5 по засобах електричних проводів передає сигнал до забірних заслінок із сервоприводами 8. Якщо вимірні значення якості повітря менші за граничні значення, які встановлені оператором, то забірні заслінки з сервоприводом 8 закриваються. В протилежному випадку забірні заслінки з сервоприводом 8 відкриваються на кут, який прямопропорційний відповідній різниці значень якості повітря і граничних значень. Повітря засмоктується у патрубки для забору повітря 7 і формується у потік, який переміщується по центральному повітропроводу для забору повітря 6 системи забору забрудненого повітря 1. Далі потік повітря потрапляє до патрубків 16 і центральної порожнини 17 чотириходового клапана 4. Після цього потік повітря надходить до внутрішнього патрубка для утилізованого повітря 22 і далі до набору перехресних каналів 23 теплообмінника побічно-випарного типу 3. Цей потік повітря проходить крізь сухий канал 28 і вологий канал 27, де він нагрівається за рахунок теплообміну крізь стінки, які сполучаються з робочим каналом 26. Далі потік повітря подається на зовнішню сторону тваринницького приміщення по зовнішньому патрубку для утилізованого повітря 21.

Одночасно з вищезазначеним, теплий сухий потік повітря з зовнішньої сторони тваринницького приміщення потрапляє до зовнішнього патрубка для робочого повітря 19. Далі теплий сухий потік повітря переміщується до набору перехресних каналів 23 теплообмінника побічно-випарного типу 3, де він продовжує рух по робочим каналам 26, де охолоджується і зменшується вологість, утворюючи при цьому конденсат. Даний процес відбувається за рахунок теплообміну крізь стінки, які сполучають робочі канали 26 і вологі канали 27.

Зайва волога, під дією сили гравітації, стікає до низу у резервуар для забору води 32. У початковий момент часу блок керування 5 по засобах електричних проводів закриває електромагнітний кран для зливання води 34. Окрім цього блок керування 5 вмикає водяну помпу 31, яка відкачує зібрану воду з резервуара для забору води 32 і направляє її по системі трубопроводів 30 до форсунок для подачі води 29. Вода з форсунок для подачі води 29 омиває вологі канали 27. Рівень води в резервуарі для забору води 32 визначається з використанням датчика рівня 35, який по засобах електричних проводів 10 передає дану інформацію до блока керування 5. Якщо рівень води нижчий за заданий, то блок керування 5 відкриває електромагнітний кран для доливання води 33 і вода з системи водоспоживання тваринницького приміщення потрапляє до системи трубопроводів 30. У протилежному випадку блок керування 5 закриває електромагнітний кран для доливання води 33 та відкриває електромагнітний кран для зливання води 34 і вода з резервуару для забору води 32 надходить до системи видалення гною.

Охолоджений вологий потік повітря після вологих каналів 27 надходить до внутрішнього патрубка для робочого повітря 20, який сполучений з патрубками 16 і центральною порожниною 17 чотириходового клапана 4. Далі охолоджений вологий потік повітря потрапляє до центрального повітропроводу для нагнітання повітря 11 вентиляційної системи нагнітання чистого повітря 2, де через патрубки для нагнітання повітря 12, пройшовши пилові фільтри 37 і бактерицидні лампи 38, потрапляє у середину тваринницького приміщення безпосередньо в станки, в яких утримуються тварини. Наявність пилових фільтрів 37 і бактерицидних ламп 38 очищають і знезаражують припливне повітря. Враховуючи те, що центральний повітропровід для нагнітання повітря 11 знаходиться під підлогою нижче рівня промерзання ґрунту, то додатково відбувається процес геотермального охолодження потоку охолодженого вологого повітря. У разі зниження інтенсивності



ультрафіолетового випромінювання, яке фіксує датчик випромінювання 39, блок керування сигналізує про незадовільну роботу бактерицидних ламп 38.

Інформація з датчиків температури та вологості повітря 14 по засобах електричних проводів 10 надходить до блока керування 5, де порівнюється з заданими оператором параметрами локального мікроклімату у кожному станку окремо. Блок керування 5 вимикає всі нагрівальні елементи 15. У початковий момент часу блок керування 5 повністю відкриває всі нагнітальні заслінки з сервоприводами 13. Якщо температура повітря нижче за необхідну у певному станку, то блок керування 5 частково закриває нагнітальну заслінку з сервоприводом 13. Ступінь закриття нагнітальної заслінки з сервоприводом 13 прямопропорційно залежить від різниці заданої і виміряної температури.

Перевага запропонованої мехатронної системи забезпечення нормативного мікроклімату тваринницьких приміщень полягає у тому, що вона дозволяє підвищити ефективність забезпечення нормативного мікроклімату тваринницьких приміщень шляхом застосування мехатронної системи керування процесом знезараження повітря за допомогою ультрафіолетового випромінювання бактерицидних ламп. Використання пилових фільтрів, бактерицидних ламп і датчиків випромінювання дозволяє виконувати технологічний процес знезараження повітря з використанням ультрафіолетового випромінювання в закритих приміщеннях за присутності людей і тварин із більш високою якістю, меншими енерговитратами та більш ефективним технічним обслуговуванням.

За результатами моделювання отримано розподіл температурного поля в теплообміннику із різною формою каналів (рис. 7-12). Для поперечного розподілу температурного поля характерне утворення циліндричного розподілу швидкості в середині каналу незалежно від його форми. В свою чергу поздовжній розподіл температурного поля в теплообміннику побічно-випарного показує взаємодію двох повітряних потоків, які за рахунок теплопровідності через стінки змінюють свою температуру.

Для каналів квадратної форми температура холодного потоку повітря в середньому змінюється від 0 °С до 10,3 °С, теплого повітря - від 30 °С до 17,7 °С. Коефіцієнт температурної ефективності теплообмінника із каналами квадратної форми складає $\eta_t = 0,84$.

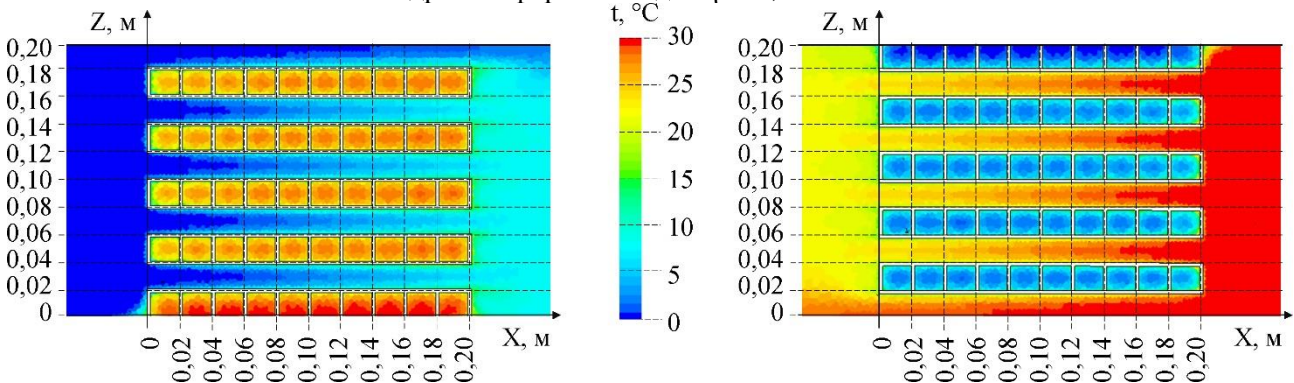


Рис. 7. Поперечний розподіл температурного поля в теплообміннику побічно-випарного із квадратними каналами

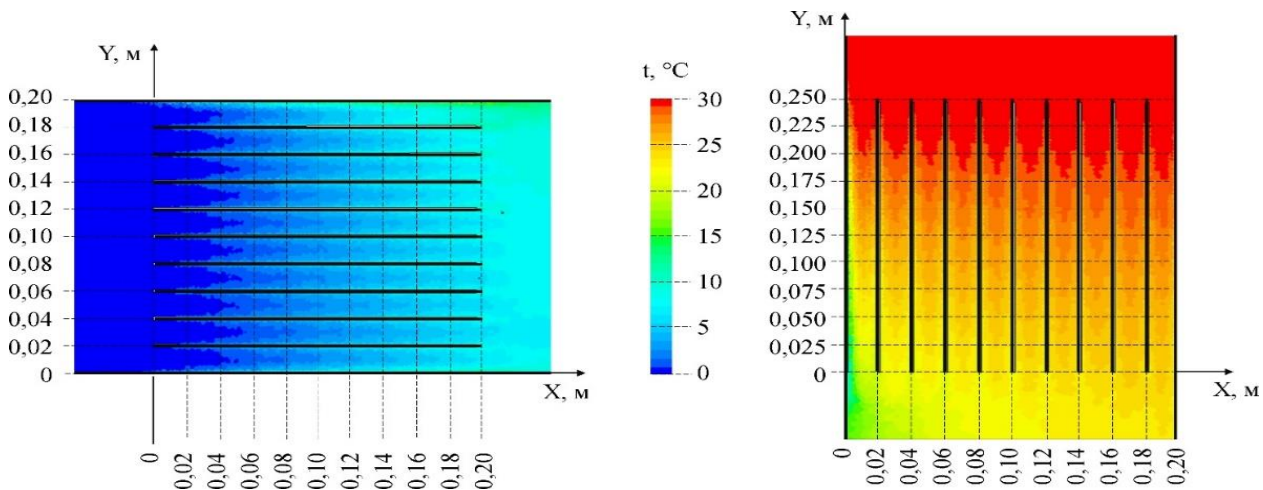


Рис. 8. Поздовжній розподіл температурного поля в теплообміннику побічно-випарного із квадратними каналами



Для каналів круглої форми температура холодного потоку повітря в середньому змінюється від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, теплового повітря - від $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $17,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнт температурної ефективності теплообмінника із каналами круглої форми складає $\eta_t = 0,73$.

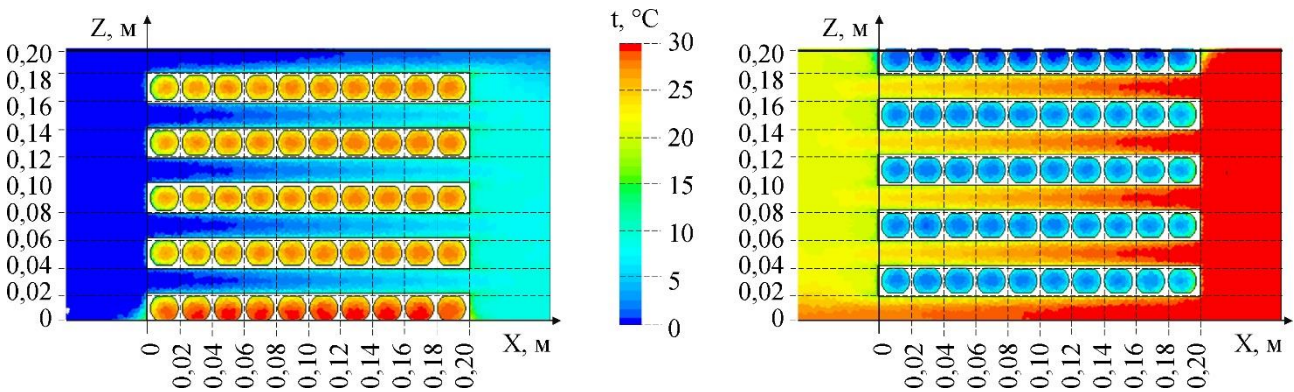


Рис. 9. Поперечний розподіл температурного поля в теплообміннику побічно-випарного із круглими каналами

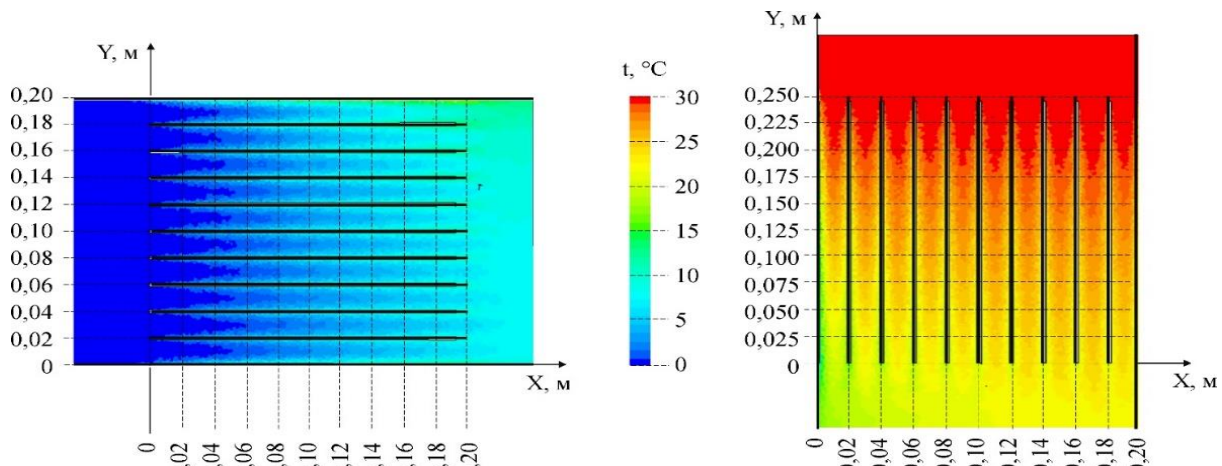


Рис. 10. Повздовжній розподіл температурного поля в теплообміннику побічно-випарного із круглими каналами

Для каналів трикутної форми температура холодного потоку повітря в середньому змінюється від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, теплового повітря - від $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $18,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнт температурної ефективності теплообмінника із каналами трикутної форми складає $\eta_t = 0,97$.

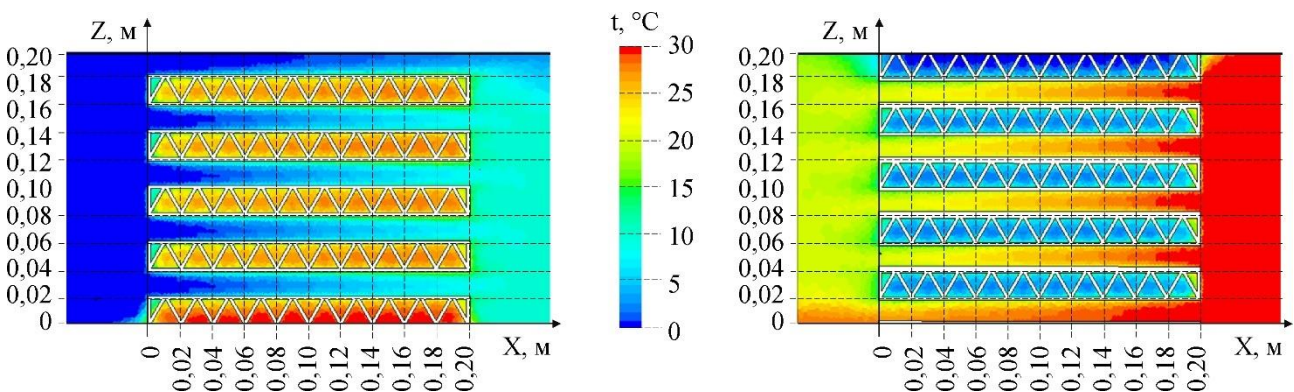


Рис. 11. Поперечний розподіл температурного поля в теплообміннику побічно-випарного із трикутними каналами

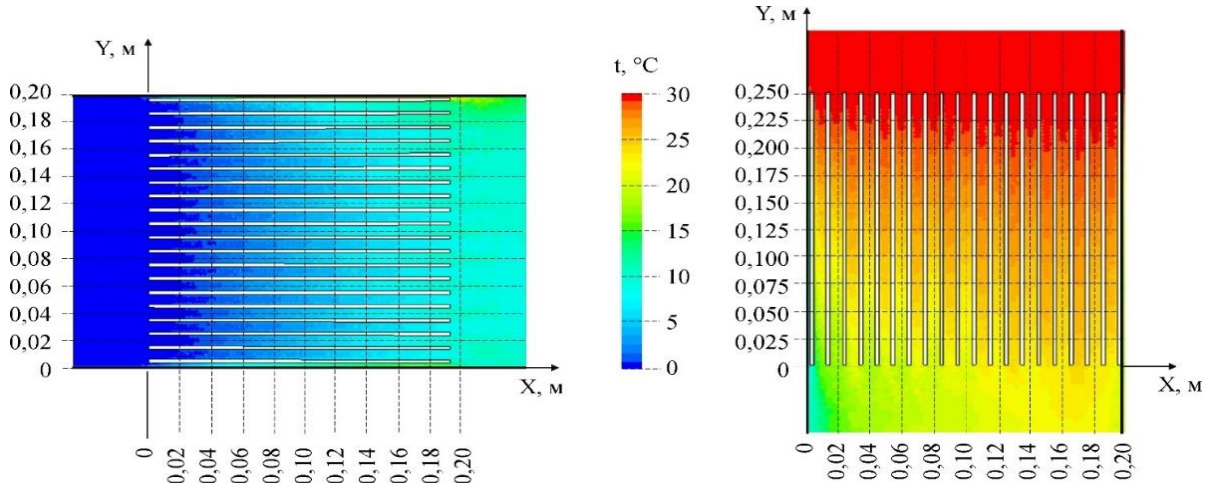


Рис. 12. Повздовжній розподіл температурного поля в теплообміннику побічно-випарного із трикутними каналами

Для візуалізації процесу переміщення повітряного потоку по каналах теплообмінника побудоване векторне поле швидкостей (рис. 13 – 15). Порівнюючи між собою розподіли повітряного потоку по всіх каналах в залежності від їх форми, можна зробити висновок, що для каналів трикутної форми спостерігається більш рівномірний потік повітря по всій площі поперечного перерізу. Середня швидкість при цьому дорівнює $V = 0,042$ м/с, а коефіцієнт її варіації $\delta_v = 0,88$. Водночас, для каналів квадратної форми – $V = 0,039$ м/с, а коефіцієнт варіації $\delta_v = 0,84$, а для каналів круглої форми – $V = 0,046$ м/с, а коефіцієнт варіації $\delta_v = 0,81$.

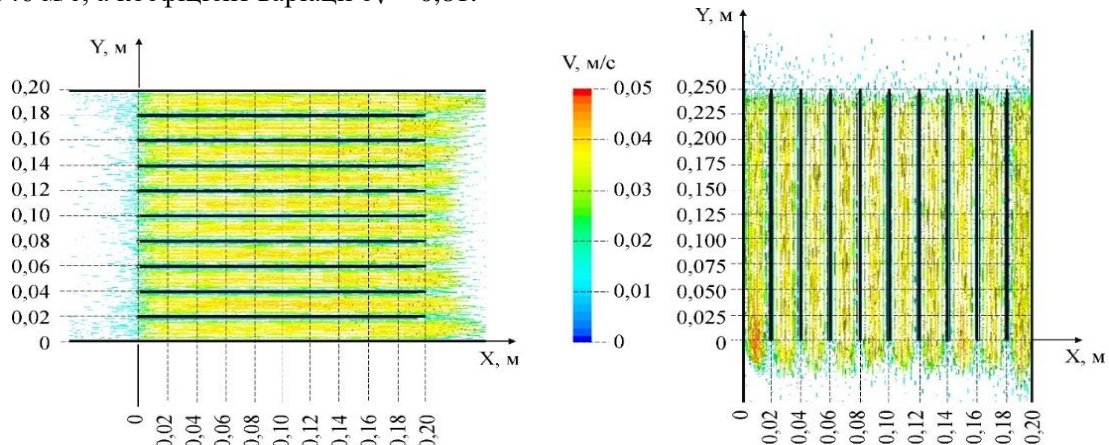


Рис. 13. Розподіл векторного поля швидкостей в теплообміннику побічно-випарного типу із квадратними каналами

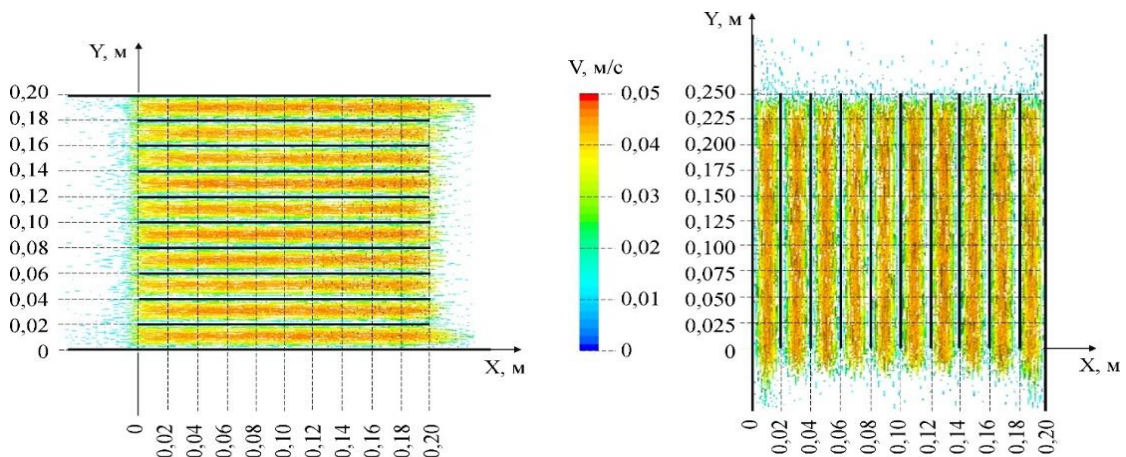


Рис. 14. Розподіл векторного поля швидкостей в теплообміннику побічно-випарного типу із круглими каналами

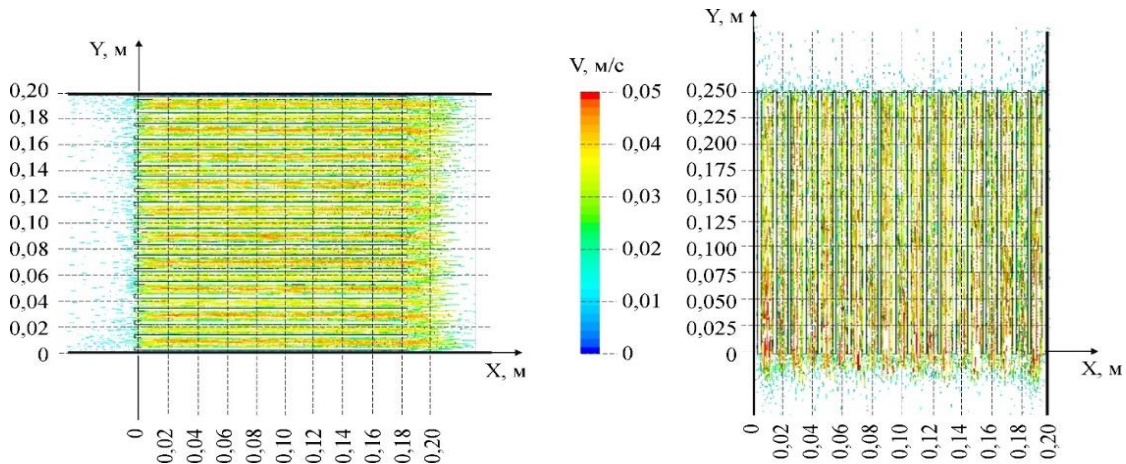
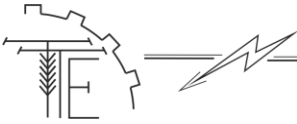


Рис. 15. Розподіл векторного поля швидкостей в теплообміннику побічно-випарного типу із трикутними каналами

Зміна вологості потоку повітря під час його руху представлена на рис. 16-18. У процесі руху теплового повітряного потоку спостерігається значне зменшення абсолютної вологості практично до 0,01 г/кг. Це пояснюється явищем конденсації. Так, холодне повітря охолоджує стінки теплообмінника. В свою чергу, під час руху теплового повітря, волога яка міститься в потоці перетворюється на рідину та осідає на холодних стінках теплообмінника. Це явище призводить до зменшення абсолютної вологості теплового повітря.

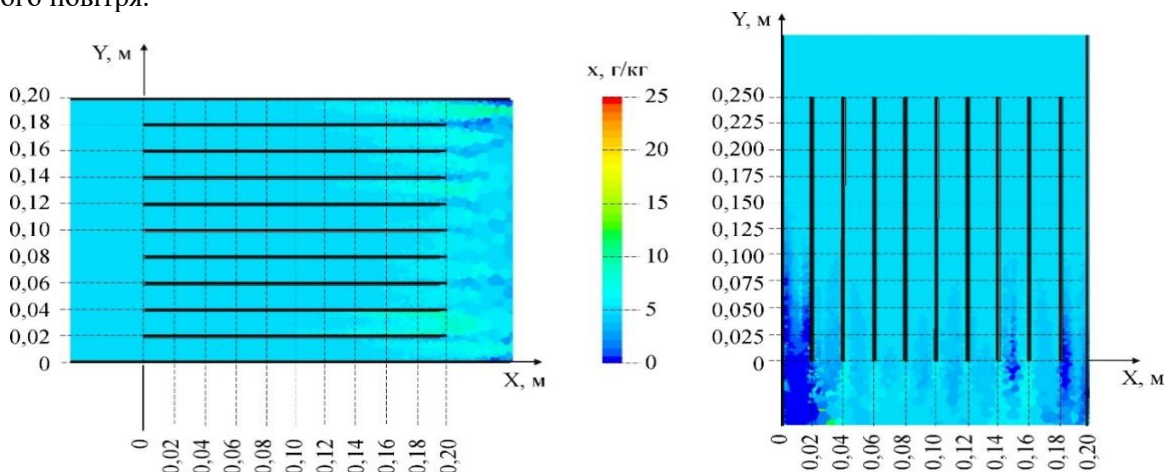


Рис. 16. Розподіл абсолютної вологості повітря в теплообміннику побічно-випарного типу із квадратними каналами

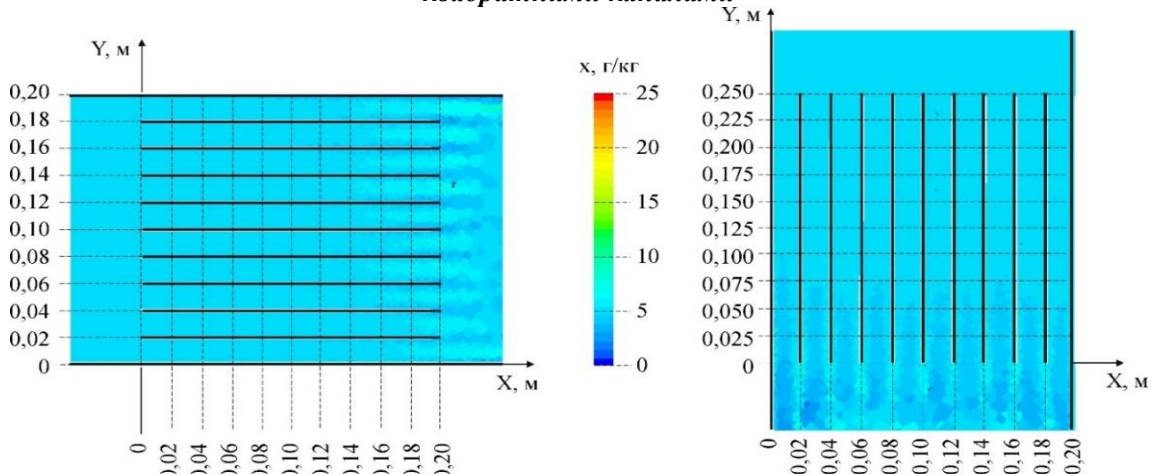


Рис. 17. Розподіл абсолютної вологості повітря в теплообміннику побічно-випарного типу із круглими каналами

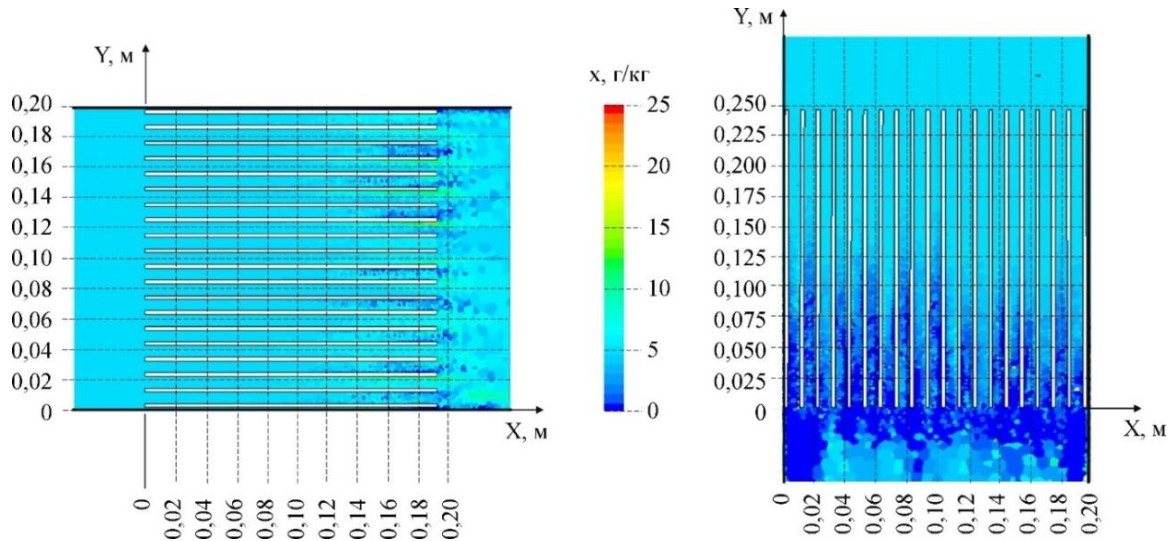


Рис. 18. Розподіл абсолютної вологості повітря в теплообміннику побічно-випарного типу із трикутними каналами

Порівнюючи розподіл вологості у каналах різної форми можна стверджувати, що зменшення абсолютної вологості потоку теплового повітря відбувається раніше у теплообміннику побічно-випарного типу із трикутними каналами. Про це свідчать дані представлені на рисунку 18.

5. Висновки та перспективи подальших досліджень

Розроблена конструктивно-технологічна схема мехатронної системи забезпечення нормативного мікроклімату тваринницьких приміщень дозволяє підвищити ефективність забезпечення нормативного мікроклімату тваринницьких приміщень шляхом застосування мехатронної системи керування процесом знезараження повітря за допомогою ультрафіолетового випромінювання бактерицидних ламп. Використання пилових фільтрів, бактерицидних ламп і датчиків випромінювання дозволяє виконувати технологічний процес знезараження повітря з використанням ультрафіолетового випромінювання в закритих приміщеннях за присутності людей і тварин із більш високою якістю, меншими енерговитратами та більш ефективним технічним обслуговуванням.

За результатами чисельного моделювання повітряного теплообмінника побічно-випарного типу в програмному пакеті Star CCM+ встановлено розподіл температурного поля, векторного поля швидкостей і абсолютної вологості повітря в каналах різної форми (квадрат, рівносторонній трикутник, коло).

Розрахований коефіцієнт температурної ефективності теплообмінника із каналами трикутної форми є найбільшим $\eta_t = 0,97$ на відміну від квадратної ($\eta_t = 0,84$) і круглої ($\eta_t = 0,73$) форм.

Середня швидкість потоку повітря в каналах трикутної форми дорівнює $V = 0,042$ м/с, а коефіцієнт її варіації $\delta_v = 0,88$. В свою чергу для каналів квадратної форми - $V = 0,039$ м/с, коефіцієнт варіації $\delta_v = 0,84$, для каналів круглої форми - $V = 0,046$ м/с, коефіцієнт варіації $\delta_v = 0,81$.

Порівняльний аналіз розподілу вологості у каналах різної форми підтверджує те, що зменшення абсолютної вологості потоку теплового повітря з 0,05 г/кг до 0,01 г/кг відбувається раніше у теплообміннику побічно-випарного типу із трикутними каналами.

Список використаних джерел

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. [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2019-4\(104\)-10](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2019-4(104)-10)
2. Калетнік Г. М., Лутковська С. М. Екологічна модернізація та органічне виробництво в системі екологічної безпеки: монографія. Вінн. нац. аграр. ун-т. Вінниця: ВНАУ, 2022. 356 с.
3. 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.



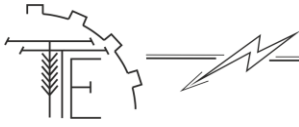
4. Braun M. B., Dunmire K. M., Evans C. E., Stark C. R., Woodworth J. C, Paulk C. B. Evaluation of conditioning temperature and die specifications on nursery pig performance. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*. 2020. № 6 (10). P. 1–10. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.8009>
5. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Фізико-математична модель вентиляційної системи нагнітання чистого повітря у тваринницьких приміщеннях. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 3 (114). С. 4–15. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-3-1>
6. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Теоретичні дослідження пневмовтрат повітряного теплообмінника побічно-випарного типу тваринницьких приміщень. *Machinery & Energetics*. 2021. Вип. 12. № 4. С. 35–41. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.04.035>
7. Schauburger G., Piringer M., Petz E. Steady-state balance model to calculate the indoor climate of livestock buildings, demonstrated for finishing pigs. *Int. J. Biometeorol.* 2000, Vol. 43, P. 154–162. <https://doi.org/10.1007/s004840050002>
8. Волощук В. М., Гладій М. В., Іванов В. О., Засуха Л. В. Автоматизована система забезпечення оптимального мікроклімату у тваринницьких приміщеннях: пат. 129759 Україна: МПК (2018.01) A01K 1/02 (2006.01), F24F 3/00, F24F 3/044 (2006.01), F24F 7/08 (2006.01) № u 2018 05185; заявл. 11.05.2018; опубл. 12.11.2018, бюл. № 21.
9. Фрііс П. Е. Система вентиляційних каналів і спосіб мінімізації забруднення повітря усередині і/або навколо споруди для утримання тварин: пат. 102567 Україна: МПК (2013.01) A01K 1/00 № u 2011 06462; заявл. 24.11.2009; опубл. 25.07.2013, бюл. № 14.
10. Буюджи Д. І., Майсоценко В. С., Цибенко В. В., Буюджи О. Д., Дражня О. Ю., Козюренко О. Ю. Установка випарного охолодження повітря: пат. 144887 Україна: МПК F24F 3/14 (2006.01) № u 2020 03908; заявл. 30.06.2020; опубл. 26.10.2020, бюл. № 20.
11. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Мехатронна система забезпечення мікроклімату тваринницьких приміщень: пат. 148970 Україна: МПК A01K 1/00, F24F 3/00, F24F 3/044, F24F 3/14, F24F 6/12, F24F 7/007 № u 202102133; заявл. 22.04.2021; опубл. 05.10.2021, бюл. № 40.
12. Yaropud V. Analytical study of the automatic ventilation system for the intake of polluted air from the pigsty. *Scientific horizons*. 2021. Vol. 24, № 3. P. 19–27. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(3\).2021.19-27](https://doi.org/10.48077/scihor.24(3).2021.19-27)
13. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Симуляція процесу тепломасообміну теплообмінника побічно-випарного типу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 4–15.
14. Kaletnik H., Yaropud V. Research of pressure losses and justification of forms of side-evaporative heat exchangers channels in livestock premises. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99, № 7. P. 247–252. DOI: 10.15199/48.2023.07.46
15. Hasan A. Going below the wet bulb temperature by indirect evaporative cooling: Analysis using a modified ϵ -NTU method. *Applied Energy*. 2012. № 89. P. 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.005>
16. Федорець О. О., Саленко О. Ф. Гідравліка, гідро- та пневмопривод: підручник. 2-ге вид., переробл. і допов. Київ: Знання, 2009. 502 с.
17. СОУ 74.3-37-265-2005. Техніка сільськогосподарська. Рекуперативні теплоутилізатори вентиляційних викидів тваринницьких приміщень. Методи випробувань. Затверджено та введено в дію 01.08.2006. Мінагрополітики України, 2006. 37 с.
18. ДСТУ 2921-94. Агрегати опалювально-вентиляційні. Методи випробувань. Затверджено та введено в дію 01.01.1996. Державний комітет стандартизації метрології та сертифікації України, 1996. 42 с.

References

- [1] Kaletnik, G.M. (2019). Perspektyvy pidvyshchennya enerhetychnoyi avtonomiyi pidpryyemstv APK v ramkakh vykonannya enerhetychnoyi stratehiyi Ukrayiny [Prospects for increasing the energy autonomy of agricultural enterprises in the framework of the energy strategy of Ukraine]. *Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Region*. Vol. 4. P. 90-98. [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2019-4\(104\)-10](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2019-4(104)-10) [in Ukrainian].
- [2] Kaletnik, G.M., Lutkovska, S.M. (2022). Ekolohichna modernizatsiya ta orhanichne vyrobnytstvo v systemi ekolohichnoyi bezpeky: monohrafiya [Ecological modernization and organic production in the system of environmental security: monograph]. Vinn. nats. agrar. un-t. Vinnytsia: VNAU. 356 p. [in Ukrainian].



- [3] Samokhina, YE.A., Povod, M.H., Mylostyvyi, R.V. (2018). Microclimate parameters in piggery premises in summer under different ventilation systems and their influence on the productivity of lactating sows and the growth of suckling piglets [*Parametry mikroklimatu v svynars'kykh prymishchennyakh vlitku za riznykh system ventylyatsiyi ta yikhniy vplyv na produktyvnist' laktuyuchykh svynomatok i rist pidsysnykh porosyat*]. *Bulletin of the Sumy National Agrarian University. Series: Animal husbandry*. Vol. 2. P. 218–223. [in Ukrainian].
- [4] Braun, M.B., Dunmire, K.M., Evans, C.E., Stark, C.R., Woodworth, J.C, Paulk, C.B. (2020). Evaluation of conditioning temperature and die specifications on nursery pig performance. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*. № 6 (10). P. 1–10. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.8009>. [in English].
- [5] Kaletnik, H.M., Yaropud, V.M. (2021). Fyzyko-matematychna model' ventylyatsiynoyi systemy nahnitannya chystoho povitrya u tvarynnyts'kykh prymishchennyakh [*Physico-mathematical model of the ventilation system for injecting clean air in livestock premises*]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. № 3 (114). P. 4–15. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-3-1> [in Ukrainian].
- [6] Kaletnik, G.M., Yaropud, V.M. (2021). Theoretical studies of pneumatic losses of the air heat exchanger of the indirect-evaporative type of livestock premises [*Teoretychni doslidzhennya pnevmovtrat povitryanoho teploobminnyka pobichno-vyparnoho typu tvarynnyts'kykh prymishchen'*]. *Machinery & Energetics*. Vyp. 12. № 4. P. 35–41. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.04.035> [in Ukrainian].
- [7] Schauburger, G., Piringer, M., Petz, E. (2000). Steady-state balance model to calculate the indoor climate of livestock buildings, demonstrated for finishing pigs. *Int. J. Biometeorol.* Vol. 43, P. 154–162. <https://doi.org/10.1007/s004840050002> [in English].
- [8] Voloshchuk, V.M., Gladiy, M.V., Ivanov, V.O., Zasukha, L.V. (2018). Automated system for ensuring optimal microclimate in livestock premises: pat. 129759 Ukraine: IPC (2018.01) A01K 1/02 (2006.01), F24F 3/00, F24F 3/044 (2006.01), F24F 7/08 (2006.01) № u 2018 05185; stat. 11.05.2018; publ. 12.11.2018, bull. № 21. [in Ukrainian].
- [9] Friis, P.E. (2013). A system of ventilation ducts and a method of minimizing air pollution inside and/or around the facility for keeping animals: pat. 102567 Ukraine: IPC (2013.01) A01K 1/00 № u 2011 06462; stat. 24.11.2009; publ. 25.07.2013, bull. № 14. [in Ukrainian].
- [10] Buyadzhi, D.I., Maisotsenko, V.S., Cybenko, V.V., Buyadzhi, O.D., Drakhnia, O.Yu., Kozyurenko, O.Yu.. (2020). Installation of evaporative air cooling: pat. 144887 Ukraine: IPC F24F 3/14 (2006.01) № u 2020 03908; stat. 30.06.2020; publ. 26.10.2020, bull. № 20. [in Ukrainian].
- [11] Kaletnik, G.M., Yaropud, V.M. (2021). Mechatronic system of microclimate provision of livestock premises: pat. 148970 Ukraine: IPC A01K 1/00, F24F 3/00, F24F 3/044, F24F 3/14, F24F 6/12, F24F 7/007 № u 2021 02133; stat. 22.04.2021; publ. 05.10.2021, bull. № 40. [in Ukrainian].
- [12] Yaropud, V. (2021). Analytical study of the automatic ventilation system for the intake of polluted air from the pigsty. *Scientific horizons*. Vol. 24, № 3. P. 19–27. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(3\).2021.19-27](https://doi.org/10.48077/scihor.24(3).2021.19-27) [in English].
- [13] Kaletnik, G.M., Yaropud, V.M. (2022). Simulation of the heat and mass transfer process of the indirect-evaporative type heat exchanger [*Symulyatsiya protsesu teplomasoobminu teploobminnyka pobichno-vyparnoho typu*]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. № 1 (116). P. 4–15. [in Ukrainian].
- [14] Kaletnik, H., Yaropud, V. (2023). Research of pressure losses and justification of forms of side-evaporative heat exchangers channels in livestock premises. *Przegląd Elektrotechniczny*. Vol. 99, № 7. P. 247–252. DOI: 10.15199/48.2023.07.46 [in English].
- [15] Hasan, A. (2012). Going below the wet bulb temperature by indirect evaporative cooling: Analysis using a modified ϵ -NTU method. *Applied Energy*. № 89. P. 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.005> [in English].
- [16] Fedorets, O.O., Salenko, O.F. (2009). Hydraulics, hydraulic and pneumatic drive: textbook. 2nd ed., revision. and added Kyiv: Knowledge. 502 p. [in Ukrainian].
- [17] SOU 74.3-37-265-2005. (2006). Agricultural machinery. Regenerative heat utilizers of ventilation emissions of livestock premises. Test methods. Approved and put into effect on August 1, 2006. Ministry of Agrarian Policy of Ukraine. 37 p. [in Ukrainian].
- [18] DSTU 2921-94. (1996). Heating and ventilation units. Test methods. Approved and put into effect on 01.01.1996. State Committee for Standardization of Metrology and Certification of Ukraine. 42 p. [in Ukrainian].

**STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE FUNCTIONING PROCESS OF THE MECHATRONIC SYSTEM OF ENSURING THE MICROCLIMATE OF ANIMAL PREMISES**

The development of the livestock industry is the basis of Ukraine's food security. One of the ways to solve this problem is to improve the conditions of keeping animals, including improving the microclimate of livestock and poultry premises. Modern animal husbandry technologies make high demands on the microclimate in livestock premises. According to scientists, animal husbandry specialists and technologists, animal productivity is determined by 50...60% feed, 15...20% by care, and 10...30% by the microclimate in the livestock premises. Deviation of the microclimate parameters from the established optimal limits leads to a decrease in milk yield by 10...20%, an increase in live weight – by 20...35%, an increase in the departure of young animals to 5...40%, and a decrease in laying hens – by 30%...35%, costs of an additional amount of feed, shortening the service life of equipment, machines and the buildings themselves, reducing the resistance of animals to diseases, negatively affecting the service personnel.

The article presents a structural and technological scheme of a mechatronic system for ensuring a normative microclimate of livestock premises, which allows to increase the efficiency of ensuring a normative microclimate of livestock premises by using a mechatronic system for controlling the process of air disinfection using ultraviolet radiation of bactericidal lamps. According to the results of numerical modeling of the air heat exchanger of the indirect-evaporative type, the distribution of the temperature field, vector field of velocities and absolute air humidity in channels of different shapes (square, equilateral triangle, circle) was established. The calculated coefficient of thermal efficiency of the heat exchanger with triangular shaped channels is the whitest in contrast to square and round shapes. A comparative analysis of humidity distribution in channels of different shapes confirms that the absolute humidity of the thermal air flow decreases earlier in the indirect-evaporative type heat exchanger with triangular channels.

Key words: *microclimate, air, humidity, temperature, cooling, mechatronic system, heat exchanger, parameters, numerical modeling, dependencies, livestock premises.*

F. 6. Table. 1. Fig. 18. Ref. 18.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

ЯРОПУД Віталій Миколайович – кандидат 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, <https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).

Vitalii YAROPUD – Candidate 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, <https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).