

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3

Вібрації в техніці та технологіях

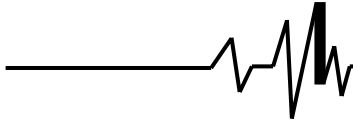


Всеукраїнський науково-технічний журнал
Ukrainian Scientific & Technical Journal

Вібрації в техніці та технологіях

№ 3 (106)

Вінниця 2022

**ВІБРАЦІЇ В
ТЕХНІЦІ ТА
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального
спрямування Видавець: Вінницький національний
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та
технологіях”

*Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової
інформації*

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

*Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та
технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця,
2022. – 3 (106) – 87 с.*

*Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного
університету (протокол № 6 від 23.12.2022 р.)*

*Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань
України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки
України від 02.07.2020 р. № 886)*

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., професор,
академік НААН України, Вінницький
національний аграрний університет

**Заступник головного
редактора**

Адамчук В.В. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Національний науковий
центр “Інститут механізації та електрифікації
сільського господарства”

Відповідальний секретар

Солона О.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Національний університет
біоресурсів і природокористування України

Граняк В.Ф. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Деревенько І. А. – к.т.н., доцент,
Національний університет «Львівська
політехніка»

Зіньковський А.П. – д.т.н., професор,
Інститут проблем міцності імені Г. С.
Писаренка НАН України

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Матвєєв В.В. – д.ф.-м.н., професор,
академік НАН, Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Севостьянов І.В. – д.т.н., професор,
Вінницький національний аграрний
університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Цуркан О.В. – д.т.н. доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

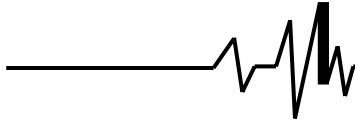
Максімов Джордан Тодоров – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

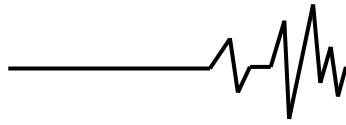
Технічний редактор **Мельничук С.В.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/>

Електронна адреса: vibration.vin@ukr.net

**З М І С Т****1. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН***Калетнік Г.М., Яропуд В.М.***РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ У ВЕНТИЛЯЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ТВАРИНИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ5***Севостьянов І.В.***РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОСУШАРКИ ДЛЯ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРНИХ ВІДХОДІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ13***Котов Б.І., Степаненко С.П., Грушецький С.М., Грищенко В.О.***МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНА ЗА ГУСТИНОЮ В КОМБІНОВАНОМУ ВІБРОПНЕВМАТИЧНОМУ ТА ПОВІТРЯНО-ГРАВІТАЦІЙНОМУ АГРЕГАТІ22***Коруняк П.С., Шеремета Р.Б., Швець О.П., Березовецький С.А.***ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ ВІБРАЦІЙНИЙ ПЕРЕСУВНИЙ ПРИСТРІЙ29***Швець О.П., Коруняк П.С., Баранович С.М., Березовецький С.А.***ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО СЕПАРАТОРА36***Остапенко Ж.І.***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ В АКУСТИЧНОМУ ЕКСТРАКТІ44****2. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Веселовська Н.Р., Богатюк.***ВПЛИВ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕЩОДАВНО ВИГОТОВЛЕНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АL, ОТРИМАНИХ ТРАДИЦІЙНИМ ПРОЦЕСОМ ЛИТТЯ49***Шаргородський С.А., Руткевич В.С., Ящук Є.О.***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОПРИВОДА ПЕРЕВЕДЕННЯ ШИРОКОЗАХВАТНОГО СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО АГРЕГАТУ ІЗ ТРАНСПОРТНОГО ПОЛОЖЕННЯ У РОБОЧЕ54***Гайдамак О.Л., Кучеренко Ю.С.***ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ64***Солона О.В., Мельник О.С.***МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ МІНЕРАЛЬНОГО ЖИВЛЕННЯ РОСЛИН В ЗАКРИТОМУ ҐРУНТІ72****3. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА***Солона О.В., Замрій М.А.***ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШАРКИ НАСІННИКІВ ТРАВ78**

**Калетнік Г.М.**академік НААН України, д.е.н.,
професор**Яропуд В.М.**

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Kaletnik G.**Academician of NAAS of Ukraine,
Doctor of Economic Sciences,
Professor**Yaropud V.**

Ph.D., Associate Professor

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 636.4:636.083.3****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3-1****РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ
ГЕОТЕРМАЛЬНОГО
ОХОЛОДЖЕННЯ У ВЕНТИЛЯЦІЙНІЙ
СИСТЕМІ ТВАРИННИЦЬКИХ
ПРИМІЩЕНЬ**

Мікроклімат тваринницьких приміщень визначається сукупністю фізичних, хімічних і біологічних параметрів всередині приміщення для утримання тварин та характеризується такими параметрами: температурою повітря, внутрішніх поверхонь стін, стелі, підлоги, вікон, дверей, та інших внутрішніх конструкцій; вологістю повітря, внутрішніх поверхонь стін, стелі, підлоги, вікон, дверей, та інших внутрішніх конструкцій; швидкістю і напрямком повітряних потоків у місцях розташування тварин, гнойових, припливних та витяжних каналів, вікон і дверей; газовим складом повітря – концентрацією вуглекислого газу, аміаку, сірководню, окису вуглецю; наявністю пилу та мікроорганізмів у повітрі; інтенсивністю природнього і штучного освітлення; оптичним випромінюванням; рівнем виробничого шуму, ступенем іонізації повітря.

Сучасні системи створення мікроклімату включають підсистеми: система вентиляції - забезпечує регулювання газового складу та частково температури повітря (у літній період) в приміщенні; системи кондиціювання та опалення - забезпечують регулювання температури повітря в приміщенні. Нині у тваринництві використовуються різні способи охолодження припливного повітря, які можна розділити на пароконпресійні охолоджувальні установки (спліт-системи) та системи водовипарного охолодження. Однак додаткове охолодження нагнітаючого повітря у тваринницьке приміщення (свинарник) можна отримати з використанням геотермального ефекту. Метою досліджень є обґрунтування доцільності геотермального процесу охолодження у вентиляційній системі нагнітання чистого повітря у свинарниках. За результатами досліджень узагальнено фізико-математичний апарат геотермального процесу нагрівання у вентиляційній системі нагнітання чистого повітря, який базується на рівняннях безперервності повітряного потоку, рівняннях Нав'є-Стокса, рівняннях теплопередачі, початкових і граничних умовах. Наведено результати верифікації чисельного моделювання геотермального процесу нагрівання у вентиляційній системі нагнітання чистого повітря в програмному пакеті Star CCM+. За результатами моделювання отримано розподіл температурного поля і векторного поля швидкостей повітряного потоку у вентиляційній системі нагнітання чистого повітря і доведено доцільність геотермального процесу охолодження.

Ключові слова: мікроклімат, вентиляція, повітря, потік, нагнітання, моделювання, теплопередача, тваринницьке приміщення, свинарник.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Відомо, що повітря у вентильованому приміщенні ніколи не буває однорідним. Існують зони різних кліматичних умов, особливо в густонаселеному свинарнику з високою внутрішньою теплопродукцією. Поблизу входу свіжого повітря температура і концентрація забруднюючих речовин будуть відносно низькими. Поруч із джерелами тепла та забруднювачами (тварини, гній) як температура, так і концентрації забруднювачів будуть вищими. Схема повітряного потоку в кімнаті визначає температуру та розподіл забруднень у приміщенні та пов'язана з наявністю кліматичних зон [5].

Кліматичні зони у свинарнику - це зона, де працівник виконує свою роботу (умови роботи), і зона, де живуть тварини: зона перебування тварин. Зона перебування тварин - це приблизно зона від 0 до 50 см над підлогою [6]. Здатність створювати та підтримувати оптимальний клімат в зоні перебування тварин є, ймовірно, найважливішим аспектом роботи системи вентиляції. Незважаючи на те, що цей фактор дуже важливий, дуже мало відомо про особливості кліматичних умов, яким піддаються поросята, коли їх переміщують у приміщеннях з різними системами вентиляції.

Сучасні системи створення мікроклімату включають підсистеми: система вентиляції - забезпечує регулювання газового складу та частково температури повітря (у літній період) в приміщенні; системи кондиціювання 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 [7]. 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 [8, 9]. 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) [10].

Нині у тваринництві використовуються різні способи охолодження припливного повітря, які можна розділити на парокompресійні охолоджувальні установки (спліт-системи) і системи водовипарного охолодження. Останні, у свою чергу, діють на системи розпилення води з використанням ежекцій, відцентрових сил, форсунок, ультразвуку та системи із зрошуваними шарами.

Однак додаткове охолодження нагнітаючого повітря в тваринницьке приміщення можна отримати з використанням геотермального ефекту.

Мета і завдання досліджень. Метою досліджень є обґрунтування доцільності геотермального процесу охолодження у вентиляційній системі нагнітання чистого повітря у свинарниках.

Матеріали і методи досліджень. Вентиляційна система нагнітання чистого повітря (рис. 1) у кожному станку містить патрубки для нагнітання повітря із встановленими нагнітальними заслінками із сервоприводами.

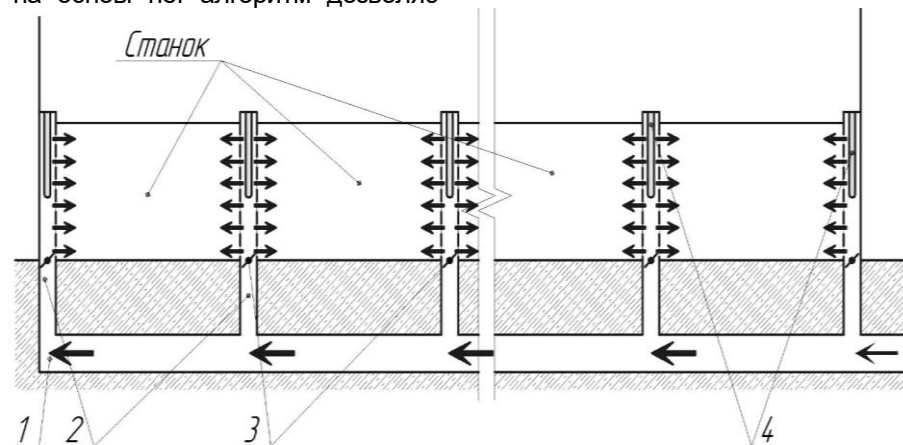
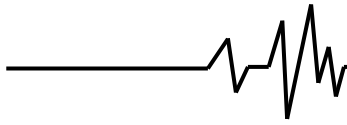


Рис. 1. Технологічна схема вентиляційної системи нагнітання чистого повітря

1 - центральний повітропровід для нагнітання повітря; 2 - патрубки для нагнітання повітря;

3 - нагнітальні заслінки із сервоприводами; 4 - нагрівальні елементи



Чисельне моделювання проведено з використанням програмного пакету Star CCM+, який застосовує метод просторової дискретизації для використання методу кінцевого об'єму з розрахунком невідомих комірок у центрах. Щоб зменшити кількість елементів сітки кінцевих елементів і заощадити обчислювальні ресурси використовувалася площа симетрії вздовж вертикальної площини.

В якості моделей для сітки континуума було обрано: 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. Загальний вигляд розрахованої сітки і конструктивно-технологічні параметри вентиляційної системи нагнітання чистого повітря наведено на рис. 2.

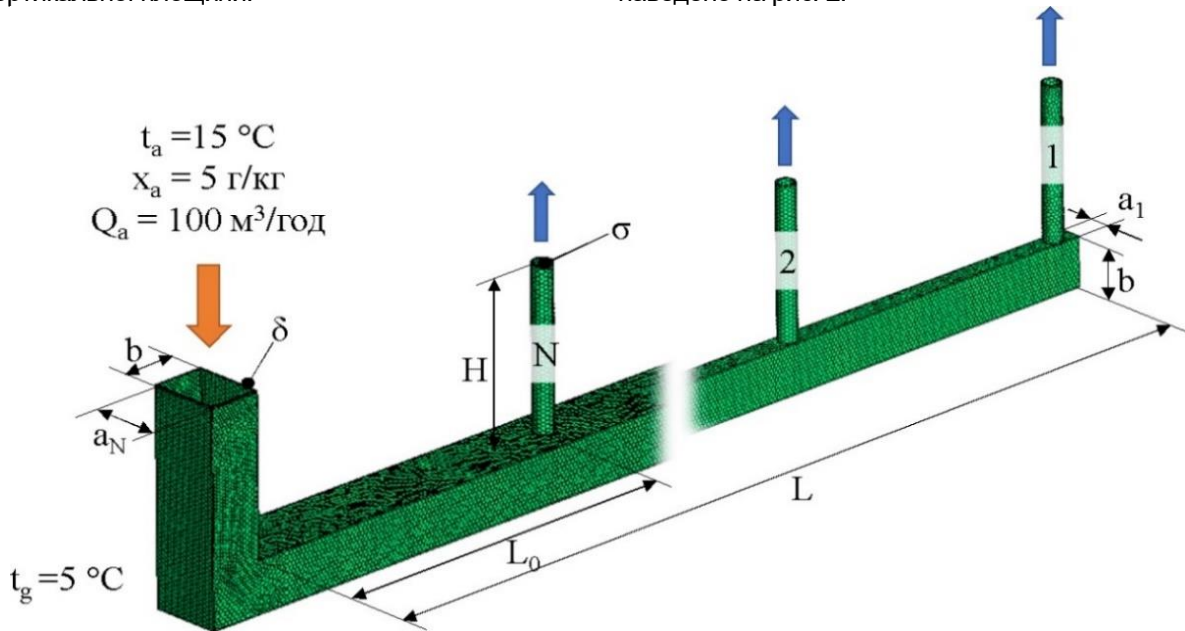


Рис. 2. Загальний вигляд розрахованої сітки і конструктивно-технологічні параметри вентиляційної системи нагнітання чистого повітря

За фізичні моделі повітря 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 вентиляційної системи нагнітання чистого повітря обрані такі: тривимірна модель матеріалу твердого тіла, постійна щільність, модель енергії роздільного твердого тіла.

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

Фізико-механічні властивості всіх фаз моделювання зведені до таблиць 1-2.

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

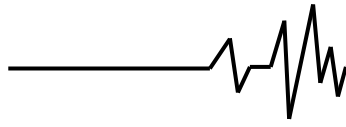
Таблиця 2.

Фізико-механічні властивості ґрунту

Властивість	ґрунт
Коефіцієнт теплопровідності, В/(м·К)	0,46
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	1590,0

Вирішувач обрано нестационарний неявний. Кількість внутрішніх ітерцій дорівнює

10. Загальний час моделювання - 10^5 с.



Результати досліджень.

Розрахункова схема вентиляційної системи нагнітання чистого повітря, яка виконує функцію горизонтального ґрунтового теплообмінника [11] наведена на рис. 3. Прямокутна система координат обрана таким чином, що вісь OX

спрямована вздовж горизонту і паралельна осі горизонтального перерізу теплообмінника, вісь OY спрямована перпендикулярно до площини фігури, вісь OZ спрямована вертикально вниз.

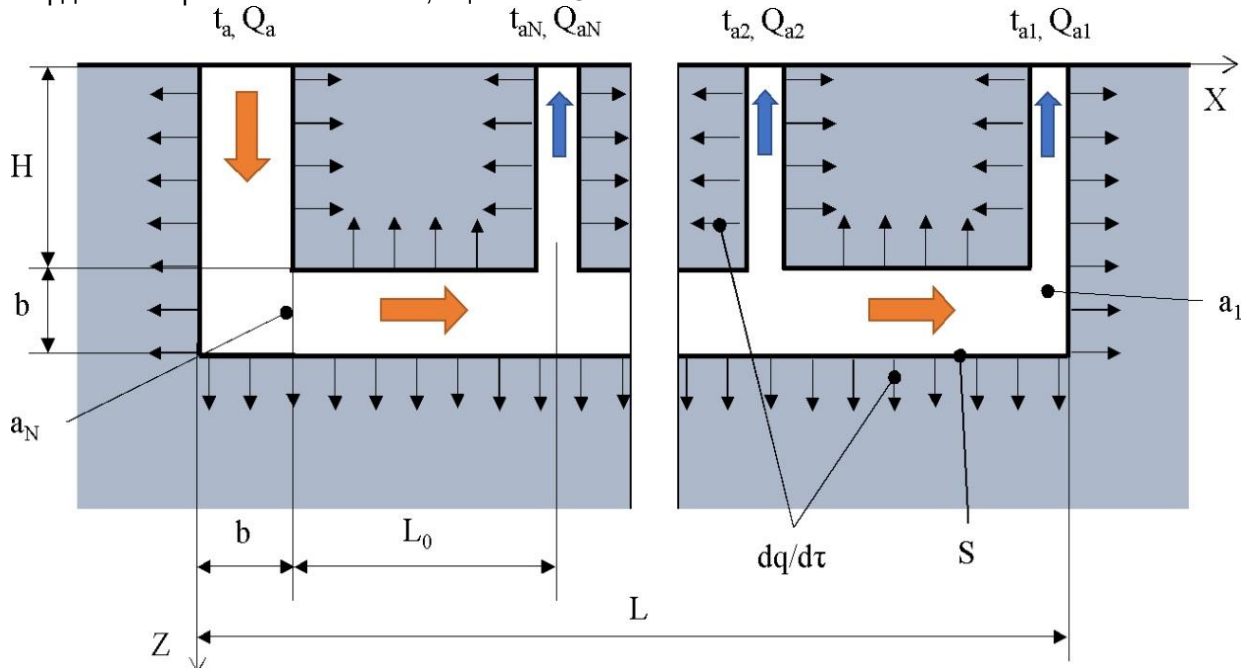


Рис. 3. Розрахункова схема вентиляційної системи нагнітання чистого повітря, яка виконує функцію горизонтального ґрунтового теплообмінника

Приймаємо такі припущення [12]:

- ґрунт однорідний та ізотропний, а його теплофізичні властивості залишаються незмінними при зміні температури;
- тепловий контакт стінки вентиляційної системи з навколишнім ґрунтом є ідеальний;
- через незначну зміну тиску повітряного потоку під час його руху у вентиляційній системі повітря розглядається як рідина, яка не стискається.

Теплота, яка протікає через поверхню вентиляційної системи S у заданий момент часу τ можна представити за формулою [13]

$$\frac{dq}{d\tau} = -\lambda_s \int_S \frac{\partial t_s}{\partial n} dS, \quad (1)$$

де $t_s(x,y,z,\tau)$ - температура в точці ґрунту, яка має координати (x,y,z) у момент часу τ , °C.

Рух повітря в цьому випадку описується рівняннями Нав'є-Стокса, яке набуває вигляду для прямокутної координати

Початкові умови [16, 17]

$$\begin{cases} t_s(x, y, z, 0) = t_{s0}(z), & (x, y, z) \in M_s, \\ t_{a1}(x, y, z, 0) = \dots = t_{aN}(x, y, z, 0) = \dots = t_{a0}(z), & (x, y, z) \in M_a. \end{cases} \quad (4)$$

Граничні умови

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{\partial \tau} &= \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u, \\ \rho \frac{Dv}{\partial \tau} &= \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v, \end{aligned} \quad (2)$$

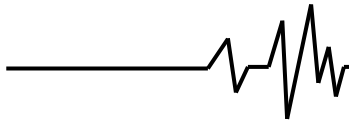
$$\rho \frac{Dw}{\partial \tau} = \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w,$$

$$(x, y, z) \in M_{air}.$$

Температурне поле в рухомому потоці повітря описується рівнянням енергії [14, 15]

$$\frac{Dt_a}{\partial \tau} = a_a \nabla^2 t_a, \quad (x, y, z) \in M_a, \quad (3)$$

де $t_a(x,y,z,\tau)$ - температура повітря в точці повітря, яка має координати (x,y,z) у момент часу τ , °C.



$$\begin{cases} t_{a1}(x, y, 0, \tau) = \dots = t_{aN}(x, y, 0, \tau) = \dots = t_1(x, y), & (x, y, z) \in M_a, \\ t_s(x, y, 0, \tau) = f(\tau), & (x, y, z) \in M_a. \end{cases} \quad (5)$$

де $t_s(x, y, 0, \tau)$ - функція, яка визначає температуру на поверхні ґрунту та залежить від природно-кліматичних умов [18]:

$$t_s(z, \tau) = A_t e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{a_g \Theta}}} \sin \left(\frac{2\pi}{\Theta} \tau - z \sqrt{\frac{\pi}{a_g \Theta}} \right) + \varphi(z) \quad (6)$$

де A_t - амплітуда температури поверхні ґрунту (при $z = 0$), °С;

a_g - теплопровідність ґрунту, $\text{м}^2 \cdot \text{місяць}^{-1}$;

Θ - цикл амплітуди, $\Theta = 12$ місяців;

$\varphi(z)$ - функція, що описує розподіл температури в ґрунті з глибиною у початковий момент часу, за яким можна розрахувати радіогенний тепловий потік Землі.

За результатами моделювання

отримано розподіл температурного поля у вентиляційній системі нагнітання чистого повітря (рис. 4). З рис. 4 видно, що температура повітряного потоку, який переміщується вздовж 40 м вентиляційної системи зменшується з 15 °С до 12,3 °С. Тобто за рахунок геотермального ефекту повітря додатково охолоджується на 2,7 °С, що в перерахунку на ефективну теплову енергію складає 618 Вт.

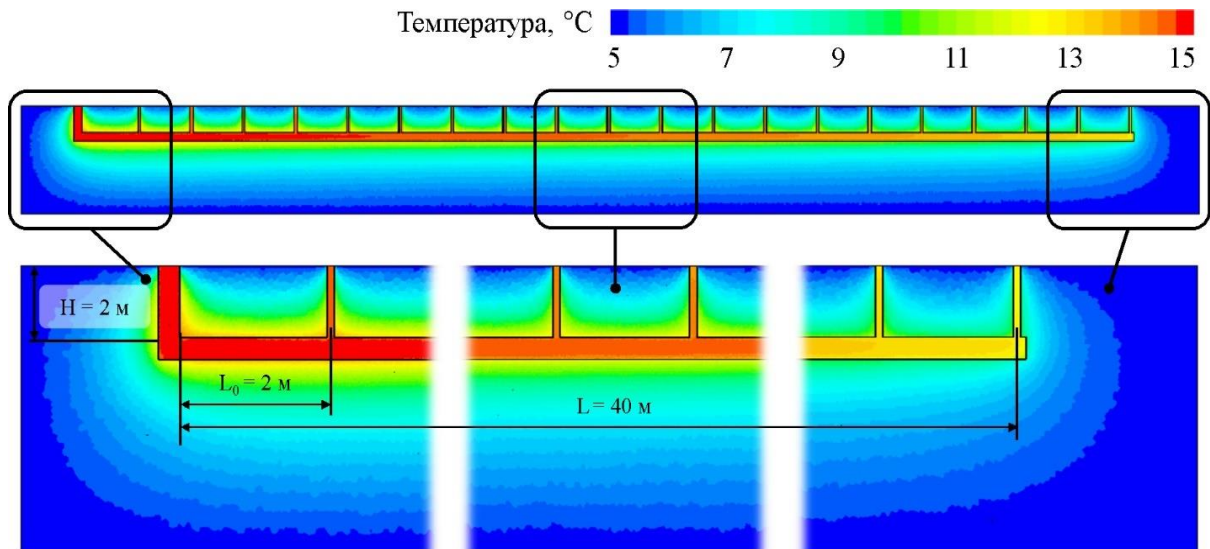


Рис. 4. Розподіл температурного поля у вентиляційній системі нагнітання чистого повітря

За результатами моделювання нагнітання (рис. 5) отримано розподіл векторного поля швидкостей повітряного потоку у вентиляційній системі

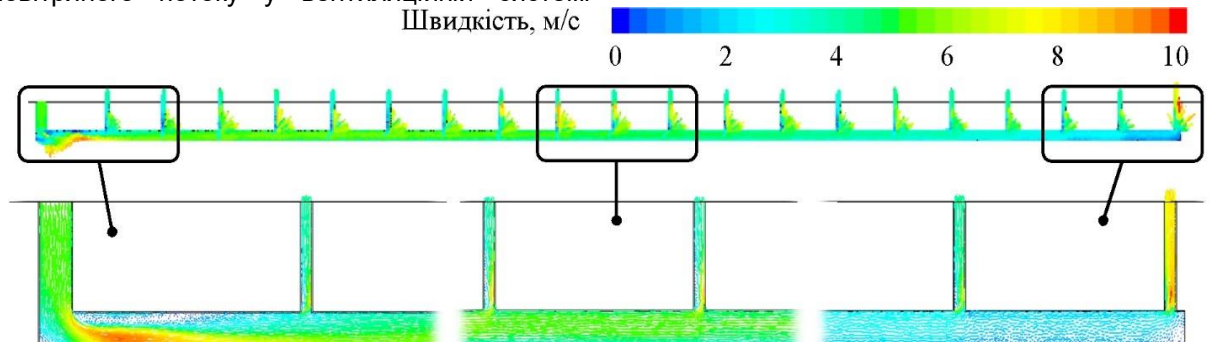


Рис. 5. Розподіл векторного поля швидкостей повітряного потоку у вентиляційній системі нагнітання



Аналіз рис. 5 показує, що швидкість повітря при виході з нагнітальних патрубків вентиляційної системи складає $4,5 \pm 0,4$ м/с і є практично однаковою для всіх патрубків (коефіцієнт варіації - 0,94). Тобто запропонована аналітична фізико-математична модель є адекватною.

Висновки. Узагальнено фізико-математичний апарат геотермального процесу нагрівання у вентиляційній системі нагнітання чистого повітря, який базується на рівняннях безперервності повітряного потоку, рівняннях Нав'є-Стокса, рівняннях теплопередачі, початкових і граничних умовах.

Наведено результати верифікації чисельного моделювання геотермального процесу нагрівання у вентиляційній системі нагнітання чистого повітря в програмному пакеті Star CCM+. За результатами моделювання отримано розподіл температурного поля і векторного поля швидкостей повітряного потоку у вентиляційній системі нагнітання чистого повітря і доведено доцільність геотермального процесу охолодження.

Список використаних джерел

1. Калетнік Г.М. Перспективи підвищення енергетичної автономії підприємств АПК в рамках виконання енергетичної стратегії України. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. Вип. 4, 2019. С. 90–98.

2. Державна служба статистики. Економічна статистика. Економічна діяльність. Сільське, лісове та рибне господарство. <https://ukrstat.gov.ua/>

3. Ревенко І.І., Брагінець М.В., Заболотько О.О. Машини та обладнання для тваринництва. Посібник-практикум. 2-ге вид. Київ: Кондор, 2012. 562 с.

4. Відомчі норми технологічного проектування. Свилярські підприємства. ВНТП-АПК-02.05. Міністерство аграрної політики України (Мінагрополітики України), 2005.

5. Puma M. C., Maghirang R. G., Hosni M. H., Hagen L. Modeling of dust concentration distribution in a simulated swine room under non-isothermal conditions. *Trans.* 1999. *ASAE* 42(6): 1823–1832.

6. Heber A. J., Ni J. Q., Haymore B. L., Duggirala R. K., Keener K. M. Air quality and emission measurement methodology at swine finishing buildings. *Trans.*, 2001. *ASAE* 44(6): 1765–1778.

7. Yaropud V. Analytical study of the automatic ventilation system for the intake of polluted air from the pigsty. *Scientific horizons*. Vol. 24. No. 3, 2021. P. 19–27. DOI: 10.48077/scihor.24(3).2021.19-27

8. 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.

9. Калетнік Г.М., Яропуд В.М. Симуляція процесу тепломасообміну теплообмінника побічно-випарного типу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 4–15.

10. Калетнік Г.М., Яропуд В.М. Теоретичні дослідження пневмовтрат повітряного теплообмінника побічно-випарного типу тваринницьких приміщень. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Київ. Вип. 12. № 4. 2021. С. 35–41.

11. Soni S.K., Pandey M., Bartaria V.N. Ground coupled heat exchangers: a review and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 47, 2015. P. 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.014>.

12. Koviazin A.S., Velichko I.G. Influence of the material and casing wall thickness of a ground heat exchanger on energy extraction rate. *Herald of national University «Lviv Polytechnic» «Power system. Engineering the environment. Automation»*, Vol. 758, 2013. P. 57–62.

13. Benli H. A Performance comparison between a horizontal source and vertical source heat pump system for a greenhouse heating in the mild climate elazig, Turkey. *Applied Thermal Engineering*, 1(50), 2013. P. 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.005>

14. Koviazin A.S. The rationale for the thickness of the thermal insulation the inner tube of ground heat exchanger. *Herald of aeroenginebuilding*, Vol. 1, 2017. P. 19–24.

15. Larwa B., Kupiec K., Komorowicz T., Gwadera M., Teper M. Modelling of heat transfer in ground heat exchangers. *Technical transactions: Mechanics*, 1-M/2016, 2016. P. 141–150.

16. Mironov R.E., Shtern Yu.I., Shtern M.Yu., Rogachev M.S. (2016). A heat transfer model of a horizontal ground heat exchanger. *AIP Conference Proceedings*, 1727, 020015. <https://doi.org/10.1063/1.4945970>

17. Sivasakthivel T., Murugesan K., Sahoo P.K. Optimization of ground heat exchanger parameters of ground source heat pump system for space heating applications. *energy*, Vol. 78, 2014. P. 573–586.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.045>

18. Shevchenko I., Kovyazin A., Kamiński J.R., Szeptycki A. Simulation of thermal field in soil. *Problemy inżynierii rolniczej*, Vol. 1(95), 2017. P. 57–65.

References

1. Kaletnik H.M. Perspektyvy pidvyshchennya enerhetychnoyi avtonomiyi



pidpryemstv APK v ramkakh vykonannya enerhetychnoyi stratehiyi Ukrayiny. [Prospects for increasing the energy autonomy of agro-industrial complex enterprises within the framework of the implementation of the energy strategy of Ukraine] Visnyk ahrarynoi nauky Prychornomor'ya. Vyp. 4, 2019. S. 90–98. [in Ukrainian]

2. Derzhavna sluzhba statystyky. Ekonomichna statystyka. Ekonomichna diyal'nist'. [State Statistics Service. Economic statistics. Economic activity]. Sil'ske, lisove ta rybne hospodarstvo. <https://ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian]

3. Revenko I.I., Brahinet's M.V., Zabolot'ko O.O. Mashyny ta obladnannya dlya tvarynnystva [Machinery and equipment for animal husbandry]. Posibnyk-praktykum. 2-he vyd. Kyiv: Kondor, 2012. 562 s. [in Ukrainian]

4. Vidomchi normy tekhnolohichnoho proektuvannya. Svyarns'ki pidpryemstva. VNTP-APK-02.05 [Departmental norms of technological design. Pig farms. VNTP-APK-02.05]. Ministerstvo ahrarynoi polityky Ukrayiny (Minahropolityky Ukrayiny), 2005. [in Ukrainian]

5. Puma M. C., Maghirang R. G., Hosni M. H., Hagen L. Modeling of dust concentration distribution in a simulated swine room under non-isothermal conditions. Trans. 1999. ASAE 42(6): 1823–1832. [in English]

6. Heber A. J., Ni J. Q., Haymore B. L., Duggirala R. K., Keener K. M. [Air quality and emission measurement methodology at swine finishing buildings]. Trans., 2001. ASAE 44(6): 1765–1778. [in English]

7. Yaropud V. Analytical study of the automatic ventilation system for the intake of polluted air from the pigsty. Scientific horizons. Vol. 24. No. 3, 2021. P. 19–27. DOI: 10.48077/scihor.24(3).2021.19-27. [in English]

8. Kaletnik H.M., Yaropud V.M. Fyzyko-matematychna model' ventylyatsiyanoi 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. 2021. №3 (114). S. 4–15. [in Ukrainian]

9. Kaletnik H.M., Yaropud V.M. 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. 2022. № 1 (116). S. 4–15. [in Ukrainian]

10. Kaletnik H.M., Yaropud V.M. 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. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Vyp. 12. № 4. 2021. S. 35–41. [in

Ukrainian]

11. Soni S.K., Pandey M., Bacteria V.N. Ground coupled heat exchangers: a review and applications. Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 47, 2015. P. 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.014>. [in English]

12. Koviazin A.S., Velichko I.G. Influence of the material and casing wall thickness of a ground heat exchanger on energy extraction rate. Herald of national University «Lviv Polytechnic» «Power system. Engineering the environment. Automation», Vol. 758, 2013. P. 57–62. [in English]

13. Benli H. A Performance comparison between a horizontal source and vertical source heat pump system for a greenhouse heating in the mild climate elazig, Turkey. Applied Thermal Engineering, 1(50), 2013. P. 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.005>. [in English]

14. Koviazin A.S. The rationale for the thickness of the thermal insulation the inner tube of ground heat exchanger. Herald of aeroenginebuilding, Vol. 1, 2017. P. 19–24. [in English]

15. Larwa B., Kupiec K., Komorowicz T., Gwadera M., Teper M. Modelling of heat transfer in ground heat exchangers. Technical transactions: Mechanics, 1-M/2016, 2016. P. 141–150. [in English]

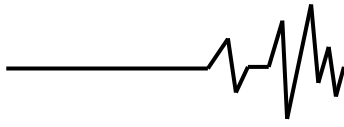
16. Mironov R.E., Shtern Yu.I., Shtern M.Yu., Rogachev M.S. (2016). A heat transfer model of a horizontal ground heat exchanger. AIP Conference Proceedings, 1727, 020015. <https://doi.org/10.1063/1.4945970> [in English]

17. Sivasakthivel T., Murugesan K., Sahoo P.K. Optimization of ground heat exchanger parameters of ground source heat pump system for space heating applications. energy, Vol. 78, 2014. P. 573–586. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.045> [in English]

18. Shevchenko I., Kovyazin A., Kamiński J.R., Szeptycki A. Simulation of thermal field in soil. Problemy inżynierii rolniczej, Vol. 1(95), 2017. P. 57–65. [in English]

RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF GEOTHERMAL COOLING IN THE VENTILATION SYSTEM OF ANIMAL PREMISES

The microclimate of livestock premises is determined by a set of physical, chemical and biological parameters inside the premises for keeping animals and is characterized by the following parameters: air temperature, internal surfaces of walls, ceilings, floors, windows, doors, and other internal structures; humidity of air, internal surfaces of walls, ceiling, floor, windows, doors, and other internal structures; the speed and direction of air flows in the locations of animals, manure, inflow



and exhaust channels, windows and doors; the gas composition of the air - the concentration of carbon dioxide, ammonia, hydrogen sulfide, carbon monoxide; the presence of dust and microorganisms in the air; the intensity of natural and artificial lighting; optical radiation; the level of industrial noise, the degree of air ionization.

Modern microclimate creation systems include subsystems: ventilation system - provides regulation of the gas composition and partly the air temperature (in the summer) in the room; air conditioning and heating systems - provide air temperature regulation in the room. Currently, various methods of cooling supply air are used in pig farming and can be divided into two types: vapor compression cooling units, so-called split systems and water evaporative cooling systems. However, additional cooling of the forced air into the pig house can be obtained using the geothermal effect. The purpose of the research is to substantiate the

expediency of the geothermal cooling process in the ventilation system for injecting clean air in piggery premises. As a result of research, the physico-mathematical apparatus of the geothermal heating process in the fresh air injection ventilation system, which is based on the equations of continuity of air flow, Navier-Stokes equations, heat transfer equations, initial and boundary conditions, is generalized. The results of the verification of the numerical modeling of the geothermal heating process in the ventilation system of clean air injection in the Star CCM+ software package are given. As a result of the simulation, the distribution of the temperature field and the vector field of air flow velocities in the ventilation system for injecting clean air was obtained, and the feasibility of the geothermal cooling process was proven.

Key words: microclimate, ventilation, air, flow, injection, modeling, heat transfer, piggery room.

Відомості про авторів

Калетнік Григорій Миколайович – академік НААН України, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри адміністративного менеджменту та альтернативних джерел енергії Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008). ORCID **0000-0002-4848-2796**

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). ORCID 0000-0003-0502-1356

Kaletnik Grigori – academician of the NAAS of Ukraine, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Administrative Management and Alternative Energy Sources of Vinnitsa National Agrarian University (Soniachna Str., 3, Vinnitsa, Ukraine, 21008). ORCID **0000-0002-4848-2796**

Yaropud Vitalii - 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). ORCID 0000-0003-0502-1356