

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ГІДРОАЕРОМЕХАНІКИ І МЕХАНОТРОНІКИ

«На правах рукопису»
УДК 62-522.2

До захисту допущено:
Завідувач кафедри ПГМ
_____ Олег ЛЕВЧЕНКО
“__” _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Автоматизовані та роботизовані
механічні системи»**

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: Адаптивна гідропневматична мехатронна система зволоження повітря в
тепличному об'єкті

Виконав(ла) : студент(ка) 2 курсу, групи МА-41мп
(шифр групи)

Степчук Владислав Олександрович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник д.т.н., професор Губарев О. П. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант розділ 4 PhD, Синицина Є.Ю. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент(ка) _____
(підпис)

Київ – 2025 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизовані та роботизовані механічні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ПГМ

_____ Олег ЛЕВЧЕНКО

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту(ці)
Степчук Владислав Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Адаптивна гідропневматична мехатронна система зволоження повітря в тепличному об'єкті

науковий керівник дисертації Губарев Олександр Павлович д.т.н., професор ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «06» листопада 2025 р. № 4844- с

2. Термін подання студентом(кою) дисертації «05» грудня 2025 р.

3. Об'єкт дослідження Автоматизована мехатронна система керування вологістю повітря в середині тепличного об'єкта

4. Вихідні дані: кратність повітрообміну – 30, температура в середині теплиці 20°C, відносна вологість 70%, температура вхідного повітря 15,6 °C, відносна вологість 68%, мінімальна продуктивність вентилятора 100 м³/год, максимальна продуктивність вентилятора 1300 м³/год

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести модельні дослідження розповсюдження і стабілізації вологості повітря по об'єму; розробити загальну структуру гідравлічної системи зволоження повітря та її розташування в теплиці; підібрати виконавчі пристрої, засоби контролю і керування; розробити програму для керування виконавчими пристроями.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: епюри розподілу вологості та температури в замкненому об'ємі теплиці та епюри втрати теплової потужності, графіка часу стабілізації відносної вологості, температури та швидкості повітря, функція зміни відносної вологості в залежності від продуктивності вентилятора, функція втрати теплової потужності в залежності від продуктивності вентилятора.

7. Орієнтовний перелік публікацій 2 доповіді на конференціях

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	Синицина Є.Ю., асистент	20.10.2025	17.11.2025

9. Дата видачі завдання «03» вересня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд систем зволоження в теплиці та їх автоматизованих систем керування	15.09.2025	Виконано
2	Розробка принципової гідравлічної схеми	22.09.2025	Виконано
3	Гідравлічний розрахунок, підбір обладнання	06.10.2025	Виконано
4	Математичний опис фізичних процесів в середині теплиці	13.10.2025	Виконано
5	Розробка 3-D моделі тепличного об'єкта	20.10.2025	Виконано
6	Дослідження стабілізаційних процесів температури та вологості повітря	03.11.2025	Виконано
7	Дослідження втрати теплової потужності теплиці	17.11.2025	Виконано
8	Розробки режиму роботи форсунок	21.11.2025	Виконано
9	Розробки режиму роботи нагрівача	21.11.2025	Виконано
10	Розробка алгоритму керування	27.11.2025	Виконано
11	Розробка стартап-проекту	05.12.2025	Виконано

Студент

Владислав СТЕПЧУК

Керівник

Олександр ГУБАРЕВ

Анотація

Степчук В.О.. Адаптивна гідропневматична мехатронна система зволоження повітря в тепличному об'єкті.

Робота складається з 6 розділів, має обсяг 125 аркушів, містить 57 ілюстрацій, 45 таблиць. При написанні роботи було використано 35 джерел.

Актуальність теми. Через надмірне зволоження повітря в теплиці часто спостерігається грибкове захворювання рослин, відповідно, знижується врожайність. Тому актуальною задачею є розроблення мехатронної системи зволоження повітря в теплиці, яка спроможна стабілізувати та підтримувати стає значення вологості повітря при різних фазах росту рослин, тобто, забезпечити пошарову стабілізацію та підтримку вологості повітря на потрібному рівні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Роботу виконано в рамках складової частини «Ресурсоефективне та чисте виробництво (РЕЧВ)» програми "Європейський Союз для довкілля" (EU4Environment) для країн Східного партнерства.

Мета дослідження

Забезпечення підтримання сталих значень показників вологості повітря за допомогою створення автоматизованої мехатронної системи керування форсунками з випереджуючим алгоритмом керуванням, що базується на процесах переносу водяної пари в середині замкненого об'єму теплиці.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Теоретичне обґрунтування процесу переносу водяної пари в теплиці.
2. Розробити математичну та комп'ютерну моделі теплиці.
3. Провести модельні дослідження розповсюдження і стабілізації вологості повітря по об'єму.
4. Розробити загальну структуру гідравлічної системи зволоження повітря та її розташування в теплиці.
5. Підібрати виконавчі пристрої, засоби контролю і керування.
6. Розробити програму для керування виконавчими пристроями.

Об'єкт дослідження

Автоматизована мехатронна система керування вологістю повітря в середині тепличного об'єкта.

Предмет дослідження

Процес створення і підтримки параметрів відносної вологості повітря в середині замкненого об'єму теплиці з обмеженнями по: кількості відкритих вікон провітрювання та форсунок розпилення; швидкості повітряних потоків; температурному режиму.

Методи дослідження

Для проведення моделювання розподілення вологості в теплиці, побудови графіків та розрахунків використовувалися програми: SOLIDWORKS Flow Simulation 2022, Microsoft Excel 2019, CoDeSys.

Наукова новизна одержаних результатів

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

1. Досліджено розподіл вологості повітря в середині замкненого об'єму теплиці в залежності від зміни продуктивності вентилятора приточного повітря.
2. Досліджено розподіл температури повітря в середині замкненого об'єму теплиці в залежності від зміни продуктивності вентилятора приточного повітря.
3. Встановлено, шляхом моделювання, що для рівномірного зволоження повітря в теплиці відповідно до росту рослин (по вертикалі) необхідно встановити механічну систему піднімання та опускання трубопроводу з 6-ма форсунками.

Практичне значення одержаних результатів

1. Запропонована механічна система піднімання та опускання трубопроводу з 6-ма форсунками дозволяє пошарово зволожувати повітря відповідно до росту рослин. Це запобігає утворенню конденсату, грибкових захворювань та зменшує витрати на зволоження та обігрів теплиці.

Апробація результатів дисертації:

1. Синицина Є., & Губарев О., & Степчук В.О., «СТРУКТУРА МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ТЕПЛИЧНОГО ГОСПОДАРСТВА», Міжнародна науково-технічна конференція - ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТУ-
<https://kbwww.b.conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2025/paper/view/2510>

8

2. Синицина Є., & Губарев О., & Степчук В.О., «ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЗВОЛОЖЕННЯ БАГАТОЦІЛЬОВОЇ ТЕПЛИЦІ», XXV міжнародна науково-технічна конференція асоціації спеціалістів промислової гідравліки та пневматики АС ППП «Промислова гідравліка і пневматика»

Ключові слова: мехатронна система, мікроклімат, об'єкт тепличного господарства, структура, тепло-масоперенос, вологість повітря, алгоритми та режими керування.

Abstract

Stepchuk V.O. Adaptive hydropneumatic mechatronic air humidification system in a greenhouse facility.

The work consists of 6 chapters, has a volume of 125 pages, contains 57 illustrations and 45 tables. Thirty-five sources were used in writing the work.

Relevance of the topic. Due to excessive air humidity in greenhouses, fungal diseases of plants are often observed, which reduces crop yields. Therefore, an urgent task is to develop a mechatronic system for humidifying the air in greenhouses, which is capable of stabilizing and maintaining a constant level of air humidity during different phases of plant growth, i.e., ensuring layer-by-layer stabilization and maintenance of air humidity at the required level.

Connection of the work with scientific programs, plans, topics

The work was carried out as part of the “Resource-efficient and Clean Production (RECP)” component of the European Union for the Environment (EU4Environment) program for the Eastern Partnership countries.

Research objective

To ensure the maintenance of stable air humidity values by creating an automated mechatronic nozzle control system with a predictive control algorithm based on water vapor transfer processes inside a closed greenhouse volume.

RESEARCH TASKS

1. Theoretical justification of the process of water vapor transfer in a greenhouse.
2. Develop mathematical and computer models of a greenhouse.
3. Conduct model studies of the distribution and stabilization of air humidity throughout the volume.
4. Develop the general structure of the hydraulic air humidification system and its location in the greenhouse.
5. Select actuators, control and management tools.
6. Develop a program to control the actuators.

Object of research

Automated mechatronic system for controlling air humidity inside a greenhouse.

Subject of research

The process of creating and maintaining relative air humidity parameters inside a closed greenhouse volume with restrictions on: the number of open ventilation windows and spray nozzles; air flow velocity; temperature regime.

Research methods

The following programs were used to model the distribution of humidity in the greenhouse, construct graphs, and perform calculations: SOLIDWORKS Flow Simulation 2022, Microsoft Excel 2019, and CoDeSys.

Scientific novelty of the results obtained

The dissertation presents the following new scientific results for the first time:

1. The distribution of air humidity inside a closed greenhouse volume was studied depending on changes in the performance of the supply air fan.
2. The distribution of air temperature inside a closed greenhouse volume was studied depending on changes in the performance of the supply air fan.
3. It was established through modeling that for uniform humidification of the air in the greenhouse in accordance with plant growth (vertically), it is necessary to install a mechanical system for raising and lowering a pipeline with 6 nozzles.

Practical significance of the results obtained

1. The proposed telescopic system for raising and lowering a pipeline with 6 nozzles allows the air to be humidified in stages in accordance with plant growth. This prevents the formation of condensation and fungal diseases and reduces the cost of humidifying and heating the greenhouse.

Translated with DeepL.com (free version)**Approval of the dissertation results:**

1. Sinitsyna E., & Gubarev O., & Stepchuk V.O., "STRUCTURE OF THE MECHATRONIC SYSTEM FOR CONTROLLING THE MICROCLIMATE OF A GREENHOUSE," International Scientific and Technical Conference - PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MACHINE BUILDING AND TRANSPORT-
<https://kbwww.b.conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2025/paper/view/25108>

2. Sinitsyna, E., & Gubarev, O., & Stepchuk, V.O., "FEATURES OF MODELING A MULTI-PURPOSE GREENHOUSE HUMIDIFICATION SYSTEM," XXV International Scientific and Technical Conference of the Association of Industrial Hydraulics and Pneumatics Specialists AS PGP "Industrial Hydraulics and Pneumatics"

Keywords: mechatronic system, microclimate, greenhouse facility, structure, heat and mass transfer, air humidity, control algorithms and modes.

**Пояснювальна записка
до магістерської дисертації**

на тему: Адаптивна гідропневматична мехатронна система зволоження повітря
в тепличному об'єкті

Київ – 2025 рік

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМА ЗВОЛОЖЕННЯ ТЕПЛИЧНОГО ГОСПОДАРСТВА.....	18
1.1. Загальні відомості про системи зволоження в тепличних об'єктах.....	18
1.2. Конструктивні особливості систем зволоження.....	22
1.3. Порівняльний аналіз систем зволоження та методів контролю вологості повітря в середині теплиці.....	30
1.4. Мета та задачі роботи.....	38
РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІЇ КЕРУВАННЯ МЕХАТРОННОЮ СИСТЕМОЮ ЗВОЛОЖЕННЯ ПОВІТРЯ.....	39
2.1. Особливості автоматизованих систем управління мікрокліматом в тепличному об'єкті.....	39
2.2. Розробка принципової гідравлічної схеми.....	45
2.3. Гідравлічний розрахунок.....	47
2.4. Підбір гідравлічного обладнання.....	54
2.5. Висновки до розділу.....	56
РОЗДІЛ 3. ТЕПЛО-МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ В ТЕПЛИЦІ.....	58
3.1. Математичний опис фізичних процесів в середині теплиці.....	58
3.2. Висновки до розділу.....	63
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЗАМКНЕНОМУ ОБ'ЄМІ ТЕПЛИЦІ.....	64
4.1. Розробка 3-D моделі тепличного об'єкта та параметри моделювання.....	64
4.2. Стабілізаційні процеси в теплиці.....	66
4.3. Втрати теплової потужності теплиці.....	82
4.4. Висновки до розділу.....	83
РОЗДІЛ 5. МЕХАТРОННА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ЗВОЛОЖЕННЯ.....	86
5.1. Підсистема роботи форсунок.....	86
5.2. Підсистема роботи нагрівача.....	90

5.3. Алгоритм керування виконавчими пристроями.....	92
5.4. Висновок до розділу.....	95
РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА СТАРТАП – ПРОЕКТУ.....	97
6.1. Опис ідеї проекту.....	97
6.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	99
6.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	99
6.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	108
6.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	111
6.6. Висновок до розділу.....	117
ВИСНОВКИ.....	118
ДОДАТОК 1.....	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	122

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Е – помилка регулювання;	ρ – густина;
ЕС – швидкість зміни помилки;	λ - коефіцієнт тертя;
ΔK_P – зміна коефіцієнта Р;	L - довжина ділянки; м
ΔK_I – зміна коефіцієнта І;	d_m - діаметр труби або шлангу; мм
ΔK_D – зміна коефіцієнта D;	V - середня швидкість рідини; м/с
НС – насосна станція;	V – швидкість потоку рідини; м/с
Ф – фільтр;	d – внутрішній діаметр трубопроводу; мм
КЗ1- КЗ4 – зворотній клапан;	ν – кінематична в'язкість рідини;
КТ – редукційний клапан;	Re – число Рейнольдса;
ДК – регульований дросель з зворотним клапаном;	Δp_T – Втрати на гідравлічне тертя, Па
М1 – манометр;	Q – витрата рідини; л/хв
Кр – редукційний кран;	Δp_M – втрати на місцевих опорах; Па
АК – гідроаккумулятор;	Δp_d – втрати у гідроапаратах; Па
РТ – регулятор тиску;	Δp_T – втрати на гідравлічне тертя, Па
Р1-РЗ – керований гідро- розподільник;	Δp – загальні втрати всієї гідросистеми; Па
ГЗ – гідравлічний замок;	
V – об'єм повітря, м ³ ;	$r \rightarrow$ вектор положення Сонця;
$C_{\text{тепл}}$ – питома теплоємність повітря, кДж/кг*°С;	I_λ – являє собою монохроматичну яскравість, Вт/ (м ² ср ¹);
$T(t)$ – температура повітря всередині теплиці, °С;	dw – вміст вологи у вологому повітрі, %.
$Q_{\text{надх}}$ – теплові надходження від системи обігріву кВт;	α_λ – спектральний коефіцієнт поглинання;
$Q_{\text{втрати}}$ – втрати теплоти кВт;	$s \rightarrow$ вектор напрямку сонячної енергії;

$Q_{\text{свіж}}$ – втрати теплоти на обігрів свіжого повітря, кВт.

$\rho(\frac{dW_X}{dx} + \frac{dW_X}{dy} + \frac{dW_X}{dz})$ – конвективний член;

$\rho g x$ – гравітаційний член;

$\frac{dp}{dx}$ – зміна тиску в потоці;

σ – константа Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,669 \times 10^{-4} \text{ Вт / м}^2\text{К}^{-4}$;

g – прискорення вільного падіння;

μ – динамічна в'язкість середовища;

P – тиск, Па;

$W_X W_Y W_Z$ – векторне поле швидкостей;

t – час, год.

Sm – маса, додана до безперервної фази.

T – температура, °С;

$keff$ – ефективний коефіцієнт пропускання.

ρ_n – кількість водяної пари в 1 м^3 повітря, $\text{кг} / \text{м}^3$.

$P_{\text{сп}}$ та $P_{\text{п}}$ – парціальні тиски сухого повітря й водяної пари.

h – видима ентальпія ідеального газу.

$p_{\text{п}}$ – парціальний тиск водяної пари у вологому повітрі;

σ_s – коефіцієнт розсіювання;

$\mu(\frac{d^2W_X}{dx^2} + \frac{d^2W_X}{dy^2} + \frac{d^2W_X}{dz^2})$ –

дисипативний член;

n – показник заломлення;

Φ – фазова функція дифузії;

α – проникність пористого середовища, м^2 ;

S_u – вихідний член рівняння імпульсу;

μ – динамічна в'язкість, $\text{м}^2 / \text{с}$;

$d\Omega$ – представляє тілесний кут.

$c_{pв.п}$ – теплоємність вологого повітря,

$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

C_u – коефіцієнт інерційного опору.

m_w – молекулярна вага води у газоподібному стані;

$L A I$ – індекс площі листя, $\text{м}^2 / \text{м}^2$;

T_c , T_i – температура культури та повітря в приміщенні, К;

ra – позначає аеродинамічний опір листя помідорів, с/м;

λ – прихована теплота випаровування води, Дж/кг;

H_c - відносна вологість культури;

H_a – відносна вологість повітря в приміщенні;

p_{max} – максимально можливий
парціальний тиск водяної пари, Па.

P_b – барометричний тиск повітря;

$T_{в.п.}$ – температура вологого повітря,
К;

$\rho_{с.п.}$ – густина сухого повітря (с.п.).

D_u – коефіцієнт в'язкого опору;

I – ентальпія вологого повітря, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг с.п.}}$.

R_i – це швидкість хімічної реакції;

S_i – визначається як вихідний член та
додаткова швидкість дискретної фази;

∇J_i – це дифузійний потік речовини,
що виникає внаслідок градієнта
концентрації.

Γ_u – коефіцієнт дифузії.

rs – середній імпеданс продихів
рослини, с/м.

m_k, r_k – маса і радіус краплі кг, м;

$D(\theta)$ – коефіцієнт дифузії пари
повітря;

$S\phi$ – вихідний член рівняння енергії;

R – газова стала пари;

T – температура пари, К;

P_H – парціальний тиск пари над
поверхнею краплі, Па.

P – парціальний тиск пари в
оточуючому середовищі, Па.

Γh – ефективний коефіцієнт дифузії
ентальпії;

S_c – вихідний член водяної пари.

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку тепличного рослинництва визначаються зростаючою потребою у вискоефективних, енергоощадних та надійних технологіях контролю мікроклімату. Зміна клімату, підвищення вартості енергоресурсів, зростання попиту на якісну сільськогосподарську продукцію — спричиняють необхідність переходу до високотехнологічних автоматизованих систем, здатних забезпечувати стабільну продуктивність тепличних господарств протягом усього року. Одним із ключових елементів керування мікрокліматом у теплицях є підтримання оптимального рівня вологості повітря, адже саме цей параметр визначає інтенсивність транспірації, ефективність фотосинтезу, стійкість рослин до стресових факторів та, зрештою, їх урожайність.

Традиційні системи зволоження, що застосовуються в тепличних господарствах, мають низку недоліків: нерівномірність розподілу вологи, затримки в реакції на зміну умов середовища, значні обсяги споживання води, а також низьку адаптивність до тепло-масообмінних процесів, які характеризують тепличний мікроклімат. До того ж більшість таких систем не забезпечує достатньої точності регулювання вологості, що ускладнює підтримання оптимальних параметрів для конкретних культур на різних фазах росту. Це зумовлює актуальність впровадження інтелектуальних мехатронних рішень, здатних працювати в режимі адаптивного керування та оптимізації ресурсів.

Гідропневматичні системи, які поєднують механічні, гідравлічні, пневматичні та електронні компоненти, відкривають нові можливості для створення високоточних засобів зволоження повітря. Їхня перевага полягає у здатності створювати дрібнодисперсне розпилення води, швидко реагувати на зміну параметрів навколишнього середовища та забезпечувати широкий діапазон регулювання вологості.

У теплицях, завдяки адаптивній мехатронній системі керування, можна не лише підтримувати стабільний рівень вологості, а й оптимізувати витрати води, зменшення енерговитрат, інтеграцію з іншими системами керування

мікрокліматом, такими як вентиляція, опалення чи затінення. Таким чином адаптивна гідропневматична мехатронна система стає важливою складовою комплексного підходу до автоматизації сучасного тепличного виробництва.

Необхідно вирішити питання точного моделювання тепломасообінних процесів, а також процесу перенесення водяної пари в об'ємі теплиці, створити алгоритми адаптивного керування виконавчими пристроями.

Таким чином, тема магістерської роботи «Адаптивна гідропневматична мехатронна система зволоження повітря в тепличному об'єкті» є актуальною як у науковому, так і в практичному аспектах. Вона спрямована на створення високоефективного технічного рішення, що поєднує сучасні технології мехатроніки, автоматизації та керування, дозволяє підвищити ефективність тепличного виробництва й забезпечує стабільні параметри мікроклімату, необхідні для вирощування продукції високої якості.

Зважаючи на вищезазначене, дослідження у межах цієї роботи спрямоване на обґрунтування принципів побудови адаптивної гідропневматичної системи зволоження, розроблення її структурної схеми, визначення алгоритмів функціонування та експериментальне підтвердження ефективності запропонованого підходу.

У межах виконання магістерської роботи було побудовано тривимірну модель тепличного об'єкта з урахуванням визначених характеристик і початкових параметрів, що забезпечило можливість здійснення комплексних тепломасообінних досліджень у широкому діапазоні режимів. Проведені експерименти дали змогу встановити особливості розповсюдження вологості, температури та швидкості повітряних потоків при різній продуктивності вентилятора: зокрема, визначено, що процес стабілізації вологості та температури має коливальний характер і починається вже на 5–7 секунді роботи системи, причому прискорюється зі збільшенням витрати повітря. Водночас виявлено формування вихрових зон, що створюють локальні «мертві» ділянки з порушенням тепло- та вологообміном і потребують додаткових засобів контролю. Окремо проаналізовано втрати теплової потужності через огорожувальні

конструкції, що дало можливість оцінити дефіцит тепла та визначити необхідну продуктивність нагрівальних і зволожувальних пристроїв. Отримані результати стали підґрунтям для формування вимог до адаптивної гідропневматичної мехатронної системи зволоження та дозволили обґрунтувати її структуру, принципи роботи й алгоритми керування.

РОЗДІЛ 1. СИСТЕМА ЗВОЛОЖЕННЯ ТЕПЛИЧНОГО ГОСПОДАРСТВА

1.1. Загальні відомості про системи зволоження в тепличних об'єктах

У сучасній сільськогосподарській промисловості найбільш розповсюджені п'ять типів зволоження повітря в середині теплиці. Серед них:

Природне зволоження. Зволоження повітря відбувається за рахунок процесу евапорації, тобто, випаровування води з поверхні ґрунту та транспірації (випаровування води з рослин). Засоби для зволоження: (Не потребує додаткових пристроїв та механізмів для насичення водяною паром повітря).



Рис. 1.1. Теплиця з природним типом зволоження [1]

- Крапельне зволоження. Метод заснований на природному зволоженні, але до нього додається система крапельного поливу. Зволоження повітря в середині теплиці відбувається так само, як і в природному методі.



Рис. 1.2. Теплиця з крапельним типом зволоження [2]

Засоби для зволоження: (до складу системи входить: насосна станція (використовується, якщо вода подається не самопливом), фільтраційна система – 1, регулятор тиску – 2, магістральні трубки діаметром 25-32 мм – 3, крапельні трубки – 4).

- Туманоутворююче зволоження. За рахунок форсунок та рідини під тиском створюється дрібнодисперсний туман.



Рис. 1.3. Теплиця з туманоутворюючим типом зволоження [3]

Засоби для зволоження: (До складу системи входить: Насос високого тиску (70 – 120 бар) – створює необхідний тиск, для розпилення води через форсунки (туманоутворювачі) – 2, фільтраційна система (уникнення засмічення форсунок), центральні магістралі (трубопроводи) – 1, контролер вологості – вимірює рівень вологості (RH%) і автоматично вмикає/вимикає систему).

- Зрошення огорожувальної конструкції. Водою поливають стіни огорожувальної конструкції теплиці з яких вона поступово випаровується. Засоби для зволоження: (Система складається з насосної станції – 1, трубопроводів з форсунками вздовж стін – 2, системи збору і рециркуляції води (лотки, баки) – 4, вологі стінки – 3, контролер вологості або таймер (для автоматичного вмикання/вимикання)).

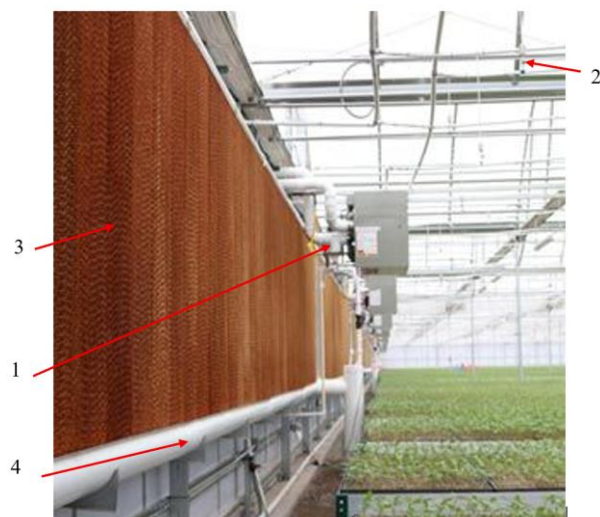


Рис. 1.4. Теплиця з зрошенням огорожувальної конструкції [4]

- Автоматичні системи клімат-контролю. Контроль кількості водяної пари контролюються а автоматичному режимі. Датчики вимірюють температуру, вологість і CO_2 , контролер регулює роботу систем вентиляції, туманоутворювання, зрошення, провітрювання вікон та обігріву.



Рис. 1.5. Теплиця з автоматичними системами клімат-контролю [5]

Засоби для зволоження: (Основними елементами системи є датчики (температури, вологості та CO_2) – 1,7 за даними яких, керується контролер – 5, та подає команди на виконавчі пристрої: 3 – система туманоутворення,

4 – вентилятори (система повітрообміну), 6 – крапельний полив, 2 – система освітлення та обігріву).

Таблиця 1.1

Переваги та недоліки систем зволоження повітря

Вид зволоження	Переваги	Недоліки	Вартість, грн
Природне зволоження	Відсутність витрат на електроенергію	Низька ефективність, важкість контролю	0 грн.
Крапельне зволоження	Поєднує в собі системи поливу та зволоження, мінімальні витрати води	Обмежене значення діапазону вологості повітря, мала зона зволоження	240 грн за 1 м
Туманоутворююче зволоження	Висока ефективність (швидке підвищення рівня вологості повітря, можливість швидко знизити температуру повітря)	Досить коштовне обладнання, система водопостачання потребує встановлення додаткових фільтрів	51 грн за 1 м
Зрошення огорожувальної конструкції	Простий спосіб зволоження, використання для малих площ	Високий рівень захворювань рослин, не можливо точно регулювати кількість водяної пари в замкненому об'ємі	0 грн.
Автоматичні системи зволоження	Висока ефективність	Досить коштовне обладнання	480 грн за 1 м

Проаналізувавши наявні системи зволоження повітря в середині замкнутого об'єму доцільно використовувати автоматичну систему контролю для туманоутворюючого зволоження.

1.2.Конструктивні особливості систем зволоження

Примусове розповсюдження вологи. У своїй роботі Джоко Сетьянто та співавт. запропонували, використати примусове розповсюдження вологи по теплиці за допомогою системи туманоутворення, що працює на основі автоматичного контролю температури та вологості (рис.1.6).

Для цього автори застосували IoT-керовану установку, яка складалася з (див. Рис. 1.6) резервуара для води (500 л) – 1, фільтрів – 2, цифрового витратоміру – 3, насоса високого тиску (3–5 бар) – 4, регулятора тиску – 5, 120 форсунок (діаметром 0,2 мм) – 6, розташованих рівномірно по периметру теплиці, та контролера Sonoff TH-16 – 7, який автоматично вмикав і вимикав систему залежно від показників датчиків.

Моніторинг температури та вологості проводився у 12 точках всередині теплиці за допомогою цифрових термометрів-гігрометрів – 8.

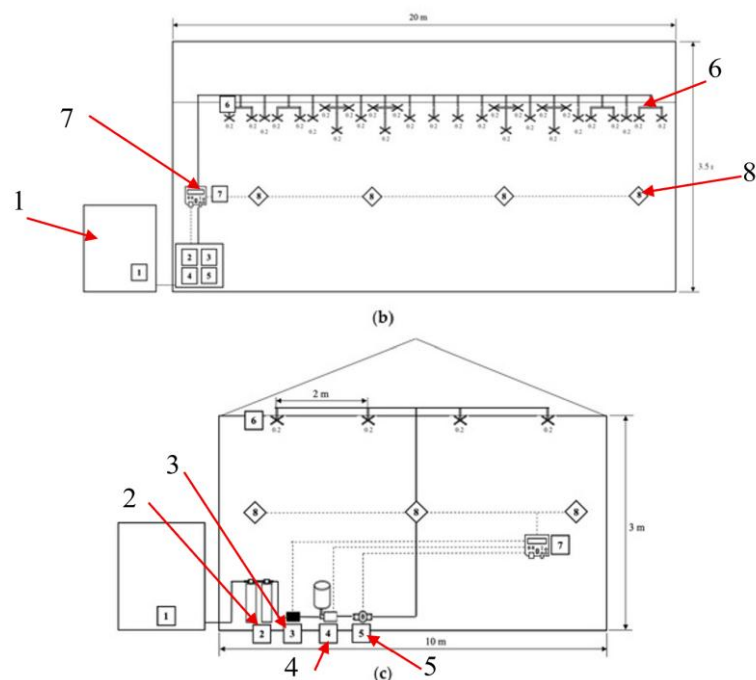


Рис. 1.6. Теплиця з примусовим розповсюдженням вологи [6]

У ході експерименту досліджували ефективність системи при різних витратах води (60–120 л/год), порівнювали температуру та вологість усередині теплиці з умовами зовні, а також оцінювали рівномірність розподілу мікроклімату у просторі.

Результати показали, що оптимальний режим подачі води для утворення туману (80 л/год), що дало змогу підтримувати температуру нижче 33 °С і відносну вологість близько 80–85 %, забезпечуючи рівномірне зволоження та помітне охолодження внутрішнього об'єму теплиці.

Подвійний шар покриття теплиці. У своїй роботі Сюй та співавтори запропонували застосувати подвійний шар покриття теплиці з розпиленням води між шарами. Основна ідея полягала у створенні випаровувального шару туману між зовнішньою та внутрішньою плівками, що знижує нагрівання внутрішнього простору без надмірного зволоження повітря.

Для цього автори розробили установку (рис. 1.7), яка складалася з форсунок високого тиску – 1, розміщених у проміжку між плівками, трубопровідної системи – 2, насоса, фільтра та дренажного жолоба – 3, для відведення невиварованої води.

Досліджувались такі параметри системи як: діаметр форсунок (0,20–0,35 мм), тиск води (4–6 МПа), кут розпилення (90–120°) та тривалість роботи (5–20 хв).

Експерименти проводилися в реальній теплиці під час сонячних періодів, із вимірюванням температури й вологості повітря усередині та ззовні, за допомогою цифрових термометрів-гігрометрів – 4.

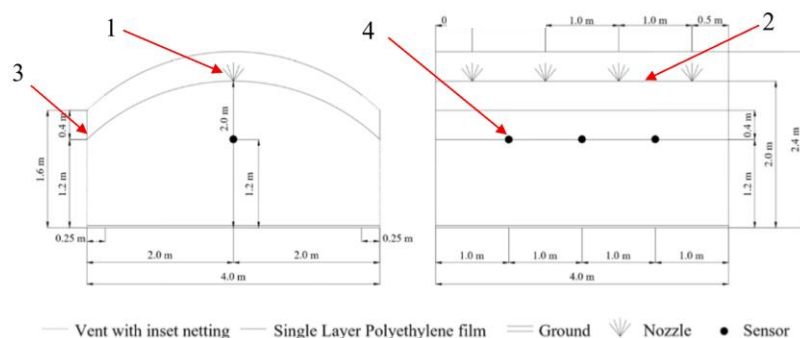


Рис. 1.7. Теплиця з подвійним шаром покриття [7]

Автори аналізували ефективність охолодження, рівномірність розподілу мікроклімату та вплив режимів розпилення на динаміку температури.

Результати показали, що оптимальні умови (форсунка 0,30 мм, кут 120°, тиск 6 МПа, тривалість 15 хв) забезпечують зниження температури всередині теплиці на 5,36 °С порівняно з контрольним варіантом.

Система виявилася ефективною для тропічних і посушливих регіонів, де потрібне стабільне охолодження теплиць без збільшення вологості ґрунту.

Система туманоутворення випаровувального охолодження. У своїй роботі Карреро та співавтори запропонували використати систему туманоутворення для підвищення ефективності випаровувального охолодження у теплиці, призначеній для вирощування троянд. Метою дослідження було оцінити, наскільки ефективно така система знижує температуру повітря, підвищує вологість та покращує мікроклімат у теплиці під час спекотного періоду (рис. 1.8).

Для цього автори застосували автоматизовану систему розпилення води з форсунками високого тиску, розташованими під дахом теплиці на висоті близько 3 м.

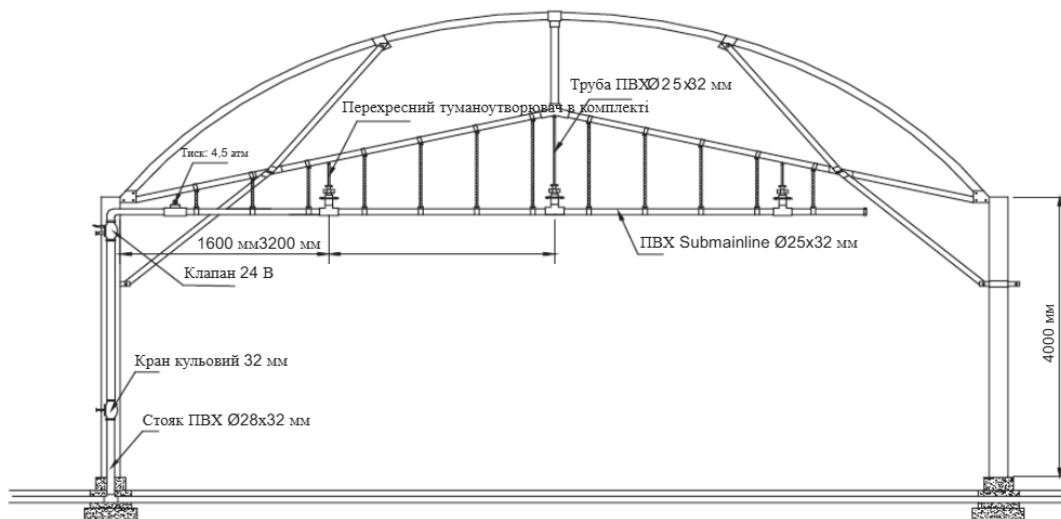


Рис. 1.8. Теплиця з системою туманоутворення випаровувального охолодження [8]

Подача води здійснювалася насосом тиском 6–8 бар, через систему трубопроводів із фільтрацією води для запобігання засміченню форсунок.

Керування системою здійснювалося автоматично, за допомогою датчиків температури та відносної вологості, що регулювали цикли ввімкнення та вимкнення туманоутворювачів протягом дня.

Моніторинг параметрів мікроклімату проводився у кількох точках теплиці, де вимірювали температуру повітря, відносну вологість і швидкість руху повітря.

У ході експерименту порівнювали роботу теплиці з активною системою туманоутворення та без неї, оцінюючи ефективність випаровувального охолодження та зміни мікроклімату по висоті та довжині.

Результати показали, що використання системи туманоутворення знижувало температуру повітря всередині теплиці на 5 – 7 °C порівняно з зовнішнім середовищем і підвищувало відносну вологість до 80 – 85 %.

Ефективність випаровувального охолодження досягала близько 70 %, що забезпечувало стабільний мікроклімат і сприяло покращенню стану рослин.

Таким чином, система туманоутворення виявилася ефективним засобом контролю температури та вологості повітря в теплицях, особливо в умовах високих зовнішніх температур.

Система мікро-туманоутворення. У своїй роботі Чжан та співавтори запропонували використати систему мікро-туманоутворення для регулювання мікроклімату теплиці та покращення росту і продуктивності томатів.

Основна ідея полягала у зменшенні дефіциту парціального тиску водяної пари (VPD) шляхом створення рівномірного шару дрібнодисперсного туману, який охолоджує повітря та підвищує його вологість без надмірного зволоження листової поверхні.

Для цього автори використали систему форсунок високого тиску, розташованих під дахом теплиці, що створювали мікрокраплі діаметром менше 10 мкм.

Подача води здійснювалася через насосну станцію високого тиску, керування якою відбувалося автоматично за показниками температури та вологості повітря.

Моніторинг параметрів мікроклімату проводився у кількох точках по висоті й площі теплиці з вимірюванням температури, відносної вологості та VPD.

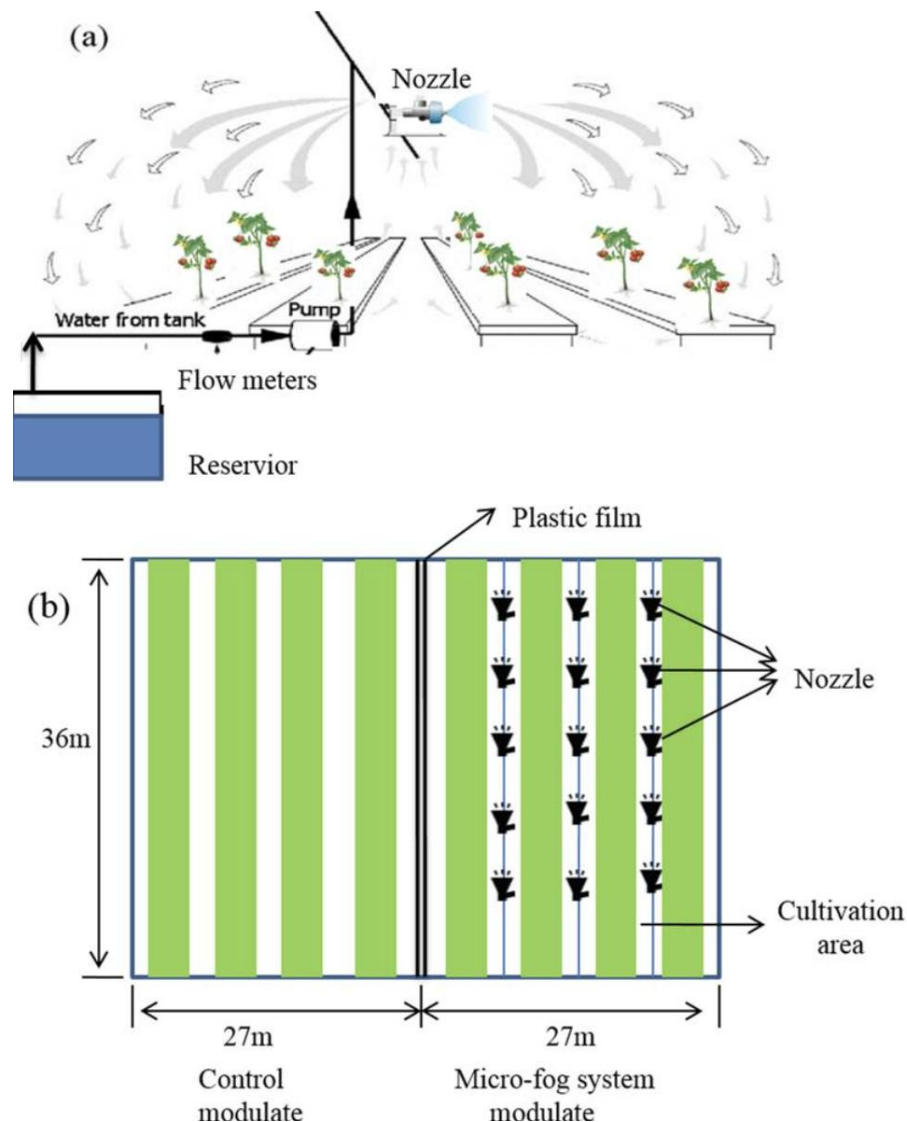


Рис. 1.9. Теплиця з системою мікро-туманоутворення [9]

Під час експерименту досліджували вплив мікро-туманоутворення на ріст рослин, фотосинтетичну активність і врожайність томатів, а також порівнювали результати з контрольною теплицею без системи зволоження.

Результати показали, що використання системи мікро-туману зменшувало VPD у середньому на 0,5 – 1,0 кПа, підтримувало температуру повітря на рівні 24 – 26 °C та підвищувало відносну вологість до 85 – 90 %.

Рослини в таких умовах мали вищу швидкість фотосинтезу, більшу площу листової поверхні та на 12 – 15 % більший урожай, ніж у контрольному варіанті.

Отже, система мікро-туманоутворення виявилася ефективним засобом підтримання стабільного мікроклімату й покращення росту культур у теплицях.

Три методи охолодження. У своїй роботі Хе та співавтори запропонували порівняльний аналіз трьох методів охолодження теплиць: натуральної вентиляції, обприскування даху та системи вентилятора + зволожувальної подушки (рис.1.10).

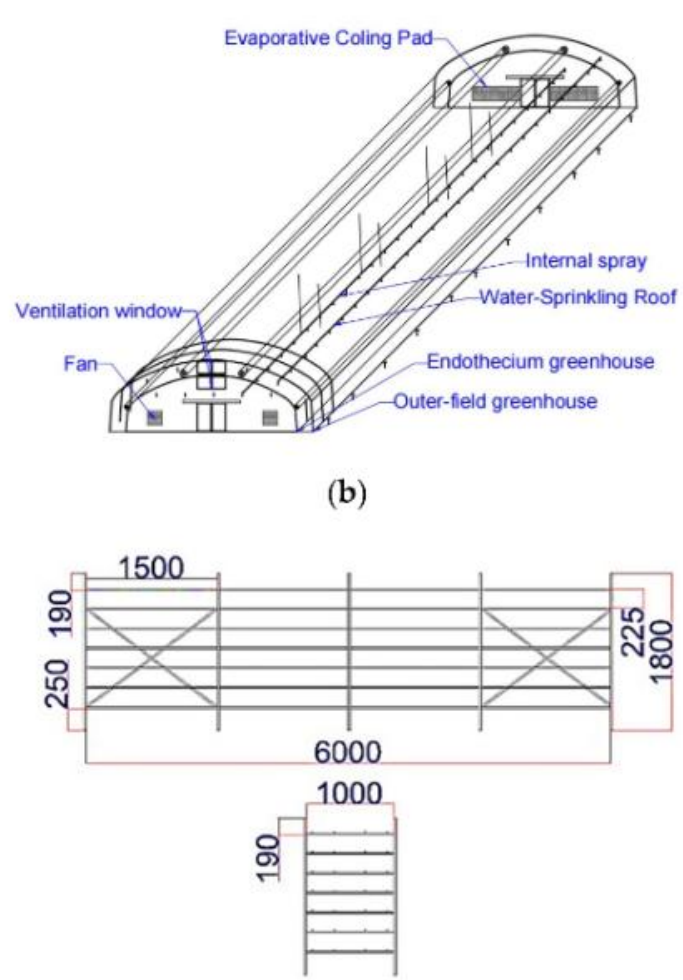


Рис. 1.10. Теплиця з трьома методами охолодження [10]

Метою дослідження було встановити, який із методів забезпечує найкраще охолодження, зволоження повітря та рівномірність мікроклімату в теплицях, призначених для вирощування шиїтаке (гриб) в посушливому кліматі. Для цього автори використовували теплицю з подвійною конструкцією, обладнану системами охолодження за трьома описаними підходами, разом із зовнішньою затінювальною сіткою.

Система обприскування дахового покриття реалізована через спеціальні форсунки на даху, які зрошують зовнішній шар, що дозволяє створити випаровувальний ефект перед зовнішньою оболонкою.

Також у схемі використовувалася система вентиляції та циркуляції повітря, а моніторинг температури та вологості здійснювався у кількох точках всередині теплиці протягом 5 днів спостережень.

У ході експерименту порівнювали результати для кожного з методів охолодження: зниження температури всередині (у °C), збільшення відносної вологості, ефективність охолодження, рівномірність розподілу температури по довжині, ширині та вертикалі.

Результати показали, що метод обприскування даху забезпечив найкраще охолодження — зниження температури на 15,2 °C, підвищення вологості на 51,2 %, і досягнув охолоджувальної ефективності 68,1 %. У порівнянні, натуральна вентиляція знизилася температуру на 8,6 °C (вологості +15,3 %), а система системи вентилятора + зволожувальної подушки — на 14,0 °C (вологості +43,3 %).

Обприскування даху також показало найкращу температурну однорідність в просторі теплиці, тоді як інші методи мали помітні градієнти температур у висоту й по ширині.

Система туманоутворення з емпіричною моделлю прогнозування температури. У своїй роботі Хачонсак Сіmek запропонував дослідити роботу системи туманоутворення у теплиці та побудували емпіричну модель прогнозування температури повітря під дією сонячного випромінювання (рис.1.11).

Для цього автори застосували експериментальну теплицю розміром $8 \times 4 \times 3$ м, обладнану 18 форсунками високого тиску, розташованими на висоті 2,5 м. Система працювала при тиску 12 бар із середньою витратою води $7,73 \times 10^{-3}$ кг/с і керувалася мікроконтролером Arduino MEGA 2560, який автоматично регулював подачу туману залежно від вологості (менше 80 %).

Для вентиляції використовували два витяжні вентилятори (14") і два циркуляційні (10"), що забезпечували примусовий повітрообмін. Моніторинг

температури й вологості здійснювався трьома датчиками DHT22, а рівень сонячної енергії — радіометром TENMARS TM-206.

У ході експерименту проводили порівняння двох режимів — без системи зволоження та з активним туманоутворенням. Аналізували зміну температури та вологості всередині теплиці, оцінювали ефективність охолодження й точність математичної моделі.

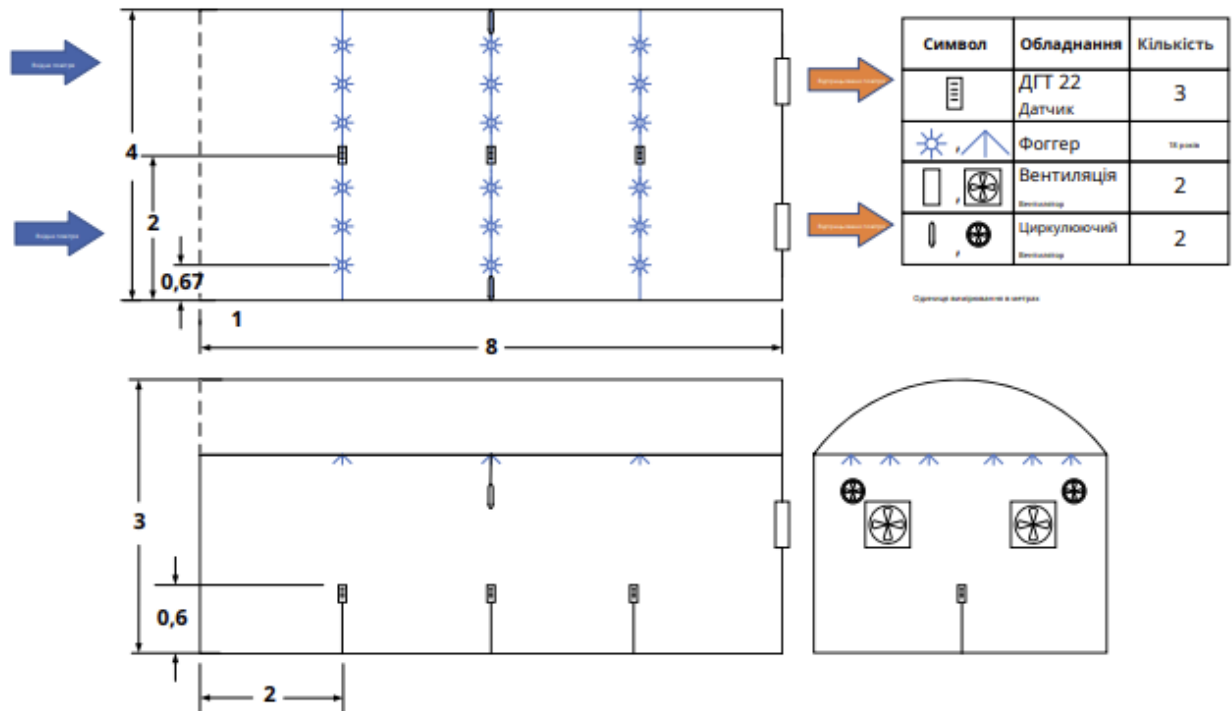


Рисунок 1.11 – Теплиця з системою туманоутворення та емпіричною моделлю прогнозування температури [11]

Результати показали, що робота системи туманоутворення знижувала температуру в середньому на $7,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\approx 18,4\%$), а ефективність охолодження становила $57,36\%$.

Емпірична модель точно описувала динаміку зміни температури (похибка $6,33\%$), що підтвердило ефективність використання туманоутворення для стабілізації мікроклімату теплиці в тропічних умовах.

1.3.Порівняльний аналіз систем зволоження та методів контролю вологості повітря в середині теплиці

Після розгляду особливостей систем зволоження було проведено порівняльний аналіз параметрів теплиць. До параметрів порівняння відноситься: геометрія об'єкта; тип рослин, який вирощується; в якій кліматичній зоні знаходиться об'єкт; рівні зволоження та виконавчі пристрої для зволоження повітря. Результати порівняльного аналізу наведено в табл.1.2..

Таблиця 1.2

Порівняльний аналіз параметрів теплиці

Параметри	Теплиця з примусовим розповсюдженням вологи	Теплиця з подвійний шаром покриття
Геометрія та масштаб	довжини, ширини та висоти «20 м × 10 м × 3,5 м»	довжини, ширини та висоти «4 м × 4 м × 2,4 м»
Продукція, яка вирощується	гірчиця та крес-салат	Не вказано
Місце розташування	Цісаук-Тангеранг, Індонезія	Нанкін, Китай
Рівні зволоження по висоті	Один, на висоті 3 м	Один, на висоті 2 м
Технічні засоби	Систему обприскування (форсунки) було налаштовано на автоматичне ввімкнення на 5 хвилин і вимкнення на 10 хвилин з 7:00 до 17:00 за допомогою IoT-модулю Sonoff WiFi TH16 та програми eWeLink.	Система зрошення подвійного шару з форсунками діаметром 0,30 мм, тиск 6 МПа. Режим роботи — автоматичне вмикання на 15 хв і вимкнення на 15 хв. Встановлено на висоті 2 м з кроком 1 м.

	Установлено 120 форсунок на висоті 3 м — 4 ряди по 30 шт., з кроком 2 м по ширині та 1 м по довжині. Моніторинг проводився у 12 точках цифровими термометрами-гігрометрами. Полив ґрунту не застосовувався. Повітрообмін забезпечувався настінними та даховими вентиляторами (примусова вентиляція).	Окремого IoT-модуля чи дистанційного керування не використовували — керування здійснювалося локально через електронний таймер і регулятор тиску насосної системи. Сенсори температури та вологості RS-485 розташовані на висоті 1,2 м у напрямку схід-захід. Полив ґрунту не застосовувався. Повітрообмін здійснювався через верхні вентиляційні отвори (природна вентиляція з частковим відкриттям даху).
Динаміка процесу зволоження	Встановлення температури та вологості в теплиці протягом дня не вище 33 °C та 85% здійснювалося за допомогою періодичного масового потоку води з п'ятихвилинним увімкненням та десятихвилинним вимиканням з 7:00 до 8:00 «50 л/год»; з 8:00 до 10:00 «60 л/год»; з 10:00 до 11:00 «100 л/год»; з 11:00 до 13:00 «120 л/год»; з 13:00 до 14:00 «80 л/год»; та з 14:00 до	Під час експерименту, проведеного 8–9 червня 2023 року з 09:30 до 17:00, досліджували охолоджувальний ефект обприскування у подвійній теплиці. 8 червня систему не вмикали, щоб зафіксувати природні умови, а 9 червня застосували обприскування з подвійними форсунками під кутом 120°, тиском 6 МПа та діаметром отвору 0,30 мм. Зрошення відбувалося кожні 15 хвилин із тривалістю циклу 15 хвилин

	15:00 «60 л/год». Крім того, система обприскування вимикалася для підтримки вологості не вище 85%, починаючи з 15:00. Система також була оснащена контролером для вимикання насоса, якщо температура повітря досягала нижче 28 °С, а вологість перевищувала 85%.	увімкнення і 15 хвилин вимкнення, починаючи з 9:30 ранку. Результати показали, що без охолодження максимальна температура всередині теплиці сягала 51 °С, тоді як при обприскуванні вона не перевищувала 43 °С. Середньодобова температура знизилася з 45,67 °С до 40,09 °С, а відносна вологість зросла з 35,68 % до 47,44 %.
Розповсюдження вологи по теплиці	примусова	Природна
Вплив вологості ґрунту	Не вказано	Не вказано
Параметри	Теплиця з системою туманоутворення випаровувального охолодження.	Теплиця з системою мікро-туманоутворення
Геометрія та масштаб	довжини, ширини та висоти «205 м × 105,6 м × 5,6 м» 11 прольотів кожен шириною 9,6 м	довжини, ширини та висоти «36 м × 54 м × 5,6 м»
Продукція, яка вирощується	Троянди	Помідори

Місце розташування	Регіон Чукурова (Єнідже-Адана), Туреччина	Китай, Північно-Західний сільськогосподарський університет, провінція Шаньсі
Рівні зволоження по висоті	Один, на висоті 3,8 м	Один, на висоті 3 м
Технічні засоби	Система туманоутворення високого тиску автоматично підтримувала вологість повітря на рівні близько 60% протягом дня. У кожному з 11 прольотів теплиці встановлено по три лінії з 82 форсунками (крок 2,5 м). Вода подавалася через пом'якшувач, фільтри, резервуар, насос і регулятор тиску (4,5 атм). Керування здійснювалося кліматичним мікрокомп'ютером за даними датчиків температури сухого й вологого термометра. Полив ґрунту не застосовувався. Вентиляція забезпечувалася через автоматично регульовані отвори на даху (приблизно 10% відкриття).	Систему мікро-туману (форсунки) було налаштовано на автоматичне ввімкнення при перевищенні дефіциту тиску пари (VPD) понад 0,5 кПа. Форсунки, були розташовані на висоті 3 м над рослинами у вигляді рівномірної мережі, що охоплювала всю площу секції теплиці. Керування системою здійснювалося автоматично на основі показників температури та вологості, отриманих із датчиків, під'єднаних до контролера мікроклімату. Моніторинг температури, вологості й VPD проводився цифровими сенсорами, розташованими в центрі теплиці на висоті 2,5 м, із реєстрацією даних щохвилини. Повітрообмін забезпечувався природною вентиляцією через бокові фрамуги та дахові

		отвори, що сприяло перемішуванню зволоженого повітря. Полив ґрунту не застосовувався.
Динаміка процесу зволоження	Підтримання мікроклімату в теплиці здійснювалося шляхом роботи системи туманоутворення з 09:30 до 17:30. Протягом цього часу температура повітря всередині теплиці залишалася в середньому на 6,6 °С нижчою, ніж зовні, а відносна вологість збільшувалася приблизно на 25%. Ефективність системи охолодження змінювалась у межах 11,7–80%, середнє значення становило 50,5%. Максимальний охолоджувальний ефект досягався при найнижчій зовнішній вологості (близько 33%), коли температура всередині знижувалася до 30,5 °С. Система працювала автоматично, регулюючи подачу туману залежно від кліматичних умов,	Встановлення температури та вологості в теплиці протягом літнього дня здійснювалося автоматичним увімкненням системи мікро-туману при підвищенні VPD понад 0,5 кПа. Під час роботи система створювала дрібнодисперсний аерозоль, який знижував температуру повітря з ~34,7 °С до ~31,5 °С, а відносну вологість підвищував із 68,4 % до 83,7 %. Дефіцит тиску пари (VPD) зменшувався з 1,75 кПа до 0,75 кПа, що забезпечувало комфортні умови для фотосинтезу й росту рослин. Зволоження було рівномірним у межах робочого об'єму теплиці, без утворення конденсату на листках. Після припинення роботи системи мікроклімат стабілізувався поступово, а коливання температури та вологості залишалися в межах ± 1 °С і ± 3 %.

	забезпечуючи стабільний розподіл температури та вологості в усіх прольотах теплиці.	
Розповсюдження вологи по теплиці	примусова	Примусова
Вплив вологості ґрунту	Не досліджувався (рослини поливалися крапельно чотири рази на день)	Полив здійснювався окремо (система удобрення), але зволоження ґрунту не впливало на експеримент із мікро-туманом
Параметри	Теплиця з трьома методами охолодження	Теплиця з системою туманоутворення з емпіричною моделлю прогнозування температури
Геометрія та масштаб	Подвійна каркасна довжини, ширини та висоти «30 м × 12 м × 4 м»	довжини, ширини та висоти «8 м × 4 м × 3 м»
Продукція, яка вирощується	Гриб (шітаке)	Не вказано
Місце розташування	Регіон Гобі, південь Сіньцзян, Китай	Суранарі, Накхонратчасіма, Таїланд
Рівні зволоження по висоті	Один, на висоті 4 м	Один, на висоті 2,5 м
Технічні засоби	Систему обприскування (форсунки) було налаштовано на автоматичне	Система туманоутворення складалася з 18 форсунок, розташованих на висоті 2,5 м – 3

	ввімкнення і вимкнення з 10:00 до 20:00 за допомогою мікроконтролера Raspberry Pi. Установлено 92 форсунок на висоті 4 м — 4 ряди по 24 шт. з кроком 2 м по ширині та 1,25 м по довжині. Моніторинг проводився у 9 точках цифровими термометрами-гігрометрами. Полив ґрунту не застосовувався. Повітрообмін забезпечувався вентиляторами встановленими на колонах внутрішнього навісу та горизонтальних колонах, на висоті 0,45 м над землею, з проміжком 7,8 м між ними. (примусова вентиляція).	ряди по 6 шт. з кроком 0,67 м по ширині та 2 м по довжині. Керування роботою — автоматичне за допомогою контролера Arduino MEGA 2560, який вмикав систему при вологості нижче 80 %. Для вентиляції встановлено 2 витяжні вентилятори (14") та 2 циркуляційні (10"). Моніторинг температури й вологості проводився 3 датчиками DHT22; сонячну енергію вимірював радіометр TENMARS TM-206. Полив ґрунту не застосовувався.
Динаміка процесу зволоження	Середня ефективність охолодження теплиць NVC, WSC та FPC станом на 23 липня становила 24,6%, 65,2% та 48% відповідно. Середня ефективність	Система працює циклічно: туманоутворення вмикається при перевищенні вологості нижче 80% RH. Дані збиралися у двох режимах: Без зволоження і вентиляції

	охолодження протягом періоду охолодження (з 10:00 до 20:00) становить 28,5%, 68,1% та 56,3% відповідно. Максимальні значення становлять 43,2%, 79,2% та 72,3% відповідно. Мінімальні значення становлять 14,5%, 56,6% та 41,1% відповідно. Результати показують, що після початку охолодження ефективність охолодження теплиці WSC вища, ніж у теплиці FPC, яка також вища, ніж у теплиці NVC. Ефективність охолодження теплиць FPC та WS відносно близька, але ефективність охолодження зовнішньої системи обприскування (WSC) є більш стабільною.	(контрольний день) З активною системою туманоутворення Без системи температура в теплиці сягала 50,13 °C, при роботі системи знижувалася в середньому на 7,05 °C ($\approx 18,4\%$). Ефективність охолодження — 57,36% (без врахування сонячного впливу). При врахуванні сонячного випромінювання ефективність знижувалася через додаткове теплове навантаження.
Розповсюдження вологи по теплиці	Змішана	Примусова
Вплив вологості ґрунту	Не вказано	Не досліджувався

За результатами аналізу можна зробити висновок, що всі дослідження розповсюдження вологості в тепличному об'єкті проводилися на одному рівні. Вони є не коректними через те, що в них не враховано процеси тепломасопереносу.

1.4. Мета та задачі роботи

Мета дослідження

Забезпечення підтримання сталих значень показників вологості повітря за допомогою створення автоматизованої мехатронної системи керування форсунками з випереджуючим алгоритмом керуванням, що базується на процесах переносу водяної пари в середині замкнутого об'єму теплиці.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Теоретичне обґрунтування процесу переносу водяної пари в теплиці.
2. Розробити математичну та комп'ютерну моделі теплиці.
3. Провести модельні дослідження розповсюдження і стабілізації вологості повітря по об'єму.
4. Розробити загальну структуру гідравлічної системи зволоження повітря та її розташування в теплиці.
5. Підібрати виконавчі пристрої, засоби контролю і керування.
6. Розробити програму для керування виконавчими пристроями.

РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІЇ КЕРУВАННЯ МЕХАТРОННОЮ СИСТЕМОЮ ЗВОЛОЖЕННЯ ПОВІТРЯ

2.1. Особливості автоматизованих систем управління мікрокліматом в тепличному об'єкті

До складу адаптивної системи керування мікрокліматом у промислових теплицях зазвичай входить [13]:

- центральна станція керування (персональний комп'ютер);
- метеостанція з датчиками (вологості, температури, CO₂, вітру, освітленості);
- мікропроцесорних контролерів;
- аналогових вимірювальних каналів;
- дискретних контролюючих каналів;
- каналів управління;

На (рисунку 2.1) зображено приклад роботи кліматичної системи теплиці та її основних вузлів, які забезпечують належні умови для вирощування рослин. Тепличні технології останніми роками привертають дедалі більше уваги дослідників, оскільки дають змогу суттєво збільшити виробництво харчових культур, особливо там, де природні умови не завжди сприяють росту.

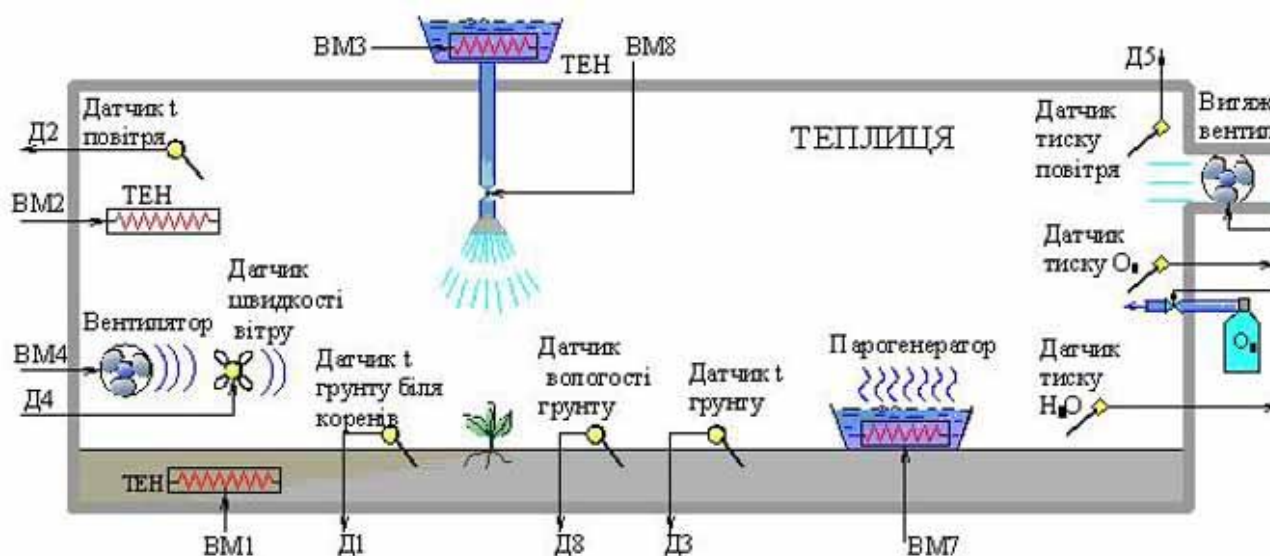


Рис. 2.1. Система кліматичного контролю теплиці [12]

Управління мікрокліматом у теплиці охоплює регулювання кількох ключових параметрів: температури, вологості, рівня освітлення та концентрації CO₂. Від їх поєднання багато в чому залежить, наскільки швидко та якісно розвиватимуться рослини. Для цього система постійно фіксує як внутрішні показники, так і зовнішні зміни: температуру повітря, напрям і силу вітру, вологість, інтенсивність освітлення тощо. Разом із тим забезпечити точне відстеження цих показників непросто. Тепличні системи поведуться не лінійно, їх параметри змінюються з плином сезонів, а зовнішні кліматичні фактори можуть створювати додаткові коливання. Через це моделювання мікроклімату зазвичай ґрунтується на енергетичних балансах і фізичних співвідношеннях, що дозволяє краще розуміти взаємозв'язки між вхідними та вихідними величинами. [14,15]

Оскільки класичні методи регулювання не завжди дають бажану точність, у сучасних теплицях, дедалі частіше застосовують інтелектуальні системи керування. Зокрема, ідеться про підходи на основі нечіткої логіки або нейронних мереж. Такі алгоритми краще реагують на зміни умов і дають змогу підтримувати стабільне середовище для рослин навіть за непередбачуваних зовнішніх впливів. [14]

Під час аналізу існуючих систем керування, можемо спостерігати за еволюцією методів регулювання тепличних процесів та розвитком основних підходів. Тому до більш детального огляду, було обрано інтелектуальні системи котрі базуються на основі нечіткої логіки та нейронних мережах. [14,15,16,17].

Одним з перших широко використовуваних методів, було пропорційно-інтегрально-диференціальне (ПІД) керування, яке забезпечувало регулювання переважно окремих параметрів середовища. Подальший прогрес привів до появи алгоритмів нечіткого керування, що дали змогу одночасно враховувати та коригувати кілька взаємопов'язаних факторів мікроклімату.

Операційна структура нечіткої системи керування подана на (рис.2.2). У ній нечіткий контролер працює разом із класичним PID-регулятором: нечітка частина відповідає за автоматичне коригування PID-параметрів у процесі

роботи, тоді як сам PID-контролер виконує безпосереднє керування об'єктом на основі цих оновлених значень.

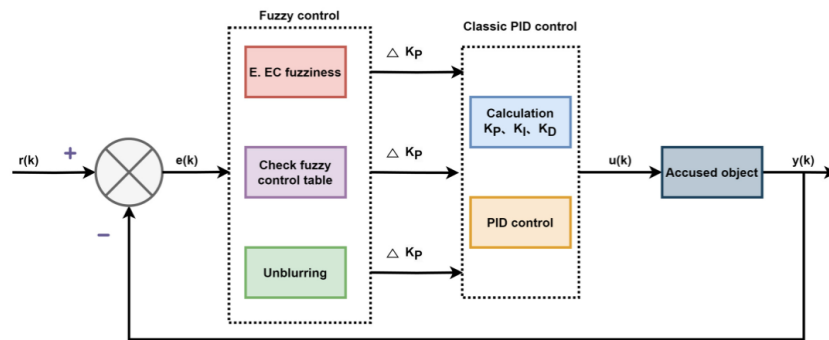


рис. 2.2 – Модель системи керування нечітким PID. [16]

У ролі вхідних сигналів нечіткий контролер отримує поточну помилку (E) та швидкість її зміни (EC). Далі процес відбувається відповідно до стандартної логіки нечіткого керування — спочатку вхідні дані переводяться у нечіткі множини (фазифікація), після чого активуються відповідні правила, а потім результати знову подаються у вигляді чітких значень (дефазифікація) [16,15].

На виході контролер формує три коригувальні впливи — ΔK_P , ΔK_I та ΔK_D . Ці значення передаються в PID-контролер і дозволяють у реальному часі змінювати його коефіцієнти. Така комбінація забезпечує точніше регулювання та робить систему значно стійкішою до змін і нестабільності середовища [16,15].

З поширенням інтелектуальних технологій значної уваги набуло нейромережеве керування. Представлена модель типу багатошарового перцептрону (MLP) (рис.2.3) [17].

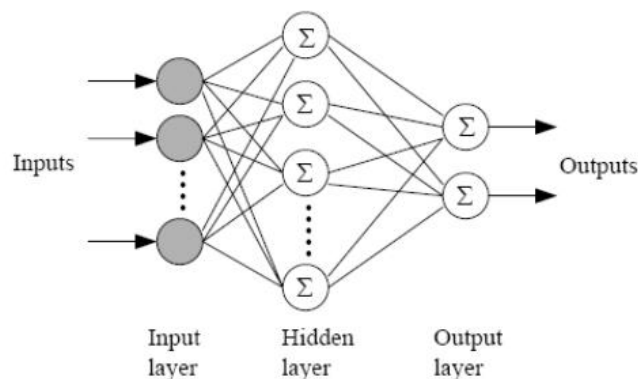


Рис. 2.3. Модель штучної нейронної мережі MLP [17]

Структура мережі включає вхідний шар, один прихований шар з 10 нейронами та вихідний шар. Вхідними параметрами слугували: зовнішня температура та вологість, сонячна радіація, стан вікон, екрану, опалення та освітлення. Вихідні величини — внутрішня температура та відносна вологість. Використаний алгоритм для налаштування значень ваги та зміщення - це алгоритм Левенберга-Марквардта. Передаточна функція прихованого шару має сигмоподібний тип, а вихідний шар має лінійну передаточну функцію [15,17].

Нейромережеве керування зменшує потребу у формуванні складних моделей, дозволяє навчати систему на основі експериментальних даних і забезпечує високу точність прогнозування та реагування. У багатьох випадках такий підхід демонструє кращу якість керування порівняно з традиційними методами [15,17].

У таблиці 2.1 узагальнено основні переваги, недоліки та сфери доцільного застосування різних методів керування. З огляду на сучасні тенденції розвитку автоматизації, очікується, що в майбутніх системах керування дедалі більшу роль відіграватимуть нейромережеві підходи, поступово витісняючи традиційні методи [15].

Такий висновок пов'язаний передусім з властивістю штучних нейронних мереж працювати без необхідності побудови складних математичних моделей об'єкта. Для їх навчання достатньо часткових або неповних даних, а завдяки здатності до узагальнення вони забезпечують точніше прогнозування поведінки системи та більш гнучке налаштування параметрів контролера. Це робить нейромережеві алгоритми перспективними для використання в задачах керування тепличними мікрокліматичними системами [15,17,16].

Таблиця 2.1

ПОРІВНЯЛЬНА ТАБЛИЦЯ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ

Алгоритми керування	Переваги	Недоліки	Сценарії застосування
ПД-регулювання	1. Проста структура контролера	1. Важко контролювати	1. Контроль індивідуальних

		кілька змінних одночасно	параметрів 2. Первинний контроль теплиці
Нечітке керування	1. Немає потреби в точному моделюванні	1. Погана продуктивність у реальному часі 2. Обмеження базою правил	1. Багатовимірна теплична система 2. Керування нелінійними системами
Керування зворотним зв'язком	1. Висока точність 2. Передбачувана поведінка реакції	1. Високі вимоги до точності датчиків	1. Сценарії точного контролю навколишнього середовища 2. Вимоги до контролю в режимі реального часу
Адаптивне керування	1. Висока здатність адаптивного керування системою 2. Легка само- оптимізація	1. Нестабільність системи на початковій фазі 2. Складність розробки та обслуговування системи	1. Можливості само-коригування стратегій контролю у відповідь на зміни навколишнього середовища
Модель прогнозного керування	1. Прогнозування майбутньої динамічної поведінки системи 2. Можливість	1. Обчислювальна складність 2. Висока залежність від моделі	1. Керування багатовимірними системами 2. Динаміка складних систем

	оптимізації з кількома обмеженнями		
Нейронне мережеве керування	1. Хороші навички самостійного навчання 2. Здатність обробляти дані часових рядів	1. Високий попит на дані 2. Високі вимоги до часу навчання та обчислювальних ресурсів	1. Сценарії застосування, що поєднують прогнозування та керування 2. Системи, що потребують адаптивних можливостей
Гібридне керування	1. Інтеграція кількох методів керування 2. Висока точність керування та швидкість відгуку	1. Складне проектування та введення в експлуатацію 2. Високі вимоги до реального часу 3. Складно та дорого реалізувати	1. Багатовимірні та невизначені системи 2. Системи, що потребують адаптивних можливостей 3. Сценарії, що поєднують прогнозування та керування

Провівши аналіз систем керування вологістю повітря в тепличному об'єкті можна зробити висновок, що поєднання систем мікроклімату в теплиці відповідає зазначеним термодинамічним процесам в середині замкненого об'єму (рис.2.4) [19,32,33].



Рис. 2.4. Структура мехатронної системи з моделлю теплиці[19,32,33]

2.2. Розробка принципової гідравлічної схеми

Засобами керування вологості повітря в тепличному об'єкті є датчики температури та вологості, а виконавчими пристроями: ємність, насоси, фільтри. Для роботи мехатронної системи зволоження необхідно управляти клапанами та форсунками. Тому була розроблена принципова гідравлічна схема для системи зволоження повітря в тепличному об'єкті (рис.2.5).

При включенні насосної станції НС вода подається в систему через фільтр Ф, котрий забезпечує попереднє очищення рідини перед надходженням до основних агрегатів. Після фільтру встановлений зворотній клапан КЗ1, який пропускає рідину лише в одному напрямку та запобігає зворотного перетікання в лінію всмоктування.

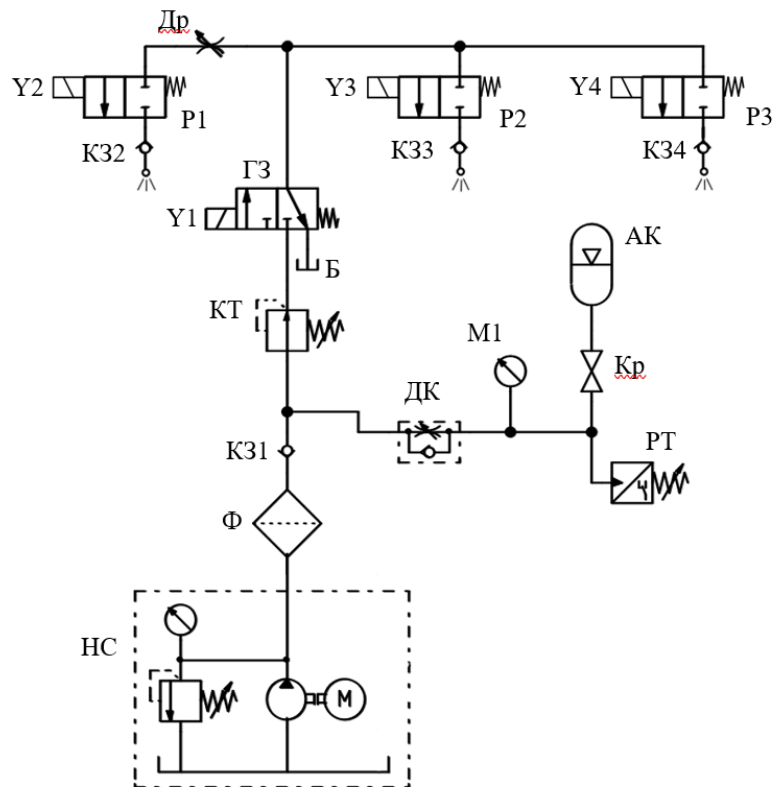


Рис.2.5. Гідравлічна принципова схема

Після зворотного клапану встановлений трійник, котрий під'єднує до основної магістралі систему інжектора «Вентурі», котра встановлена для додавання добрив у воду. До складу інжектора входить регулятор тиску РТ, для створення необхідного перепаду тиску та редукційний кран Кр до якого під'єднаний гідроаккумулятор АК, котрий компенсує пульсації потоку та стабілізує процес подачі добрив. Манометр М1 встановлено для контролю тиску в лінії подачі добрив, та в кінці системи встановлено регульований дросель з зворотним клапаном ДК, через який і здійснюється подача добрив до центральної магістралі. Після цього змішана рідина подається на редукційний клапан КТ, який налаштований на зниження тиску в системі. При перемиканні гідравлічного замка ГЗ з закритого положення у відкрите, забезпечує подачу води до трьох керованих гідро- розподільників (Р1-Р3) тобто, будь який з них при потребі закривається, це зроблено для можливості зволоження тільки потрібної нам секції в теплиці, зворотними клапанами (К32-К34) умовно показані форсунки, в корпусі яких присутній цей клапан. Бак Б, резервуар з якого беруть воду.

2.3. Гідравлічний розрахунок

Завдання розрахунку полягає у встановленні діаметрів труб та обчисленні втрат тиску, які відбуваються під час переміщення робочої рідини через труби. Після проведення всіх розрахунків було підібрано все гідравлічне обладнання, яке задовольнить вимоги системи.

Для отримання потрібних значень витрати було проведено аналіз існуючих форсунок та обрано характеристику форсунки від компанії «UltiMist» (рис 2.6), яка має наступні характеристики (Табл.2.2):

Таблиця 2.2

Характеристики форсунки «UltiMist»

Трубне з'єднання розмір	R 1/4"
Кут розпилення	80°
Середній діаметр краплі	60 – 80 мкм
Робочий тиск	0.3 МПа (або 3 бар)
Ємність розпилювача	0.5 – 2 л/год
Діаметр вільного проходу	0.1 - 0.2 мм



Рис.2.6. Форсунка від компанії UltiMist [18]

Форсунка, яка використовується в нашій системі має наступні характеристики: витрата однієї форсунки $Q = 2$ л/год або $Q = 0,033$ л/хв та її робочий тиск 3 bar. Отже за результатами дослідів, щодо погодинної зміни вологості повітря протягом дня, щоб забезпечити зволоження в теплиці потрібно

використати 3 форсунки, виходячи з наявних даних витрата в системі буде, $Q = 0,1$ л/хв.

Вибір розмірів трубопроводів:

Модель теплиці з розташуванням труб для зволоження та насосної станції (рис 2.7) [19]

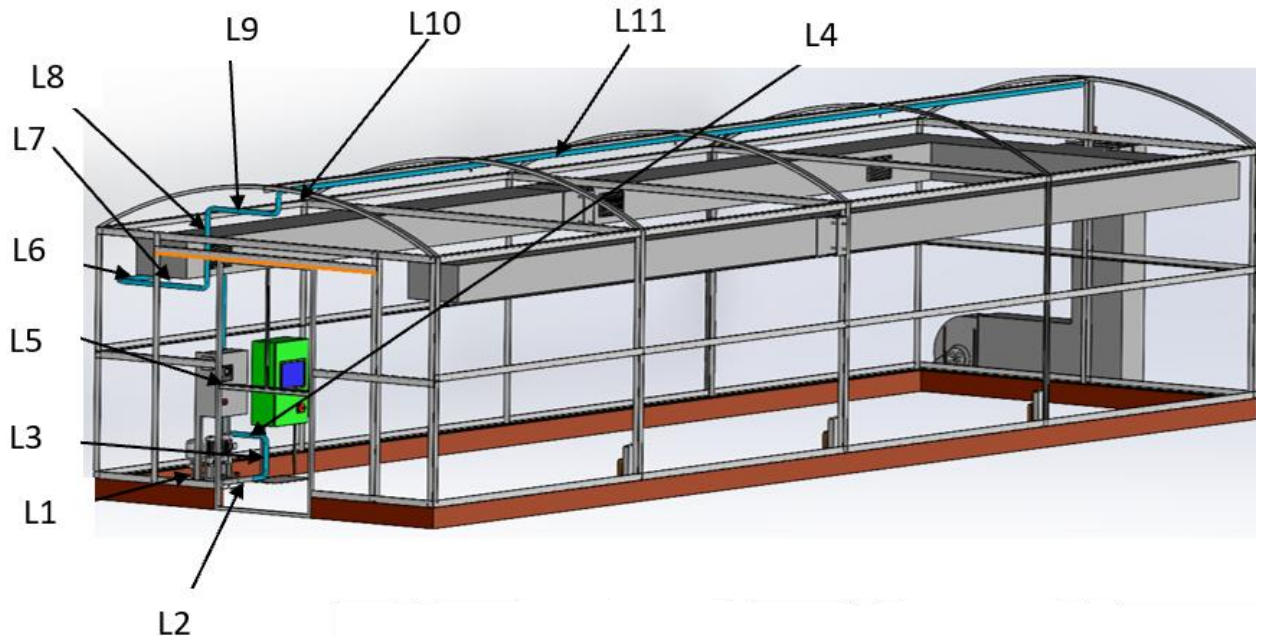


Рис.2.7. Загальний вигляд теплиці [19]

Було взято з вже готового зразку, довжини трубопроводів:

- Для всмоктувального трубопроводу:

$$l_1 = 0,35 \text{ м};$$

- Для напірного трубопроводу:

$$l_2 = 0,40 \text{ м};$$

$$l_3 = 0,30 \text{ м};$$

$$l_4 = 0,35 \text{ м};$$

$$l_5 = 1,3 \text{ м};$$

$$l_6 = 1,1 \text{ м};$$

$$l_7 = 1 \text{ м};$$

$$l_8 = 0,5 \text{ м};$$

$$l_9 = 0,5 \text{ м};$$

$$l_{10} = 0,27 \text{ м};$$

$$l_{II} = 6,80 \text{ м};$$

Розрахунки слід проводити на ділянках трубопроводу, які мають однаковий рівень витрати. Кожна така ділянка включає в себе трубопровід, оснащений місцевими опорами, такими як трійники, штуцери, коліна, та інші гідроапарати.

Формула для розрахунку внутрішнього діаметру трубопроводу в теплиці [20, с.56]:

$$d_H = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\max H}}{V_H}},$$

де $Q_{\max H}$ – максимальна витрата на напірній лінії, V_H – середня швидкість потоку рідини на напірній лінії.

Середню швидкість рідини вибирають у залежності від призначення трубопроводу:

для всмоктувальних $V=1,2 \text{ м/с}$;

для зливних $V= 2 \text{ м/с}$;

для напірних $V= 3...4 \text{ м/с}$.

Для виконання подальших розрахунків нам потрібно перевести одиниці вимірювання з л/хв в $\text{м}^3/\text{с}$ $Q = 0,1 \text{ л/хв} = > \frac{0,1}{1000 \cdot 60} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$

Внутрішній діаметр трубопроводів для всмоктувальної лінії від НС визначається за формулою:

$$d_H = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\max H}}{V_H}} = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{1,67 \cdot 10^{-6}}{1,2}} = 0,00543 \text{ м.}$$

Згідно держстандарту 8732-78 приймаємо $d_H = 6 \text{ мм}$.

Внутрішній діаметр трубопроводів для напірної лінії визначається за формулою:

$$d_H = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\max H}}{V_H}} = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{1,67 \cdot 10^{-6}}{3}} = 0,0034 \text{ (м)}.$$

Згідно держстандарту 8732-78 приймаємо $d_H = 4 \text{ мм}$.

За прийнятим діаметром визначаємо дійсну швидкість руху рідини в трубопроводі [20, с.56]:

Всмоктувальний:

$$V_v = 4 \cdot Q / \pi \cdot d_m^2 = \frac{4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,006^2} = 0,059 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Напірний:

$$V_n = 4 \cdot \frac{Q}{\pi} \cdot d_m^2 = \frac{4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,004^2} = 0,133 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Визначення втрат по довжині трубопроводу

Гідравлічні втрати в гідросистемі складається з трьох частин [20]:

- Втрати на гідравлічне тертя Δp_T ;
- Втрати на місцевих опорах Δp_M ;
- Втрати у гідроапаратах Δp_d .

Втрати тиску на тертя

$$\Delta p_T = (0,5 \rho L \lambda V^2) / d_m,$$

де ρ - густина ; λ - коефіцієнт тертя; L - довжина ділянки; d_m - діаметр труби або шлангу; V - середня швидкість рідини; [20, с.57].

Коефіцієнт тертя λ залежить від режиму руху рідини й визначається по числу Рейнольдса [20, с.57]:

$$Re = Vd/\nu,$$

де: V – швидкість потоку рідини; d – внутрішній діаметр трубопроводу;

ν – кінематична в'язкість рідини;

При ламінарному русі рідини ($Re < 2320$).

З огляду на можливості звуження й скривлення перетину труби при практичних розрахунках приймають [20, с.57]:

$$\lambda = 75 / Re.$$

При турбулентному русі ($Re \geq 2320$) коефіцієнт тертя λ залежить від числа Рейнольдса й від відносної шорсткості стінок каналу. Сталеві труби мають шорсткість $\Delta = 0,03\text{мм}$.

- Вирахуємо втрати на гідравлічне тертя на всмоктувальній лінії ($l=0,35\text{м}$)

$$\Delta p_T = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 0,35 \cdot 0,213 \cdot 0,059^2}{0,006} = 21,6 \text{ Па},$$

де число Рейнольда $Re = \frac{0,059 \cdot 0,006}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 352,6 < 2320$ - ламінарний режим руху;

Коефіцієнт гідравлічного тертя з урахуванням місцевого опору:

$$\lambda = \frac{75}{352,6} = 0,213;$$

- Вирахуємо втрати на гідравлічне тертя на напірній лінії ($l = 12,52\text{м}$)

$$\Delta p_T = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 12,52 \cdot 0,142 \cdot 0,133^2}{0,004} = 3931 \text{ Па},$$

де коефіцієнт Рейнольда $Re = \frac{0,133 \cdot 0,004}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 529,9 < 2320$ – ламінарний режим

Коефіцієнт коефіцієнт гідравлічного тертя з урахуванням місцевого опору:

$$\lambda = \frac{75}{529,9} = 0,142.$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 2.3

Таблиця 2.3

Розрахунок втрат на тертя по довжині

Номер ділянки	$L, \text{ м}$	$d, \text{ мм}$	$Q, \text{ л/хв.}$	$V, \text{ м/с}$	Re	λ	$\Delta p_T, \text{ Па}$
1	0,35	6	0,1	0,059	352,6	0,213	21,6
2	12,52	4	0,1	0,133	529,9	0,142	3931

Загальні втрати на кожній секції розрахуємо, як суму окремих втрат:

$$\Delta p_T = 21,6 + 3931 = 3952,6 \text{ Па}.$$

Втрати на місцевих опорах:

Втрати на місцевих опорах визначимо за формулою [20, с.58]:

$$\Delta p_M = 0,5 \rho \xi V^2,$$

де ξ - коефіцієнт місцевого опору.

Місцевими втратами на лінії всмоктування є:

- Вхід у фільтр $\xi = 0,9$.
- Вихід з фільтру $\xi = 0,7$.

Отже маємо:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,0059^2) + (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 0,0059^2) = 0.028 \text{ Па.}$$

Місцевими втратами на лінії нагнітання є:

- Вхід у розподільник $\xi = 0,9$.
- Вихід з розподільника $\xi = 0,7$.
- Трійник $\xi = 2,5$ (4 штуки).
- Редукційний клапан $\xi = 2,2$.
- Регулятор витрати $\xi = 2$.
- Вхід у фільтр $\xi = 0,9$.
- Вихід з фільтру $\xi = 0,7$.
- Коліно закруглене $\xi = 0,15$ (9 штуки).
- Гідравлічний замок $\xi = 1,5$ (3 штук).
- Запірний клапан $\xi = 2$ (3 штук).

Втрати на розподільнику:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,133^2) + (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 0,133^2) = 14,15 \text{ Па.}$$

Втрати на трійниках:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (2,5 \cdot 4) \cdot 0,133^2) = 88,45 \text{ Па.}$$

Втрати на редукційному клапані:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 2,2 \cdot 0,133^2) = 19,46 \text{ Па.}$$

Втрати на регуляторі витрати:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 0,133^2) = 17,69 \text{ Па.}$$

Втрати на фільтрі:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,133^2) + (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 0,133^2) = 14,15 \text{ Па.}$$

Втрати на коліно закруглене:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (0,15 \cdot 9) \cdot 0,133^2) = 11,94 \text{ Па.}$$

Втрати на гідравлічному замку:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (1,5 \cdot 3) \cdot 0,133^2) = 39,8 \text{ Па.}$$

Втрати на запірному клапані:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (2 \cdot 3) \cdot 0,133^2) = 53,07 \text{ Па.}$$

Загальні втрати на кожній секції розрахуємо, як суму окремих втрат:

$$\Delta p_M = 14,15 + 88,45 + 19,46 + 17,69 + 14,15 + 11,94 + 39,8 + 53,07 = 258,71 \text{ Па.}$$

Результати розрахунків додаємо до таблиці 2.4

Таблиця 2.4

Розрахунок втрат на місцевих опорах

Вид опору	Кількість	ζ	Δp_M , Па
Трійник	4	2,5	88,45
Фільтр	2	1,6	14,18
Розподільник	1	1,6	14,15
Редукційний клапан	1	2,2	19,46
Регулятор витрати	1	2	17,69
Коліно закруглене	9	0,15	11,94
Гідравлічний замок	3	1,5	39,8
Запірний клапан	3	2	53,07

Розрахунок втрат на гідроапаратах

Для розрахунку втрат треба підібрати більшу частину обладнання гідросистеми та взяти значення втрат з каталогів.

- Втрати на регуляторі витрати HERZ 3F90023 [23]:
З характеристики регулятора витрати $\Delta p_d = 0,02$ МПа.
- Втрати на промивному фільтрі Hunter (HFR-100-075-40) 1" [25]
З характеристики фільтра $\Delta p_d = 0,001$ МПа.
- Втрати на розподільнику SIRAI L145R2-Z614A1/2x10 G1/2" PN 0,4-6 [27]:
З характеристики розподільника $\Delta p_d = 0,006$ Мпа.
- Втрати на гідрозамку Runxin RX pl 24B $\frac{3}{4}$ [26]:
З характеристики гідрозамка $\Delta p_d = 0,001$ МПа.

Загальні втрати на гідроапаратах в системі зволоження повітря:

$$\Delta p_d = 0,02 + 0,001 + 0,006 + 0,001 = 0,028 \text{ МПа.}$$

Загальні втрати всієї гідросистеми:

$$\Delta p = \Delta p_T + \Delta p_M + \Delta p_d.$$

Система зволоження повітря:

$$\Delta p = 0,0039526 + 0,00025874 + 0,028 = 0,0322 \text{ МПа.}$$

2.4. Підбір гідравлічного обладнання

В цьому підрозділі виконується підбір потрібних гідроапаратів для реалізації системи зволоження повітря в телиці. На зображеннях буде показано реальний вигляд апарату та його позначення на схемі.

Насосна станція 2 GP(E) MATRIX 3-3/0,65 (M), яка має наступні характеристики (табл.2.5):

Таблиця 2.5

Характеристики насосної станції

Модель				Потужність двигуна, кВт			Максимальний тиск, МПа			
2GP(E)MATRIX 3-3/0,65 (M)				0,65			1,0			
Продуктивність										
л/хв	40	60	90	120	160	200	260	320	400	500
м3/год	2,4	3,6	5,4	7,2	9,6	12,0	15,6	19,2	24,0	30,0

Редуктор тиску води Honeywell D05FS-1A має наступні характеристики (табл.2.6) [22]:

Таблиця 2.6

Характеристики редукційного клапана

Модель	Вхідний тиск, бар	Вихідний тиск, бар
Honeywell D05FS-1A	25,0	1,5-6

Витратомір HERZ має наступні характеристики (табл.2.7):

Таблиця 2.7

Характеристики редукційного клапана

Модель	Діапазон регулювання, л/хв
HERZ	0-3

Манометр має наступні характеристики (табл.2.8):

Таблиця 2.8

Характеристики манометра

Модель	Тип	Діапазон вимірювання тиску, бар	Клас точності
AFRISO	RF 50 RAD	0-10	2,5

Фільтр сітчастий має наступні характеристики (табл.2.9) [25]:

Таблиця 2.9

Характеристики фільтра

Модель	Розмір підключення	Регулювання тиску, бар	Пропускна здатність	Робочий тиск, бар	Робоча температура, °C
Hunter (HFR-100-075-40) 1"	вхід 1" NPT, вихід ¾"	2,8 (40 PSI)	від 2 до 55 л/хв (0,5–15 GPM).	1,4 - 8 (20–120 PSI)	49

Гідравлічний замок має наступні характеристики (табл.2.10):

Таблиця 2.10

Характеристики гідравлічного замка

Модель	Діаметр крана	Номінальний тиск, бар	Час спрацювання, сек
Runxin RX pl	¾	10	3

Розподільник має наступні характеристики (табл.2.11):

Таблиця 2.11

Характеристики розподільника

Модель	Тип клапана	Робочий тиск, бар	Матеріал корпусу	Температура середовища, °C
SIRAI L145R2- Z614A1"	2/2 нормально закритий (NC), пілотного керування.	від 0,4 до 6 бар	латунь, ущільнювач із підсиленого PTFE	від +60°C до +170°C

Було розроблено модель форсунки, на основі форсунки від компанії «UltiMist» [18]. На (рисунку 2.8) показана 3D модель форсунки, характеристики наведені в таблиці 2.12. У форсунці вбудовано зворотній клапан для запобігання виток рідини.

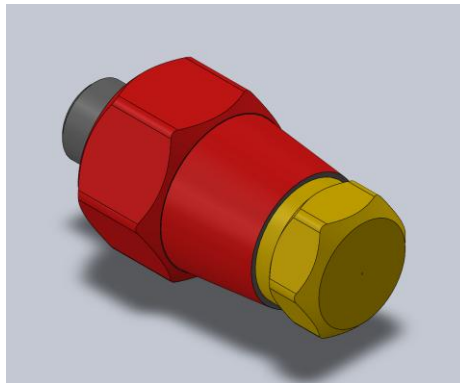


Рис.2.8. 3-D модель форсунки

Таблиця 2.12

Характеристики форсунки

Витрата, л/хв	Тиск, бар	Кут розпилення, °	Матеріал
0.01- 0.033	1 до 3	90	нержавіюча сталь

2.5. Висновки до розділу

Проаналізувавши відомі рішення стосовно автоматизованого управління макрокліматом теплиці зрозуміло, що в основі всіх процесів управління мають враховуватися термодинамічні процеси в середині замкненого об'єму.

На основі досліджень, проведених у цьому розділі, було виявлено ключові компоненти гідравлічної системи зволоження повітря в теплиці, а також розроблено принципову гідравлічну схему.

Згідно з цією схемою було проведено розрахунки та підбір гідравлічного обладнання. Також були визначені втрати тиску в системі та діаметри трубопроводів.

Для системи зволоження повітря в теплиці була розроблена форсунка туманоутворення на базі існуючого аналогу, що забезпечило чітке розуміння відповідності форсунки вимогам системи.

РОЗДІЛ 3. ТЕПЛО-МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ В ТЕПЛИЦІ

3.1. Математичний опис фізичних процесів в середині теплиці

Стале значення вологості повітря в середині теплиці забезпечується тепло-масообмінними процесами в теплиці, яке пов'язане з температурою повітря в середині об'єкта.

Тому було розглянуто загальні рівняння теплових потоків повітря. Рівняння теплового балансу енергії, [32]:

$$\rho * V * C_{\text{тепл}} * \frac{dT(t)}{dt} = Q_{\text{надх}} - (Q_{\text{втрати}} + Q_{\text{свіж}}), \quad (3-1)$$

де:

V – об'єм повітря, м^3 ;

$C_{\text{тепл}}$ – питома теплоємність повітря, $\text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

$T(t)$ – температура повітря всередині теплиці, $^\circ\text{C}$;

$Q_{\text{надх}}$ – теплові надходження від системи обігріву кВт ;

$Q_{\text{втрати}}$ – втрати теплоти кВт ;

$Q_{\text{свіж}}$ – втрати теплоти на обігрів свіжого повітря, кВт .

Після розгляду загальних рівнянь теплового балансу було розглянуто аеродинамічні процеси по рівнянням Нав'є-Стокса [32]:

$$\rho \cdot \left[\frac{dW_x}{dt} + \frac{dW_x}{dx} + \frac{dW_x}{dy} + \frac{dW_x}{dz} \right] = \rho g x - \frac{dp}{dx} + \mu \left(\frac{d^2 W_x}{dx^2} + \frac{d^2 W_x}{dy^2} + \frac{d^2 W_x}{dz^2} \right) \quad (3-18)$$

$$\rho \cdot \left[\frac{dW_y}{dt} + \frac{dW_y}{dx} + \frac{dW_y}{dy} + \frac{dW_y}{dz} \right] = \rho g y - \frac{dp}{dy} + \mu \left(\frac{d^2 W_y}{dx^2} + \frac{d^2 W_y}{dy^2} + \frac{d^2 W_y}{dz^2} \right) \quad (3-19)$$

$$\rho \cdot \left[\frac{dW_z}{dt} + \frac{dW_z}{dx} + \frac{dW_z}{dy} + \frac{dW_z}{dz} \right] = \rho g z - \frac{dp}{dz} + \mu \left(\frac{d^2 W_z}{dx^2} + \frac{d^2 W_z}{dy^2} + \frac{d^2 W_z}{dz^2} \right) \quad (3-20)$$

де:

$\rho(\frac{dW_x}{dx} + \frac{dW_y}{dy} + \frac{dW_z}{dz})$ – конвективний член;

$\rho g x$ – гравітаційний член;

$\frac{dp}{dx}$ – зміна тиску в потоці;

$\mu (\frac{d^2 W_x}{dx^2} + \frac{d^2 W_y}{dy^2} + \frac{d^2 W_z}{dz^2})$ – дисипативний член;

g – прискорення вільного падіння;

μ – динамічна в'язкість середовища;

P – тиск, Па;

$W_x W_y W_z$ – векторне поле швидкостей;

t – час, год.

Для чисельного розрахунку руху повітря за рівнянням Нав'є-Стокса було додано рівняння нерозривності для стисливого середовища [32]:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{d(\rho W_x)}{dx} + \frac{d(\rho W_y)}{dy} + \frac{d(\rho W_z)}{dz} = 0. \quad (3-21)$$

Процеси змін температурного режиму в тепличному об'єкті описується залежністю:

$$\frac{dT}{dt} + W_x \cdot \frac{dT}{dx} + W_y \cdot \frac{dT}{dy} + W_z \cdot \frac{dT}{dz} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \cdot \left(\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right), \quad (3-22)$$

де:

$W_x \cdot \frac{dT}{dx} + W_y \cdot \frac{dT}{dy} + W_z \cdot \frac{dT}{dz}$ – конвективний член;

T – температура, °C;

$W_x W_y W_z$ – векторне поле швидкостей;

t – час.

Фізичний опис течій робочої рідини та тепло-масопередачі для теплиці складаються з трьох законів збереження: маси, імпульсу та енергії (рівняння 1-5) [29].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = S_m \quad (1)$$

де, S_m – маса, додана до безперервної фази.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + d i v (\rho u u) = d i v (\mu g r a d u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + d i v (\rho v u) = d i v (\mu g r a d v) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_v, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + d i v (\rho \omega u) = d i v (\mu g r a d \omega) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_\omega, \quad (4)$$

$grad() = \frac{\partial ()}{\partial x} + \frac{\partial ()}{\partial y} + \frac{\partial ()}{\partial z}$; S_u, S_v та S_ω є узагальненими членами джерела імпульсу.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + P)) = \frac{\partial}{\partial x_i}(keff \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j(\tau_{ij})_{eff}) + S_h, \quad (5)$$

де, $keff$ – ефективний коефіцієнт пропускання, а h – видима ентальпія ідеального газу.

Оскільки необхідно враховувати зміну вологості повітря в теплиці, то до розрахункового рівняння необхідно додати рівняння переносу вологи, щоб розглядати робочу рідину у теплиці як суміш чистого повітря та водяної пари (вологе повітря) [29].

Вологе повітря підпорядковується закону Дальтона [30].:

$$P_6 = P_{сп} + P_n, \quad (6)$$

де:

$P_{сп}$ та P_n – парціальні тиски сухого повітря й водяної пари.

Кількість водяної пари в 1 м³ повітря визначається [30].:

$$\rho_n = \frac{m_n}{V_n}, \quad \text{кг/м}^3.$$

Відповідно до рівняння (6) відношення густин компонентів робочої рідини можна замінити відношенням парціальних тисків [31]:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_{nmax}} = \left(\frac{p_n = \rho_n \cdot R_n \cdot T}{p_{nmax} = \rho_{nmax} \cdot R_n \cdot T} \right) = \frac{p_n}{p_{nmax}} = \frac{p_n}{p_H},$$

де:

p_n – парціальний тиск водяної пари у вологому повітрі; p_{nmax} – максимально можливий парціальний тиск водяної пари.

Вологовміст визначається як [30]:

$$d = \frac{m_n}{m_{c.n}} = 0,622 \cdot \frac{P_n}{P_6 - P_n}, \quad \frac{\text{кг. пари}}{\text{кг. сух. п.}}$$

Густина вологого повітря визначається як [30]:

$$\rho_{в.н} = \rho_n + \rho_{с.н}, \text{ або } \rho_{в.н} = \frac{28,96 \cdot P_6 - 10,94 \cdot P_n}{8314 \cdot T_{в.н}}$$

де:

P_6 – барометричний тиск повітря;

$T_{в.п.}$ – температура вологого повітря, К;

$\rho_{с.п.}$ – густина сухого повітря (с.п.).

$$\rho_{в.н} = \rho_{с.н}(1 + d) = \rho_n \cdot \frac{1 + d}{d}.$$

Теплоємність вологого повітря буде мати вигляд [30]:

$$c_{рв.н} = c_{рс.н} c_n \cdot d = 1 + 1,96 \cdot d, \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Загальне рівняння ентальпії вологого повітря визначається [30]:

$$I = i_{с.н} + i_n \cdot d;$$

$$I = t + (2500 + 1,96 \cdot t) \cdot d, \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг с. п.}}.$$

Отже, рівняння переносу водяної пари матиме вигляд [29]:

$$\frac{\partial(\rho\gamma_i)}{\partial t} + \nabla(\rho v\gamma_i) = -\nabla J_i + R_i + S_i$$

де:

R_i – це швидкість хімічної реакції;

S_i – визначається як вихідний член та додаткова швидкість дискретної фази;

∇J_i – це дифузійний потік речовини, що виникає внаслідок градієнта концентрації.

Далі обчислюємо ентальпію вологого повітря, яка задовольняє рівняння збереження енергії [29]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega h)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial z} \right) + S_h \end{aligned}$$

де:

Γ_h – ефективний коефіцієнт дифузії ентальпії;

Концентрація водяної пари а у вологому повітрі задовольняє рівняння збереження маси [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \gamma_{\omega})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u \gamma_{\omega})}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v \gamma_{\omega})}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w \gamma_{\omega})}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_y \frac{\partial \gamma_{\omega}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_y \frac{\partial \gamma_{\omega}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_y \frac{\partial \gamma_{\omega}}{\partial z} \right) + S_c \end{aligned}$$

де:

Γ_y та S_c – коефіцієнт дифузії та вихідний член водяної пари відповідно.

Зв'язок між масовою концентрацією водяної пари та вмістом вологи такий:

$$\gamma_{\omega} = \frac{d_{\omega}}{1 + d_{\omega}}$$

Тут d_{ω} – вміст вологи у вологому повітрі, %.

Процес радіаційного теплопередачі між внутрішнім об'ємом теплиці та зовнішнім простором визначається як[29]:

$$\nabla (I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\alpha_{\lambda} + \sigma_s) I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha_{\lambda} n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega'$$

де:

I_{λ} – являє собою монохроматичну яскравість, Вт/ (м²ср¹);

$r \rightarrow$ представляє вектор положення Сонця;

$s \rightarrow$ представляє вектор напрямку сонячної енергії;

α_{λ} – являє собою спектральний коефіцієнт поглинання;

σ_s – являє собою коефіцієнт розсіювання;

σ – представляє константу Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,669 \times 10^{-4}$ Вт / м²К⁻⁴ ;

n – являє собою показник заломлення;

Φ – являє собою фазову функцію дифузії;

$d\Omega'$ – представляє тілесний кут.

Вплив рослин на вологість повітря додається, як член джерела відповідно до закону Дарсі-Форхгеймера [29]:

$$S_u = \left(-\frac{\mu}{\alpha} u \right) + \left(-C_u \cdot \frac{1}{2} \rho |u| u \right) = (-D_u \mu u) + (-C_u \cdot \frac{1}{2} \rho |u| u)$$

де:

S_u – вихідний член рівняння імпульсу;

μ — динамічна в'язкість, $\text{м}^2 / \text{с}$;

α – проникність пористого середовища, м^2 ;

D_u – коефіцієнт в'язкого опору;

C_u – коефіцієнт інерційного опору.

Теплообмін між кроною рослини та повітрям теплиці (прихована теплота транспірації рослини) розраховується за допомогою наступного рівняння [29]:

$$S_\phi = 2 L A I \rho c_p \frac{T_c - T_i}{r_a} + L A I \rho \lambda \frac{H_c - H_a}{r_a + r_s},$$

де:

S_ϕ – вихідний член рівняння енергії;

$L A I$ — індекс площі листя, $\text{м}^2 / \text{м}^2$;

T_c, T_i – температура культури та повітря в приміщенні, К;

r_a – позначає аеродинамічний опір листя помідорів, с/м;

λ – прихована теплота випаровування води, Дж/кг;

H_c , та H_a відносна вологість культури та повітря в приміщенні;

r_s – середній імпеданс продихів рослини, с/м.

За формулою Максвелла ефективність зволоження повітря [32]:

$$\frac{dm_k(\tau)}{d\tau} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_k(\tau) \cdot D(\theta) \cdot m_w [P_H(\theta_w) - P(d)]}{R \cdot T}, \quad (3-30)$$

де:

m_k, r_k – маса і радіус краплі кг, м;

$D(\theta)$ – коефіцієнт дифузії пари повітря;

m_w, R – молекулярна вага води у газоподібному стані та газова стала пари;

T – температура пари, К;

P_H, P – парціальний тиск пари над поверхнею краплі та в оточуючому середовищі, Па.

3.2. Висновки до розділу

В даному розділі було визначено які параметри та функції мають бути враховані при моделюванні тепло-масообмінних процесів в теплиці.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЗАМКНЕНОМУ ОБ'ЄМІ ТЕПЛИЦІ

4.1. Розробка 3-D моделі тепличного об'єкта та параметри моделювання

Для дослідження розповсюдження вологості в середині теплиці, було розроблено трьох вимірну модель тепличного об'єкта в програмному середовищі SOLIDWORKS (рис.4.1). Для моделі теплиці були прийняті наступні характеристики:

- Габаритні розміри - 7м x 4м x 1,75м;
- Площа теплиці - 28 м²;
- Об'єм теплиці - 49 м³;
- Кратність повітрообміну – 30 крат;
- Вікна провітрювання – 2 шт з габаритними розмірами 0,6м x 0,15м;
- Матеріал огорожувальної конструкції – полікарбонат.

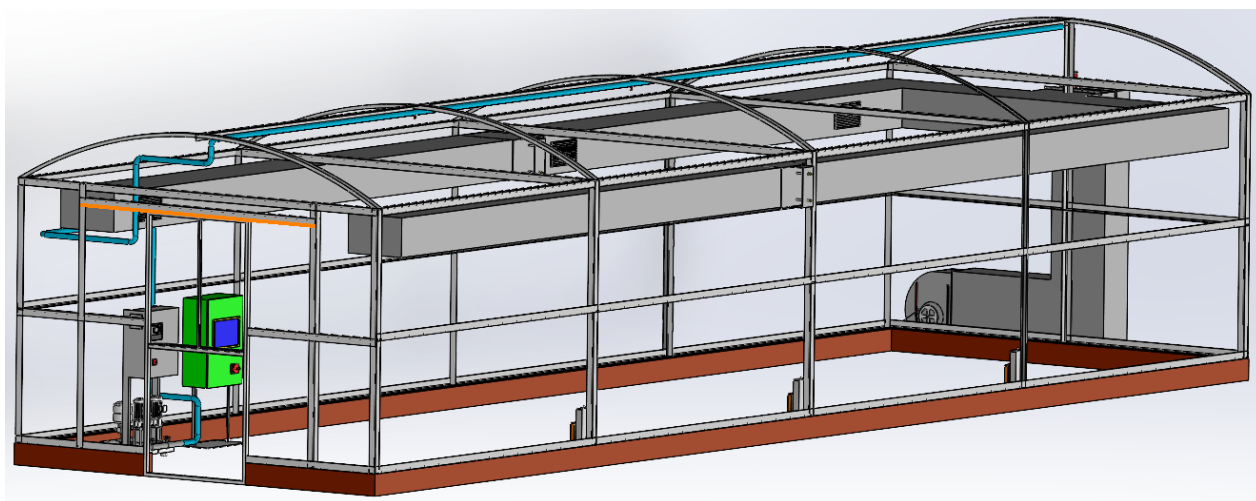


Рис.4.1. 3-D модель теплиці

Для проведення моделювання перенесення водяної пари повітря в програмному середовищі SOLIDWORKS інтегровано рівняння переносу водяної пари (рис.4.2).

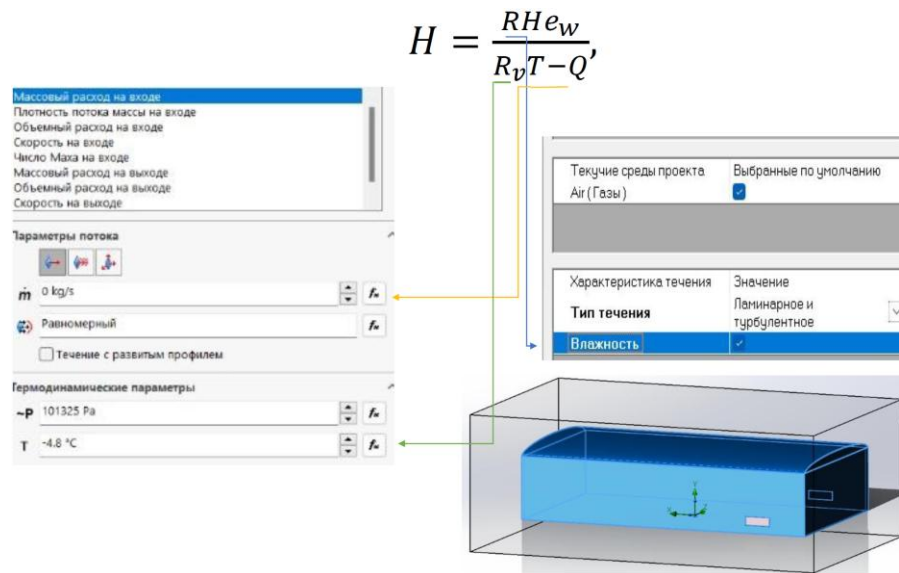


Рис.4.1. Інтеграція рівняння переносу водяної пари в середовище
SOLIDWORKS [32]

Початкові параметри об'єкта моделювання визначені як:

- Температура повітря в середині теплиці – 20 °С;
- Масова витрата води через форсунку – 5 г/с;
- Температура води – 10 °С;
- Тиск системи туманоутворення – 3 бар;
- Температура вхідного повітря – 15,6 °С;
- Відносна вологість вхідного повітря – 68 %;
- Максимальна продуктивність вентилятора – 1344 м3/год;
- Час моделювання – 10 с;

Впливом рослин, системи поливу, вуглекислого газу, теплопереносу через огорожувальну конструкцію теплиці було знехтуване.

План модельних досліджень включає в себе:

- Налагодження 3-D моделі по вказаним параметрам та характеристикам;
- Дослідження розподілу вологості повітря по замкненому об'єму теплиці;
- Дослідження розподілу температури повітря по замкненому об'єму теплиці;
- Дослідження швидкості повітряного потоку по замкненому об'єму теплиці;

- Дослідження втрати теплової потужності теплиці.

Враховуючі параметри об'єкта було побудовано спрощену модель для моделювання процесів стабілізації відносної вологості, температури та швидкості повітряного потоку в середині теплиці (рис.4.3).

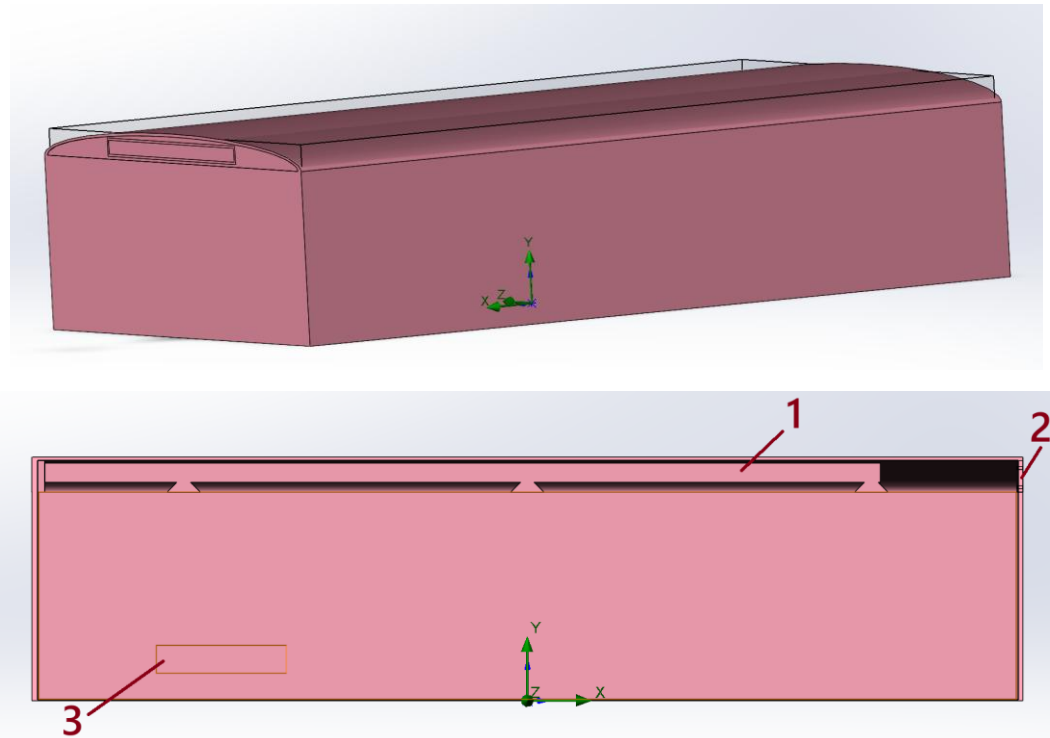


Рис.4.3. Загальний вигляд об'єкта моделювання: 1- система туманоутворення; 2 – вхідне вікно провітрювання; 3 – вихідне вікно провітрювання.

4.2. Стабілізаційні процеси в теплиці

Для визначення часу стабілізації відносної вологості, температури та швидкості повітря в середині теплиці було проведено 5 модельних експериментів з різною витратою повітря, яке подається примусово вентилятором через вхідне вікно провітрювання. Тривалість моделювання складала 10 секунд з фіксацією проміжних результатів через кожні 2 секунди.

Дослідження №1. Задаємо: витрату вхідного повітря 100 м³/год з температурою 15,6 °С та відотною вологістю 68%, масову витрату води 5 г/с з температурою 10 °С. Інтегруємо значення в програмне середовище та отримуємо

розрахункові середні значення температури, швидкості потоку та вологості повітря через кожні 2 секунди моделювання (табл.4.1)

Таблиця 4.1

Середні значення вологості, температури, швидкості потоку повітря для витрати 100 м³/год

Час, с	Середня температура повітря, °С	Середня відносна вологість, %	Середня швидкість, м/с
2	17,16	58,57	0,98
4	16,01	61,82	1,59
6	15,49	63,18	1,14
8	15,25	64,19	1,23
10	15,14	64,88	0,96

Відповідно до отриманих результатів, було побудовано залежності зміни температури, вологості та швидкості потоку повітря в часі (рис.4.4 - 4.6).

З (рисунку 4.4) видно, що відносна вологість повітря зростає протягом усього часу моделювання, стрімко - з 2 по 5 секунди, а плавніше з 5 по 10 секунди. Отже, стабілізаційний процес триває більше 10 секунд і має затухаючий характер.

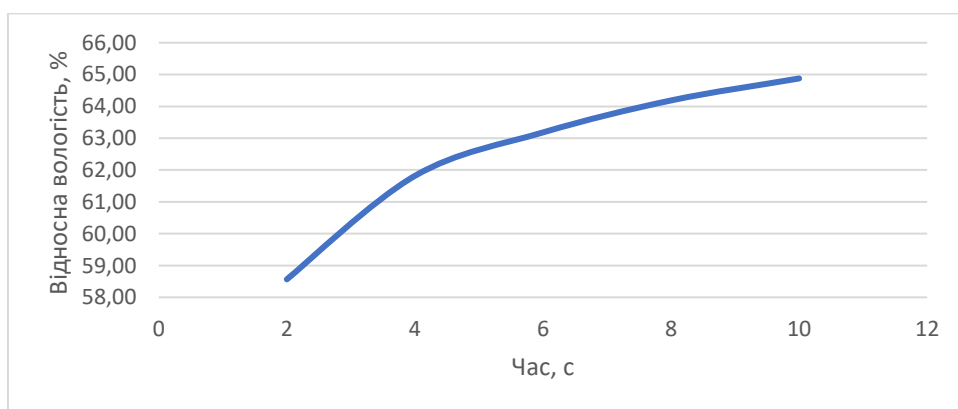


Рис.4.4. Стабілізація відносної вологості повітря при витраті 100 м³/год

На (рисунку 4.5) спостерігаємо доволі швидке зниження температури повітря з 2 по 6 секунди, а з 7 секунди вже відбувається плавніший процес

охолодження теплиці. Отже, час стабілізації температури повітря по замкненому об'ємі теплиці складає 7 секунд.

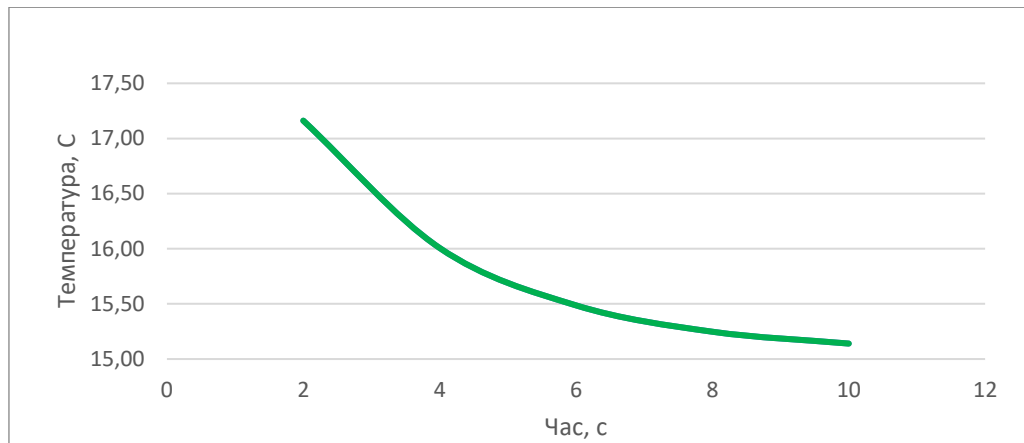


Рис.4.5. Стабілізація середньої температури повітря при витраті 100 м³/год

На графіку стабілізації середньої швидкості потоку повітря (рис.4.6.) спостерігаємо зростання швидкості на 2-4 секундах через імпульсну подачу вентилятором потоку припливного повітря через вікно провітрювання, далі швидкість починає стабілізуватися з 4 по 6 секунди, але спостерігаємо не значне збільшення швидкості з 6 по 8 секунди за рахунок утворення вихрових потоків, з 8 секунди швидкість починає врівноважуватися. Отже, час стабілізації швидкості потоку повітря по замкненому об'ємі теплиці складає 8 секунд.

Отже, при збільшенні швидкості потоку повітря температура знижується, а відносна вологість підвищується. При зменшенні швидкості потоку повітря температура повітря зменшується і вологість в теплиці досягає сталого значення.

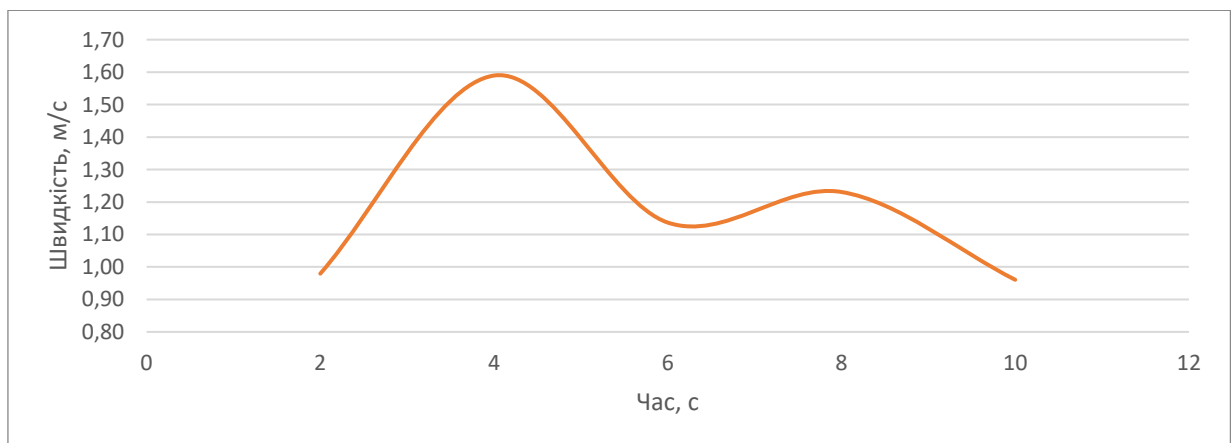


Рис.4.6. Стабілізація середньої швидкості повітря при витраті 100 м³/год

Для підтвердження отриманих результатів на (рис.4.7.) наведено епюри траєкторії руху повітряних мас вхідного повітря та вплив масової витрати води на середнє значення вологості повітря на висоті 0,5 метри та 1,5 метри від рівня ґрунту теплиці.

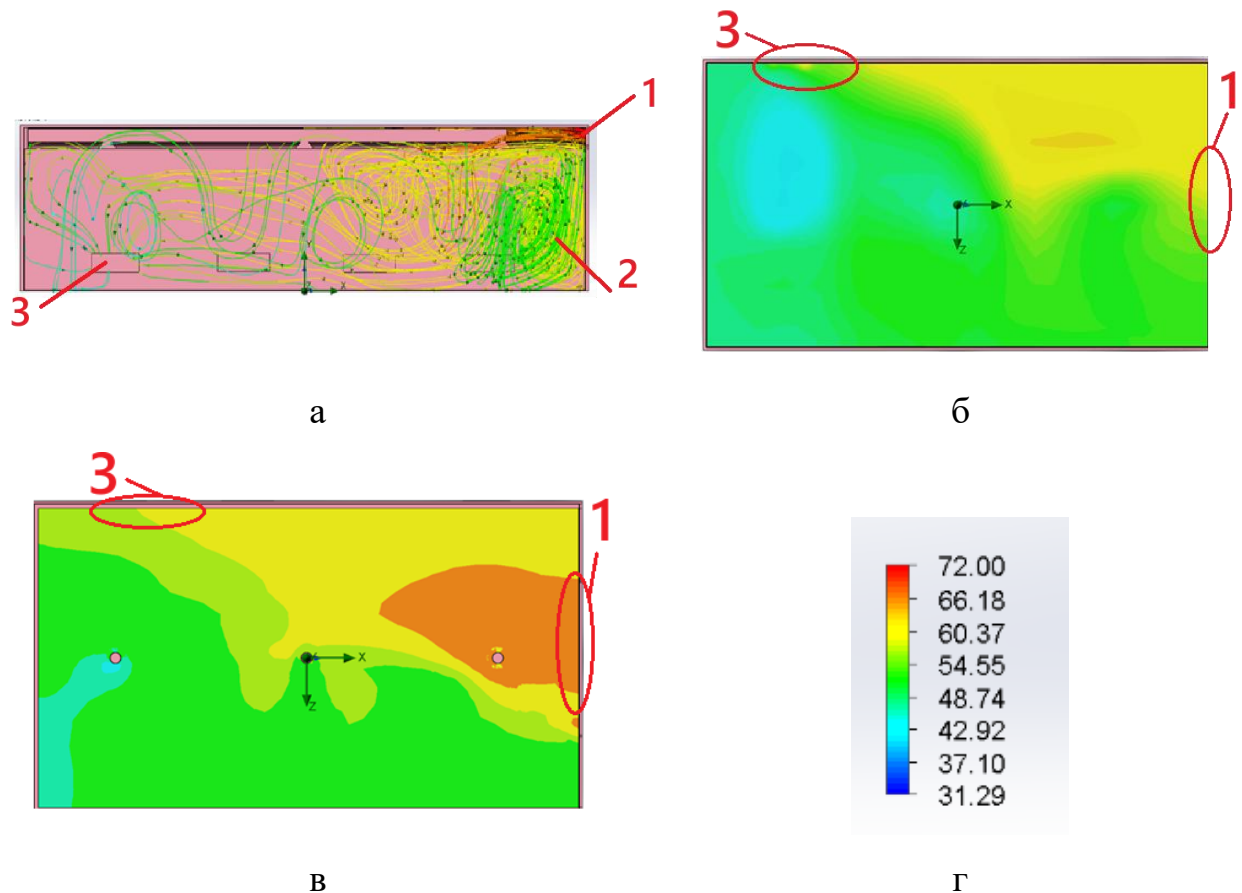


Рис.4.7. Результати моделювання стабілізації середньої відносної вологості повітря в теплиці: а – траєкторія руху (2) повітряних мас через вхідне вікно провітрювання (1) до вихідного вікна провітрювання (3); б – розподіл відносної вологості на рівні 0,5 метра від ґрунту; в - розподіл відносної вологості на рівні 1,5 метра від ґрунту; г – шкала відносної вологості повітря

Рівномірність відносної вологості повітря на рівні 0,5 метри від ґрунту (рис.4.7.б) є не стабільною, біля вихідного вікна провітрювання не спостерігається накопичення водяної пари. Рівномірність відносної вологості повітря на рівні 1,5 метри від ґрунту (рис.4.7.в) має імпульсивний характер, що спричинений початком роботи припливного вентилятора, біля вихідного вікна провітрювання не спостерігається накопичення водяної пари.

Дослідження №2. Задаємо: витрату вхідного повітря 400 м³/год з температурою 15,6 °С та відносною вологістю 68%, масову витрату води 5 г/с з температурою 10 °С. Інтегруємо значення в програмне середовище та отримуємо розрахункові середні значення температури, швидкості потоку та вологості повітря через кожні 2 секунди моделювання (табл.4.2)

Таблиця 4.2

Середні значення вологості, температури, швидкості потоку повітря для витрати 400 м³/год

Час, с	Середня температура повітря, °С	Середня відносна вологість, %	Середня швидкість, м/с
2	16,56	62,81	3,90
4	16,10	64,71	5,45
6	15,94	64,86	4,97
8	15,96	65,11	3,71
10	15,94	65,02	3,84

Відповідно до отриманих результатів, було побудовано залежності зміни температури, вологості та швидкості потоку повітря в часі (рис.4.8 - 4.10).

З (рисунку 4.8) видно, що відносна вологість повітря стрімко зростає протягом перших 5 секунд часу моделювання, далі вологість повітря починає стабілізуватися. Отже, час стабілізації триває 5 секунд.

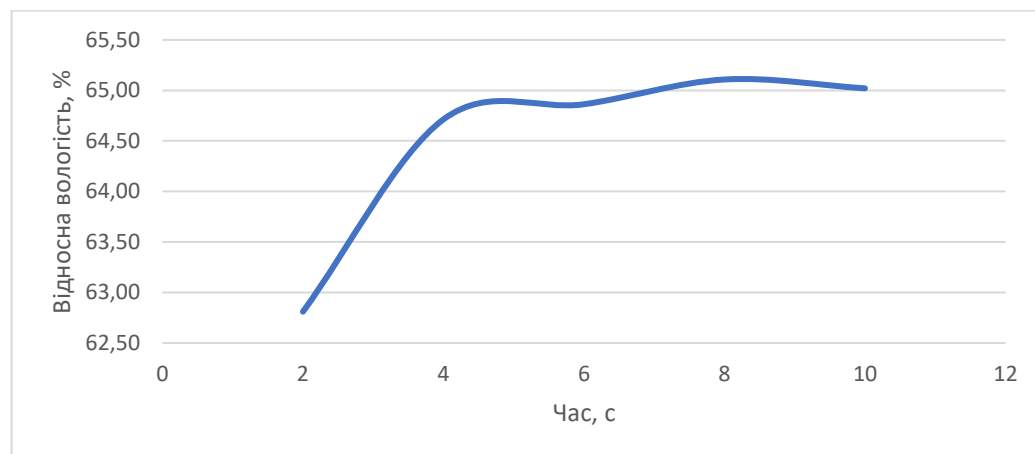


Рис.4.8. Стабілізація відносної вологості повітря при витраті 400 м³/год

На (рисунку 4.9) спостерігаємо доволі швидке зниження температури повітря з 2 по 6 секунди, а далі температура повітря починає стабілізуватися. Отже, час стабілізації температури повітря по замкненому об'ємі теплиці складає 6 секунд.

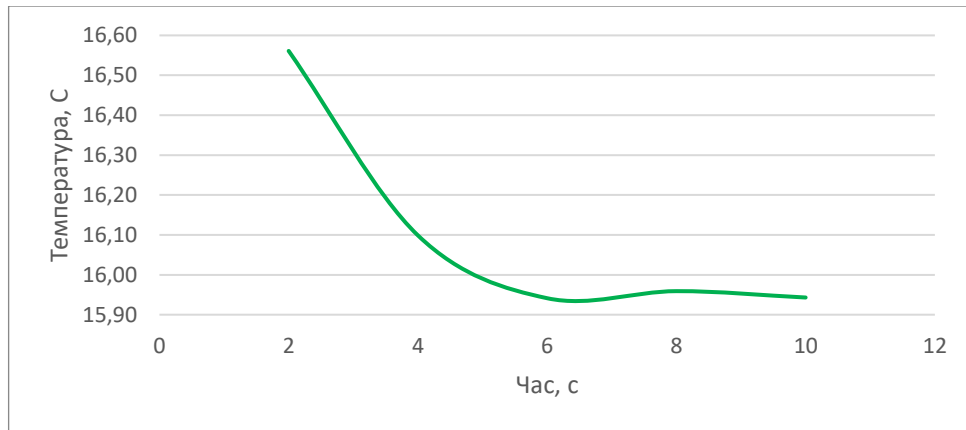


Рис.4.9. Стабілізація середньої температури повітря при витраті 400 м³/год

На графіку стабілізації середньої швидкості потоку повітря (рис.4.10.) спостерігаємо зростання швидкості на 2-4 секундах через імпульсну подачу вентилятором потоку припливного повітря через вікно провітрювання, далі швидкість починає стабілізуватися з 7 секунди. Отже, час стабілізації швидкості потоку повітря по замкненому об'ємі теплиці складає 7 секунд.

Отже, при витраті вентилятора 400 м³/год збільшується швидкість потоку повітря, а максимальне значення середньої температури знижується на 0,6°C, та максимальне значення відносної вологості підвищується на 0,23 %.

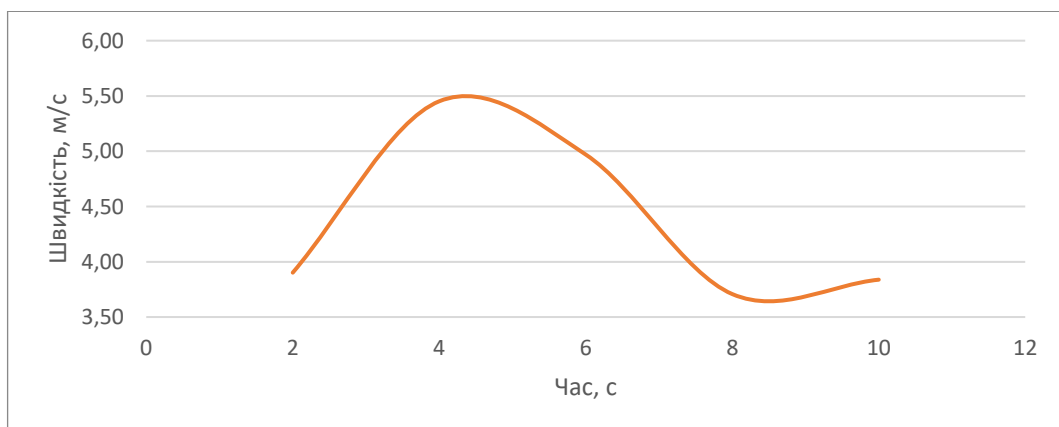


Рис.4.10. Стабілізація середньої швидкості повітря при витраті 400 м³/год

Для підтвердження отриманих результатів на (рис.4.11.) наведено епюри траєкторії руху повітряних мас вхідного повітря та вплив масової витрати води на середнє значення вологості повітря на висоті 0,5 метри та 1,5 метри від рівня ґрунту теплиці при витраті вентилятора 400 м³/год.

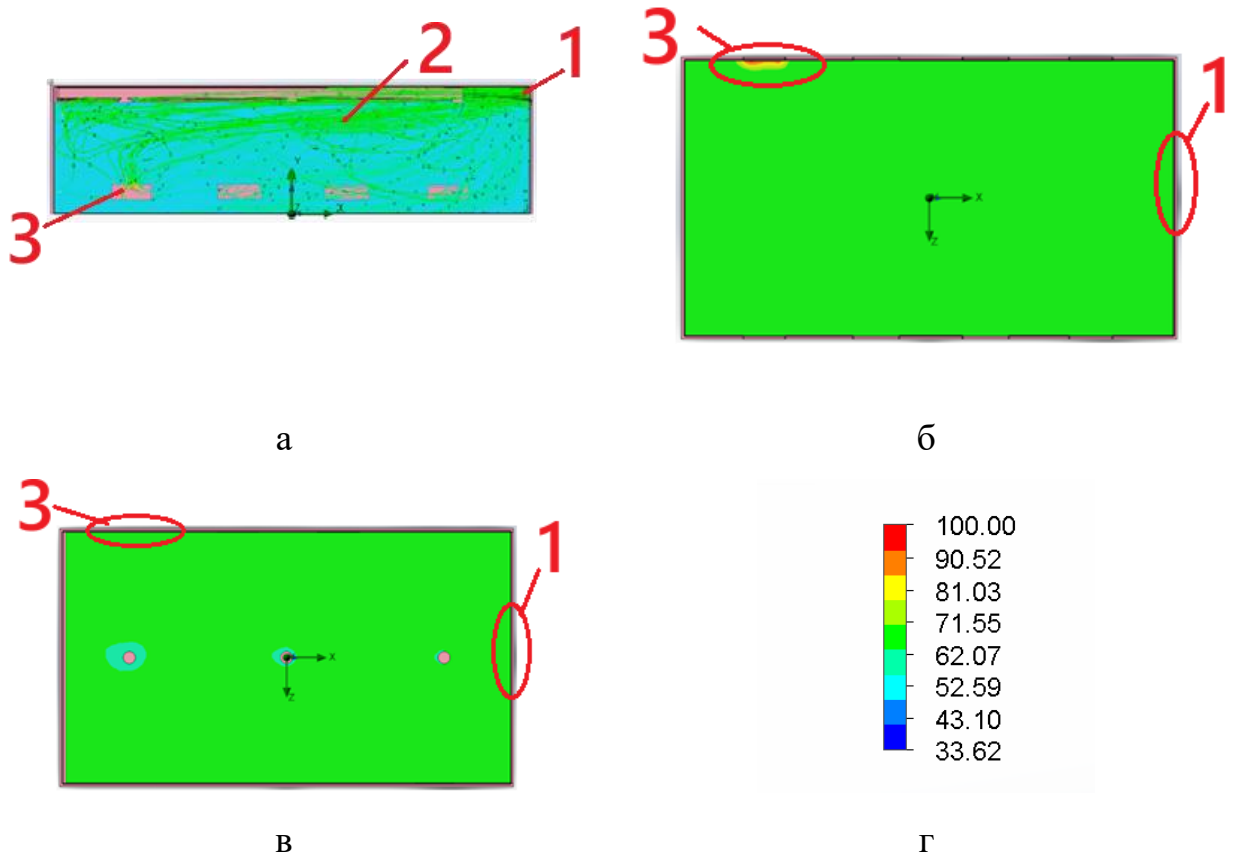


Рис.4.11. Результати моделювання стабілізації середньої відносної вологості повітря в теплиці: а – траєкторія руху (2) повітряних мас через вхідне вікно провітрювання (1) до вихідного вікна провітрювання (3); б – розподіл відносної вологості на рівні 0,5 метра від ґрунту; в - розподіл відносної вологості на рівні 1,5 метра від ґрунту; г – шкала відносної вологості повітря

Рівномірність відносної вологості повітря на рівні 0,5 метри від ґрунту (рис.4.7.б) стало значення, біля вихідного вікна провітрювання спостерігається незначне накопичення водяної пари. Рівномірність відносної вологості повітря на рівні 1,5 метри від ґрунту (рис.4.7.в) має стало значення, яке супроводжується незначним впливом масової витрати водяної пари з системи туманоутворення, біля вихідного вікна провітрювання не спостерігається накопичення водяної пари.

Дослідження №3. Задаємо: витрату вхідного повітря 700 м³/год з температурою 15,6 °С та відносною вологістю 68%, масову витрату води 5 г/с з температурою 10 °С. Інтегруємо значення в програмне середовище та отримуємо розрахункові середні значення температури, швидкості потоку та вологості повітря через кожні 2 секунди моделювання (табл.4.3)

Таблиця 4.3

Середні значення вологості, температури, швидкості потоку повітря для витрати 700 м³/год

Час, с	Середня температура повітря, °С	Середня відносна вологість, %	Середня швидкість, м/с
2	17,36	60,15	6,85
4	17,17	60,98	8,61
6	17,07	60,99	8,64
8	17,09	61,12	6,38
10	17,09	60,93	6,89

Відповідно до отриманих результатів, було побудовано залежності зміни температури, вологості та швидкості потоку повітря в часі (рис.4.12-4.14).

З (рисунку 4.12) видно, що відносна вологість повітря стрімко зростає протягом 4 секунд часу моделювання, далі крива має коливальний характер. Отже, стабілізаційний процес триває більше 10 секунд і має згасаючий характер.

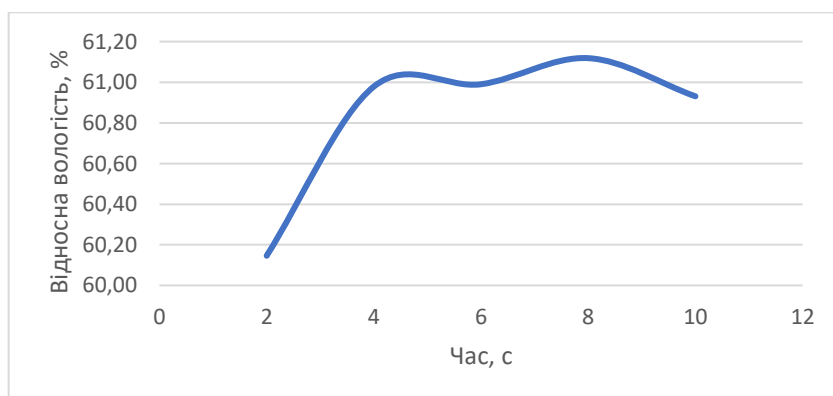


Рис.4.12. Стабілізація відносної вологості повітря при витраті 700 м³/год

На (рисунку 4.13) спостерігаємо доволі швидке зниження температури повітря з 2 по 5 секунди, а далі температура повітря починає стабілізуватися. Отже, час стабілізації температури повітря по замкненому об'ємі теплиці складає 5 секунд.

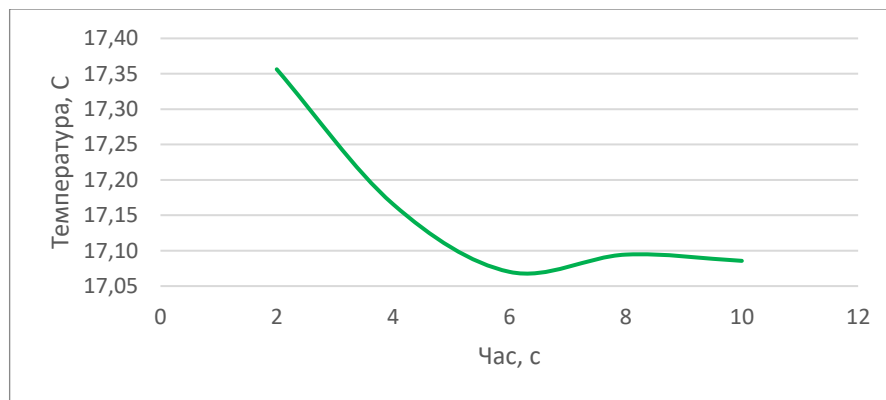


Рис.4.13. Стабілізація середньої температури повітря при витраті 700 м³/год

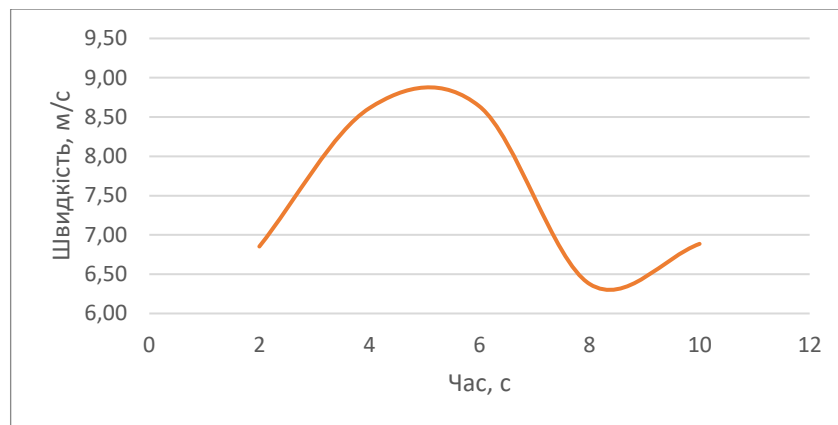


Рис.4.14. Стабілізація середньої швидкості повітря при витраті 700 м³/год

На графіку стабілізації середньої швидкості потоку повітря (рис.4.14.) спостерігаємо зростання швидкості на 2-4 секундах через імпульсну подачу вентилятором потоку припливного повітря через вікно провітрювання, далі спостерігаємо коливальний процес до 30 секунд.

Отже, при витраті вентилятора 700 м³/год збільшується швидкість потоку повітря і максимальне значення середньої температури збільшується на 0,2°C, а максимальне значення відносної вологості знижується на 3,89 %.

Для підтвердження отриманих результатів на (рис.4.15.) наведено епюри траєкторії руху повітряних мас вхідного повітря та вплив масової витрати води

на середнє значення вологості повітря на висоті 0,5 метри та 1,5 метри від рівня ґрунту теплиці при витраті вентилятора 700 м³/год.

Рівномірність відносної вологості повітря на рівні 0,5 метри від ґрунту (рис.4.15.б) стає значення, біля вихідного вікна провітрювання спостерігається незначне накопичення водяної пари. Рівномірність відносної вологості повітря на рівні 1,5 метри від ґрунту (рис.4.15.в) має стає значення, біля вихідного вікна провітрювання не спостерігається накопичення водяної пари.

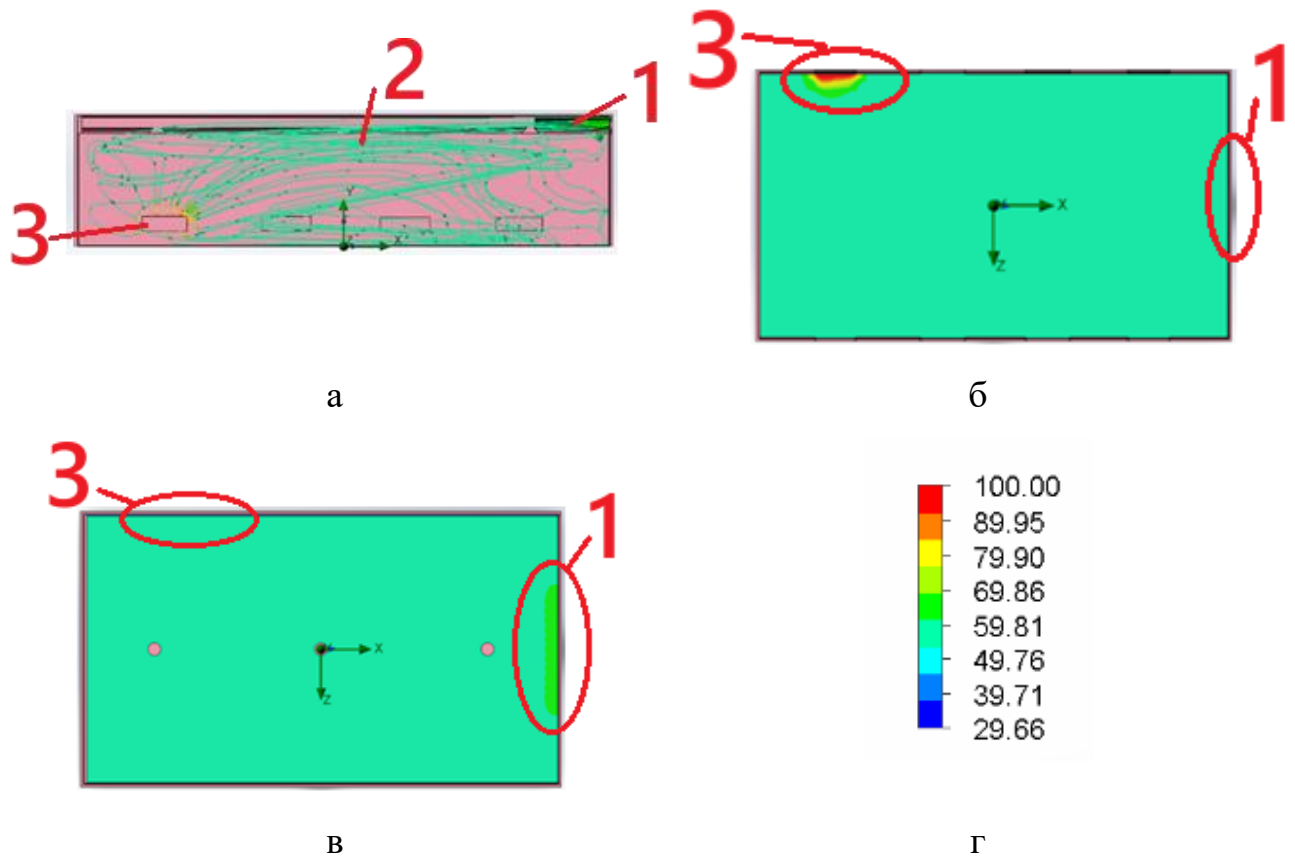


Рис.4.15. Результати моделювання стабілізації середньої відносної вологості повітря в теплиці: а – траєкторія руху (2) повітряних мас через вхідне вікно провітрювання (1) до вихідного вікна провітрювання (3); б – розподіл відносної вологості на рівні 0,5 метра від ґрунту; в - розподіл відносної вологості на рівні 1,5 метра від ґрунту; г – шкала відносної вологості повітря

Дослідження №4. Задаємо: витрату вхідного повітря 1000 м³/год з температурою 15,6 °С та відотною вологістю 68%, масову витрату води 5 г/с з температурою 10 °С. Інтегруємо значення в програмне середовище та отримуємо розрахункові середні значення температури, швидкості потоку та вологості повітря через кожні 2 секунди моделювання (табл.4.4)

Середні значення вологості, температури, швидкості потоку повітря для витрати 1000 м³/год

Час, с	Середня температура повітря, °С	Середня відносна вологість, %	Середня швидкість, м/с
2	19,02	54,24	13,93
4	18,99	54,43	9,37
6	19,04	54,32	10,39
8	18,98	54,46	11,30
10	18,94	54,57	11,11

Відповідно до отриманих результатів, було побудовано залежності зміни температури, вологості та швидкості потоку повітря в часі (рис.4.16-4.18).

З (рисунку 4.16) видно, що відносна вологість повітря має коливальний характер і зростає протягом усього часу моделювання, стрімко - з 2 по 4 секунди, з 4 по 6 секунди знижується і з 6 секунди починає поступово зростати.

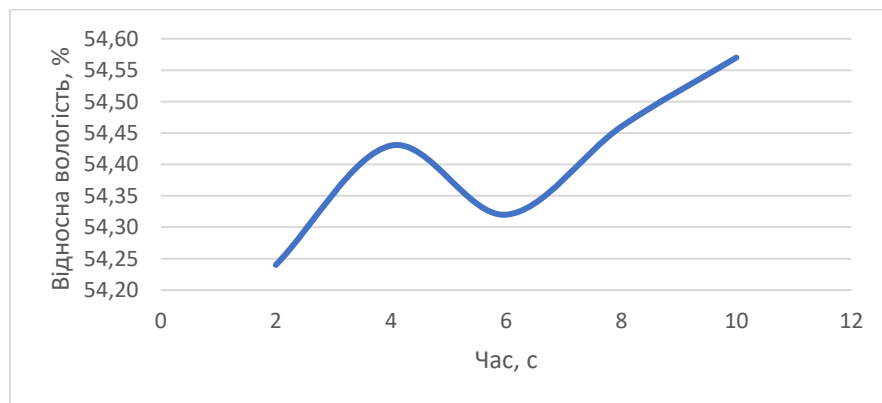


Рис.4.16. Стабілізація відносної вологості повітря при витраті 1000 м³/год

На (рисунку 4.17) спостерігаємо криву коливального характеру обернено-пропорційну до кривої стабілізації відносної вологості. Доволі швидко падає температура повітря з 2 по 4 секунди, з 4 по 6 секунди підвищується і з 6 секунди починає поступово падати.

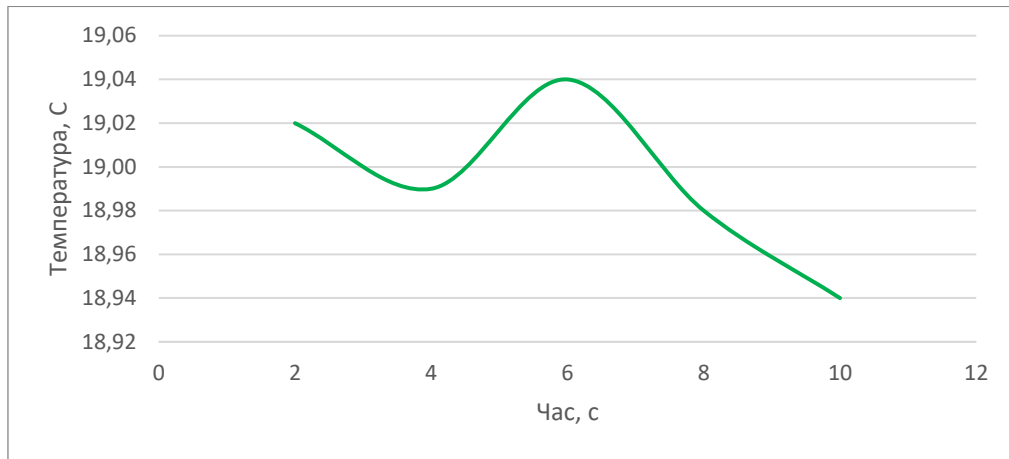


Рис.4.17. Стабілізація середньої температури повітря при витраті 1000 м³/год

На графіку стабілізації середньої швидкості потоку повітря (рис.4.18.) спостерігаємо зменшення швидкості на 2-4 секундах, далі швидкість починає стабілізуватися з 4 секунди. Отже, час стабілізації швидкості потоку повітря по замкненому об'ємі теплиці складає 4 секунди.

Отже, при витраті вентилятора 1000 м³/год збільшується швидкість потоку повітря і максимальне значення середньої температури збільшується на 1,88°C, а максимальне значення відносної вологості знижується на 10,31 %.

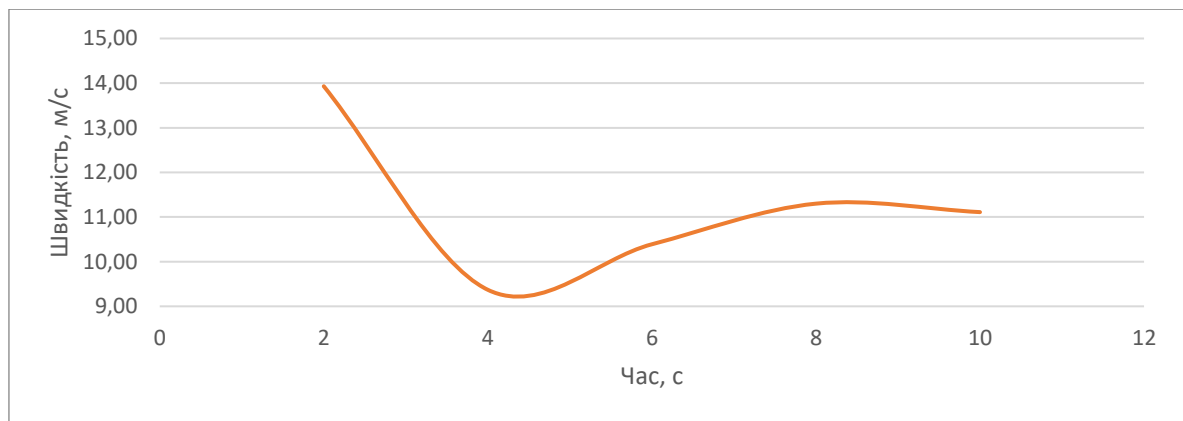


Рис.4.18. Стабілізація середньої швидкості повітря при витраті 1000 м³/год

Для підтвердження отриманих результатів на (рис.4.19.) наведено епюри траєкторії руху повітряних мас вхідного повітря та вплив масової витрати води на середнє значення вологості повітря на висоті 0,5 метри та 1,5 метри від рівня ґрунту теплиці при витраті вентилятора 1000 м³/год.

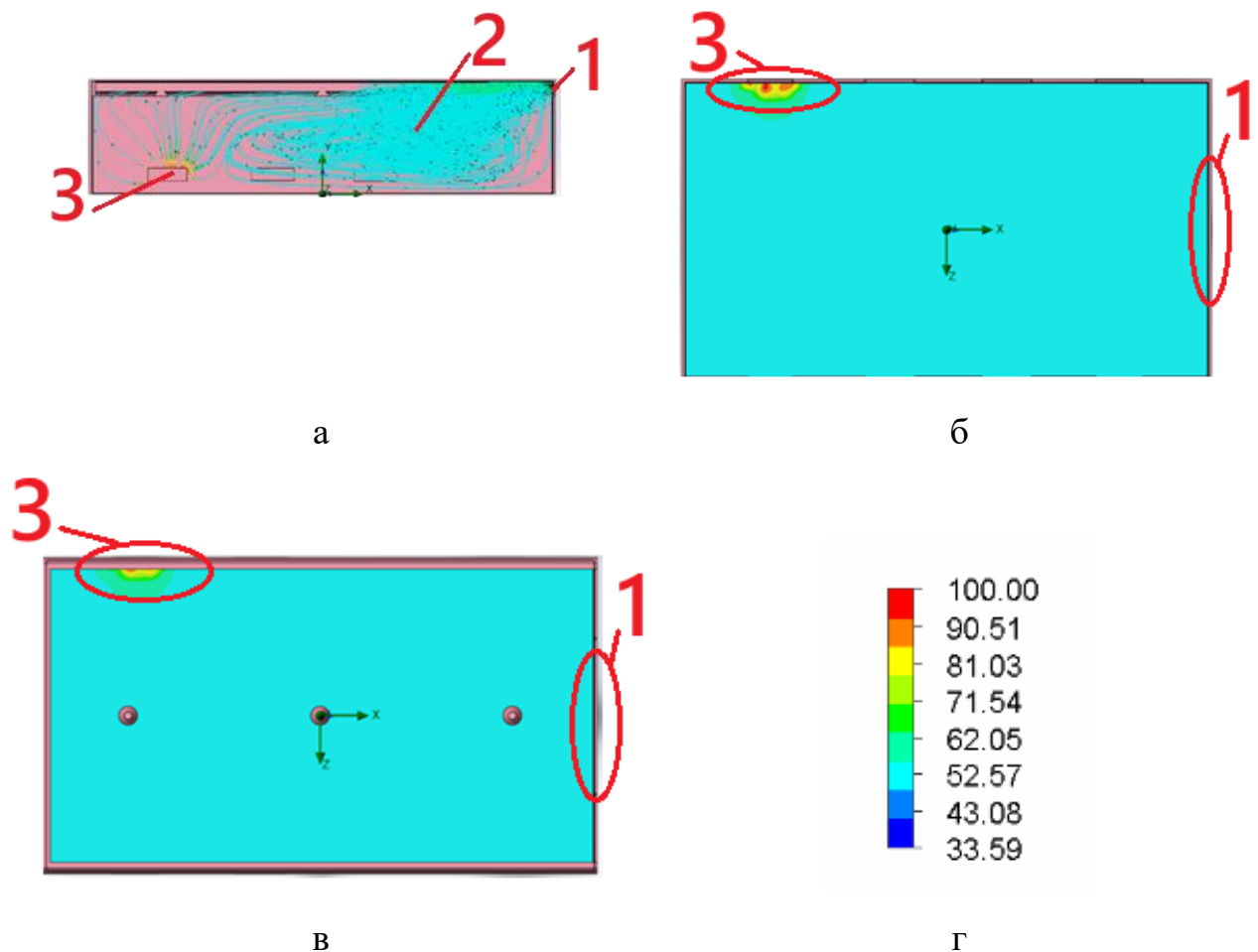


Рис.4.19. Результати моделювання стабілізації середньої відносної вологості повітря в теплиці: а – траєкторія руху (2) повітряних мас через вхідне вікно провітрювання (1) до вихідного вікна провітрювання (3); б – розподіл відносної вологості на рівні 0,5 метра від ґрунту; в - розподіл відносної вологості на рівні 1,5 метра від ґрунту; г – шкала відносної вологості повітря

Рівномірність відносної вологості повітря на рівні 0,5 метри від ґрунту (рис.4.19.б) стає значення, біля вихідного вікна провітрювання спостерігається незначне накопичення водяної пари. Рівномірність відносної вологості повітря на рівні 1,5 метри від ґрунту (рис.4.19.в) має стає значення, біля вихідного вікна провітрювання спостерігається накопичення водяної пари.

Дослідження №5. Задаємо: витрату вхідного повітря 1300 м³/год з температурою 15,6 °С та відотною вологістю 68%, масову витрату води 5 г/с з температурою 10 °С. Інтегруємо значення в програмне середовище та отримуємо

розрахункові середні значення температури, швидкості потоку та вологості повітря через кожні 2 секунди моделювання (табл.4.5)

Таблиця 4.5

Середні значення вологості, температури, швидкості потоку повітря для витрати 1300 м³/год

Час, с	Середня температура повітря, °С	Середня відносна вологість, %	Середня швидкість, м/с
2	21,32	47,15	16,82
4	21,28	47,32	12,19
6	21,36	47,01	13,05
8	21,28	47,34	14,57
10	21,19	47,56	14,38

Відповідно до отриманих результатів, було побудовано залежності зміни температури, вологості та швидкості потоку повітря в часі (рис.4.20-4.22).

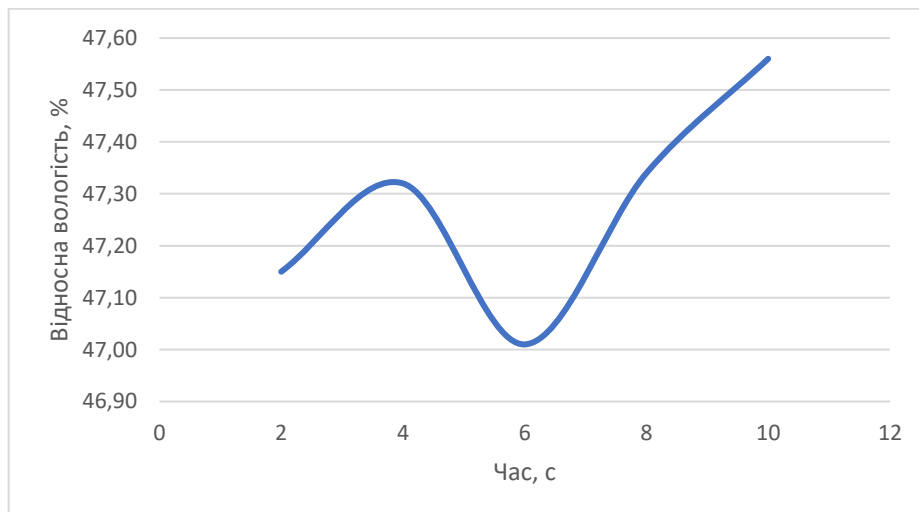


Рис.4.20. Стабілізація відносної вологості повітря при витраті 1300 м³/год

З (рисунку 4.20) видно, що відносна вологість повітря має коливальний характер і зростає протягом усього часу моделювання, стрімко - з 2 по 4 секунди, з 4 по 6 секунди знижується і з 6 секунди починає поступово зростати.

На (рисунку 4.21) спостерігаємо криву коливального характеру обернено-пропорційну до кривої стабілізації відносної вологості. Доволі швидке зниження температури повітря з 2 по 4 секунди, з 4 по 6 секунди підвищується і з 6 секунди починає поступово падати.

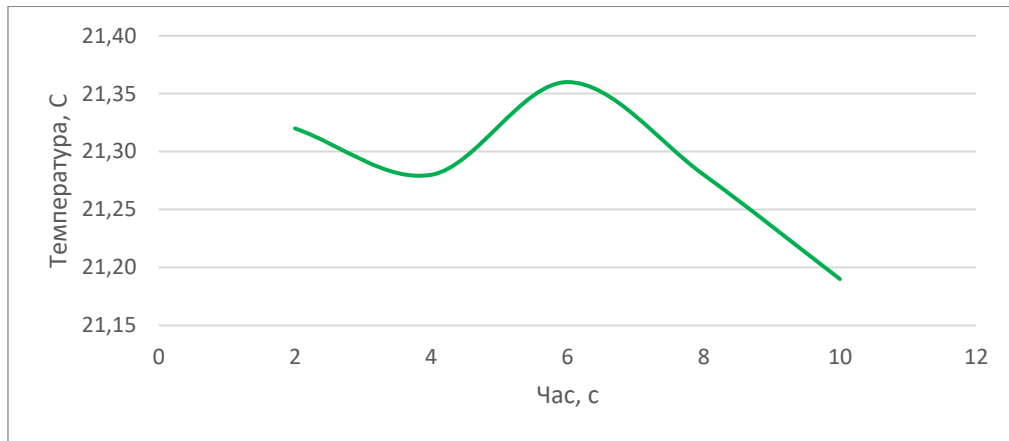


Рис.4.21. Стабілізація середньої температури повітря при витраті 1300 м3/год

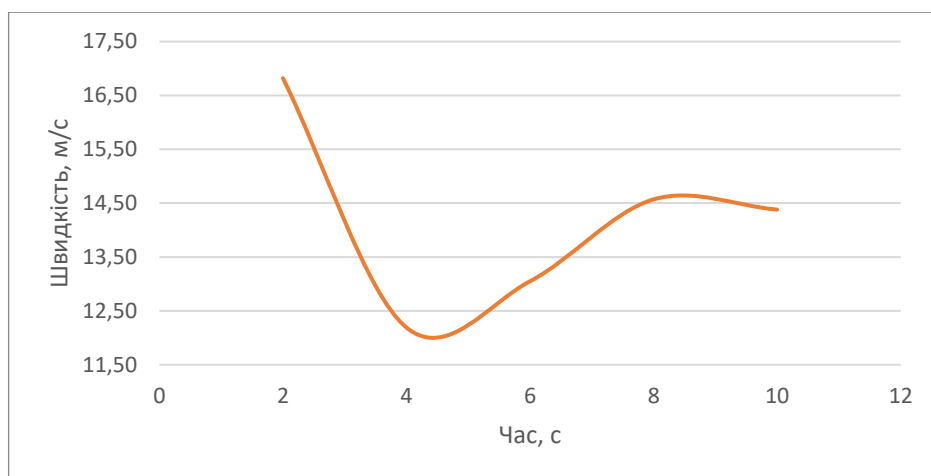


Рис.4.22. Стабілізація середньої швидкості повітря при витраті 1300 м3/год

На графіку стабілізації середньої швидкості потоку повітря (рис.4.22.) спостерігаємо зменшення швидкості на 2-4 секундах, далі швидкість починає стабілізуватися з 4 секунди. Отже, час стабілізації швидкості потоку повітря по замкненому об'ємі теплиці складає 4 секунди.

Отже, при витраті вентилятора 1300 м3/год збільшується швидкість потоку повітря і максимальне значення середньої температури збільшується на 4,2°C, а максимальне значення відносної вологості знижується на 17,32 %.

Для підтвердження отриманих результатів на (рис.4.23.) наведено епюри траєкторії руху повітряних мас вхідного повітря та вплив масової витрати води на середнє значення вологості повітря на висоті 0,5 метри та 1,5 метри від рівня ґрунту теплиці при витраті вентилятора 1300 м³/год.

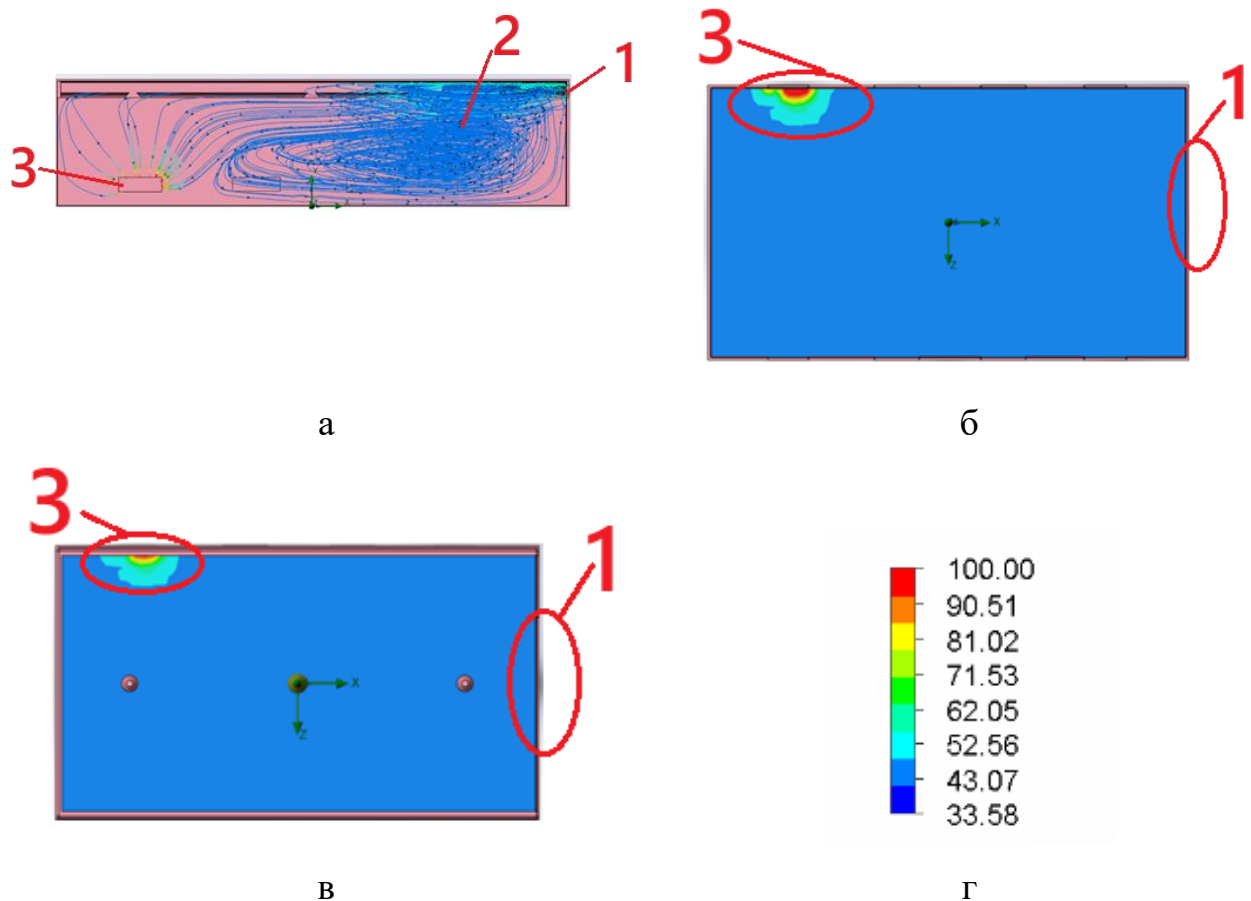


Рис.4.23. Результати моделювання стабілізації середньої відносної вологості повітря в теплиці: а – траєкторія руху (2) повітряних мас через вхідне вікно провітрювання (1) до вихідного вікна провітрювання (3); б – розподіл відносної вологості на рівні 0,5 метра від ґрунту; в - розподіл відносної вологості на рівні 1,5 метра від ґрунту; г – шкала відносної вологості повітря

Рівномірність відносної вологості повітря на рівні 0,5 метри від ґрунту (рис.4.23.б) стало значення, біля вихідного вікна провітрювання спостерігається значне накопичення водяної пари. Рівномірність відносної вологості повітря на рівні 1,5 метри від ґрунту (рис.4.23.в) має стало значення, біля вихідного вікна провітрювання спостерігається накопичення водяної пари.

Для забезпечення оптимального та рівномірного зволоження необхідно форсунки розташовувати на рівні росту рослин. Це унеможливить перенасичення повітря водяною парою, а відповідно зменшить ризики захворювання рослин та утворення грибку.

4.3. Втрата теплової потужності теплиці

Для дослідження втрати теплової потужності теплиці були прийняті ті самі характеристики та початкові параметри, що й для дослідження розповсюдження вологості в середині теплиці, але додано коефіцієнт теплопередачі огорожувальної конструкції теплиці. Коефіцієнт теплопередачі для полікарбонату товщиною 6 мм складає 3,6 (Вт/м²°C).

Дослідження. Задаємо швидкість вхідного повітря: для 100 м³/год – 1,59 м/с; 400 м³/год – 5,45 м/с; 700 м³/год – 8,64 м/с; 1000 м³/год – 13,93 м/с; 1300 м³/год – 16,82 м/с. Температура - 15,6 °C, відносна вологість вхідного повітря 68% та масова витрата води 5 г/с з температурою 10 °C для всіх режимів роботи вентилятора залишається незмінна.

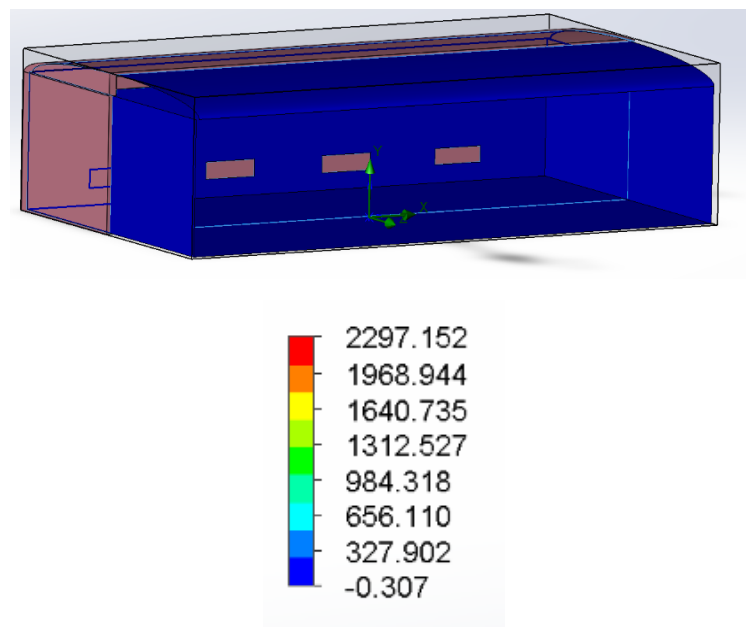


Рис.4.24. Результати моделювання втрати теплової потужності теплиці

Інтегруємо значення в програмне середовище та отримуємо розрахункові значення втрати теплової потужності теплиці для кожного режиму роботи

вентилятора (табл.4.6). Для підтвердження отриманих результатів на (рис.4.24.) наведено епюру втрати теплової потужності теплиці при режимі роботи вентилятора 400 м3/год. З епюри бачимо, що втрата теплової потужності теплиці в середньому буде складати 304 Вт.

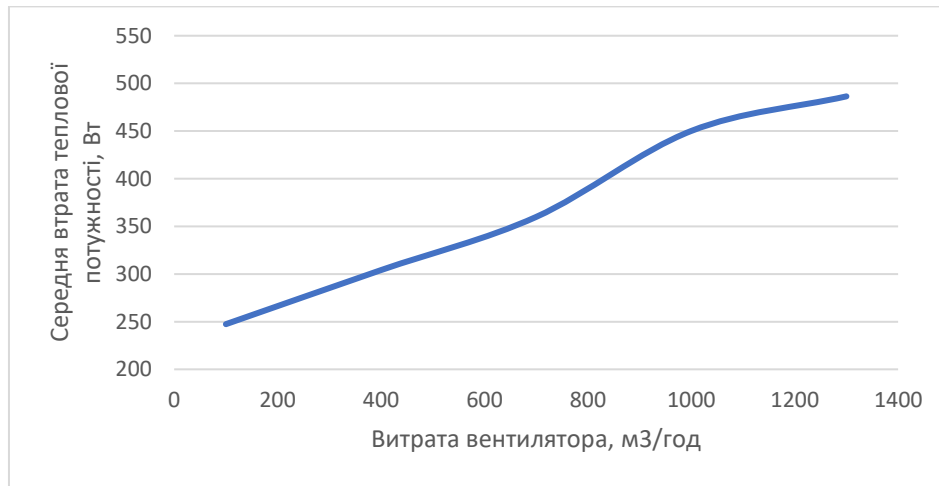


Рис.4.25.Втрата теплової потужності теплиці при різних режимах роботи вентилятора

Таблиця 4.6

Втрата теплової потужності теплиці

Витрата вентилятора, м3/год	100	400	700	1000	1300
Втрати теплової потужності, Вт	247,38	304,11	359,91	450,12	486,39

Результат моделювання втрати теплової потужності теплиці наведені на рис. 4.25.

За отриманими результатами моделювання можна стверджувати, що зі збільшенням продуктивності вентилятора і сталих значеннях температури та вологості вхідного повітря теплові втрати в теплиці збільшуються.

4.4. Висновки до розділу

1. Визначено характеристики та початкові параметри для моделі дослідження. Побудовано 3-х вимірну модель тепличного об'єкта за визначеними параметрами. Побудована модель є багатофункціональною і дає можливість для проведення будь-яких тепломасообінних досліджень (не тільки зміна вологості та температури повітря в середині теплиці, втрати теплоти, а й дослідження теплообміну з навколишнім середовищем, впливу вуглекислого газу та розміщення вікон провітрювання і т.д.).
2. Проведено дослідження розповсюдження вологості повітря по теплиці при різних режимах роботи вентилятора. Визначено, що час стабілізації відносної вологості в теплиці має коливальний характер і починається з 5 секунди, чим більша продуктивність вентилятора, тим швидше відбувається розповсюдження вологості повітря по об'єму теплиці. Отже, для стабілізації повітряних потоків з певною вологістю достатньо досить короткий проміжок часу, тому виконавчі пристрої мають забезпечити відповідну швидкодію або режим роботи, який забезпечить інтервальне включення форсунок для забезпечення необхідного рівня зволоження рослин. Результати дослідження дають можливість визначити дефіцит вологи в теплиці та продуктивність форсунок.
3. Проведено дослідження розповсюдження температури повітря по теплиці при різних режимах роботи вентилятора. Визначено, що час стабілізації температури в теплиці зменшується зі збільшенням продуктивності вентилятора, від 5 секунд до 7 секунд. Тому при збільшенні витрати повітря для підтримання сталої температури в середині теплиці потрібно збільшувати потужність нагрівача. Результати дослідження дають можливість визначити дефіцит температури повітря в теплиці, а відповідно продуктивність нагрівача.
4. Проведено дослідження швидкості потоку повітря по теплиці при різних режимах роботи вентилятора. Визначено, що час стабілізації швидкості в

теплиці зменшується зі збільшенням продуктивності вентилятора, але він є не стабільним через утворення вихрових потоків в об'ємі теплиці. Це означає, що в тепличному об'єкті виникають мертві зони по зволоження та температурі повітря, тому необхідно забезпечити додаткові пристрої їх контролю.

5. Проведено дослідження втрати теплової потужності теплиці при різних режимах роботи вентилятора. Визначено кількість теплоти, яка передається через стінки огорожувальної конструкції в навколишнє середовище, що дає можливість визначити дефіцит теплової потужності для обігріву теплиці.

РОЗДІЛ 5. МЕХАТРОННА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ЗВОЛОЖЕННЯ

5.1. Підсистема роботи форсунок

Для підтримування сталого значення відносної вологості в тепличному об'єкті необхідно врахувати: масову витрату та температуру водяної пари, яка подається через форсунки; відносну вологість та температуру повітря, яке подається вентилятором через вікно провітрювання; наявну температуру та відносну вологість повітря в замкненому об'ємі теплиці. Враховуючи перелічені параметри для забезпечення балансу вологості доцільно застосувати наступне рівняння [19,32,33,34]:

$$Q_{\phi} * T1 * \Delta t1 = 30 * v * S * T2 * \phi * \Delta t2 = \phi T \quad (5.1)$$

де Q_{ϕ} - продуктивність форсунок, л/год; $T1$ - температура водяної пари, °C; $\Delta t1$ – час роботи форсунок, год; 30 – кратність повітрообміну для тепличного об'єкту в холодний період року; v – швидкість потоку припливного повітря; S – площа поперечного перерізу вхідного вікна провітрювання, м²; $T2$ - температура припливного повітря, °C; ϕ – вологість припливного повітря, %; $\Delta t2$ - час роботи вентилятора, год; ϕT – задане початкове стале значення вологості в середині тепличного об'єкту. Для даного дослідження ϕT прийнято 70 %.

Отже, відповідно до рівняння балансу вологи та отриманих результатів моделювання визначено кількість водяної пари, яку потрібно додати чи відняти з теплиці (табл.5.1).

Таблиця 5.1.

Кількість водяної пари для балансу вологості в теплиці

Витрата повітря, м3/год	100	400	700	1000	1300
Відносна вологість повітря, %	64,88	65,11	61,12	54,57	47,56

Провівши аналіз отриманих даним бачимо, що зі збільшенням витрати повітря значення відносної вологості зменшується (рис.5.1). Розрахуємо яку кількість вологи потрібно додати в теплицю для кожної витрати повітря окремо.

Витрата повітря 100 м³/год. Середнє значення вологості повітря після моделювання складає 64,88, тоді за рівнянням балансу форсунки мають забезпечити 66,64% вологості, а це буде 18,45 г/сек водяної пари.

Витрата повітря 400 м³/год. Середнє значення вологості повітря після моделювання складає 65,11%, тоді за рівнянням балансу форсунки мають забезпечити 67,33% вологості, а це буде 18,89 г/сек водяної пари.

Витрата повітря 700 м³/год. Середнє значення вологості повітря після моделювання складає 61,12%, тоді за рівнянням балансу форсунки мають забезпечити 55,36% вологості, а це буде 20,12 г/сек водяної пари.

Витрата повітря 1000 м³/год. Середнє значення вологості повітря після моделювання складає 54,57%, тоді за рівнянням балансу форсунки мають забезпечити 35,71% вологості, а це буде 22,54 г/сек водяної пари.

Витрата повітря 1300 м³/год. Середнє значення вологості повітря після моделювання складає 47,56%, тоді за рівнянням балансу форсунки мають забезпечити 14,68% вологості, а це буде 25,86 г/сек водяної пари.

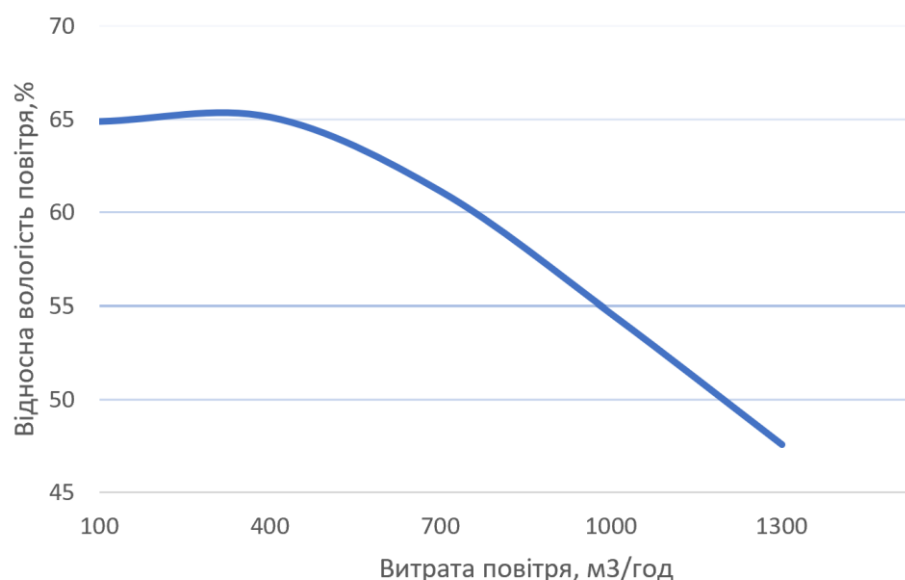


Рис.5.1. Функція зміни відносної вологості повітря до зміни продуктивності вентилятора

Для отриманої функції зміни відносної вологості повітря в середині теплиці будуюмо циклограму роботи форсунок. Продуктивність кожної форсунки складає 33 г/хв.

Визначення терміну вмикання і-ї форсунки регламентується накопиченим дефіцитом водяної пари [19,32,33,34]:

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} F_v(t) dt = Q_{\phi} * \Delta t, \quad (5.2)$$

де t_0 - поточний час, F_v - функція витрат вологості відповідно результатів моделювання (рис.5.1), Q_{ϕ} – продуктивність форсунки(ок), Δt - тривалість поточного вмикання форсунки.

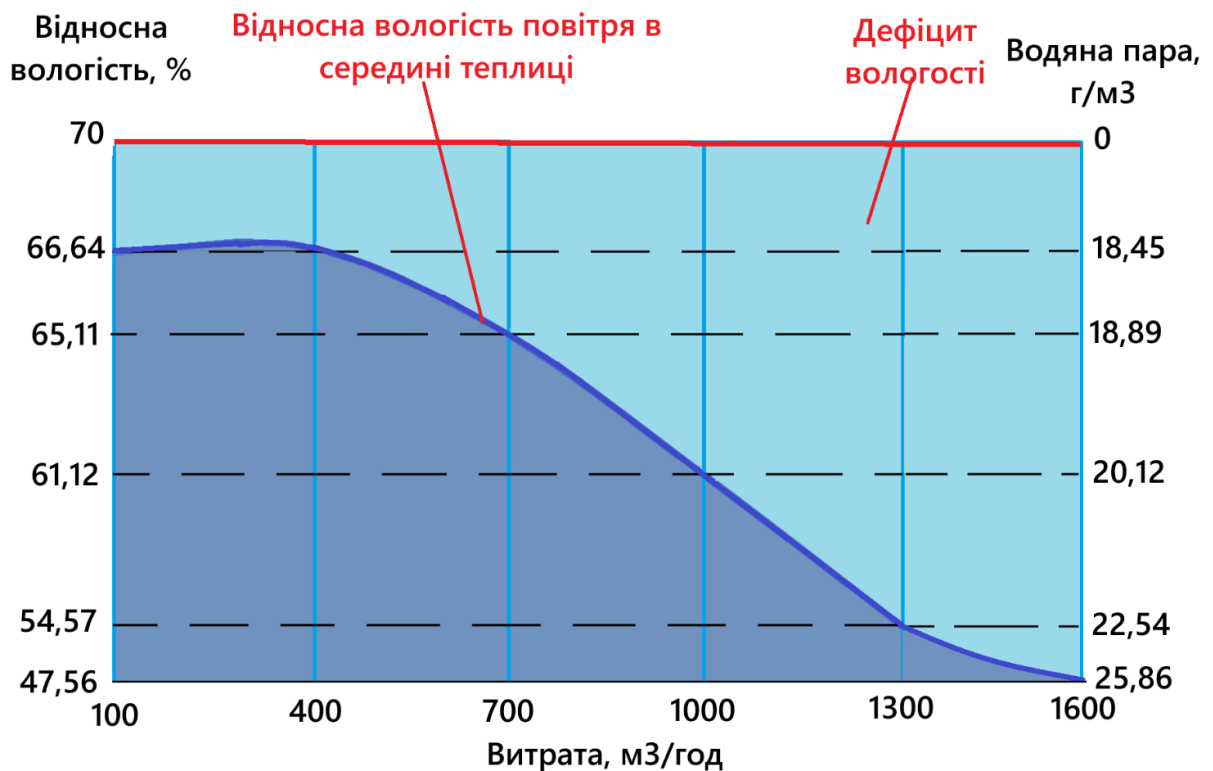


Рис.5.2. Функція зміни відносної вологості повітря до зміни продуктивності вентилятора

Таблиця 5.2.

Режими роботи форсунок

Продуктивність вентилятора, м3/год	100	Н	П	Н	П	Н
Час роботи форсунок, сек	11,2	14,4	5,6	20	5,6	14,4

Цикл роботи, сек	60					
Продуктивність вентилятора, м3/год	400	Н	П	Н	П	Н
Час роботи форсунок, сек	11,4	14,4	5,7	20	5,7	14,4
Цикл роботи, сек	60					
Продуктивність вентилятора, м3/год	700	Н	П	Н	П	Н
Час роботи форсунок, сек	12,2	14,4	6,1	19	6,1	14,4
Цикл роботи, сек	60					
Продуктивність вентилятора, м3/год	1000	Н	П	Н	П	Н
Час роботи форсунок, сек	13,6	14,4	6,8	17,6	6,8	14,4
Цикл роботи, сек	60					
Продуктивність вентилятора, м3/год	1300	Н	П	Н	П	Н
Час роботи форсунок, сек	15,7	14,4	7,8	15,6	7,8	14,4
Цикл роботи, сек	60					

У системі туманоутворення передбачено встановлення 3-х форсунок продуктивністю 33 г/хв води. Режими роботи компенсуючих форсунок буде мати вигляд (табл.5.2) [19,32,33,34]:

- Для витрати 100 м3/год: три форсунки працюють 11,2 секунди з витратою 6,15 г/хв, загальний час роботи режиму складає 1 хвилина (стан спокою складає 48,8 секунди). Коефіцієнт наповненості водяною парою теплиці - 0,18;
- Для витрати 400 м3/год: три форсунки працюють 11,4 секунди витратою 6,3 г/хв, загальний час роботи режиму складає 1 хвилина (стан спокою складає 48,5 секунди). Коефіцієнт наповненості водяною парою теплиці - 0,19;
- Для витрати 700 м3/год: три форсунки працюють 12,2 секунди з витратою 6,7 г/хв, загальний час роботи режиму складає 1 хвилина (стан спокою складає 47,8 секунди). Коефіцієнт наповненості водяною парою теплиці - 0,2;

- Для витрати 1000 м³/год: три форсунки працюють 13,6 секунди з витратою 7,51 г/хв, загальний час роботи режиму складає 1 хвилина (стан спокою складає 46,4 секунди). Коефіцієнт наповненості водяною парою теплиці - 0,23;
- Для витрати 1300 м³/год: три форсунки працюють 15,7 секунди з витратою 8,6 г/хв, загальний час роботи режиму складає 1 хвилина (стан спокою складає 44,4 секунди). Коефіцієнт наповненості водяною парою теплиці - 0,26.

Для забезпечення стабілізації вологи пошарово, відповідно до росту рослин, доцільно використовувати 6 форсунок туманоутворення, які розташовані по площі теплиці з механічним механізмом зміни висоти розташування форсунок.

5.2. Підсистема роботи нагрівача

Для визначення режиму роботи нагрівача визначаємо дефіцит теплової потужності для всього об'єму теплиці [19,32,33,34]:

$$Q = \Delta t * N * V,$$

де:

Δt – різниця температури зовнішнього та внутрішнього повітря, °C;

N - втрата теплової потужності теплиці впродовж доби, Вт/м².

Початкову температуру в середині теплиці приймаємо 20 °C, температуру вхідного повітря через вікно провітрювання 15,6 °C, об'єм теплиці 1300 м³/год. Результати розрахунку наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3.

Дефіцит теплової потужності теплиці

Витрата вентилятора, м ³ /год	100	400	700	1000	1300
Дефіцит теплової потужності, кВт	1,52	1,87	2,21	2,77	2,99
Потужність роботи нагрівача, %	51	62	74	92	100

З отриманих розрахунків побудовано графік роботи нагрівача максимальною потужністю 3 кВт (5.3).

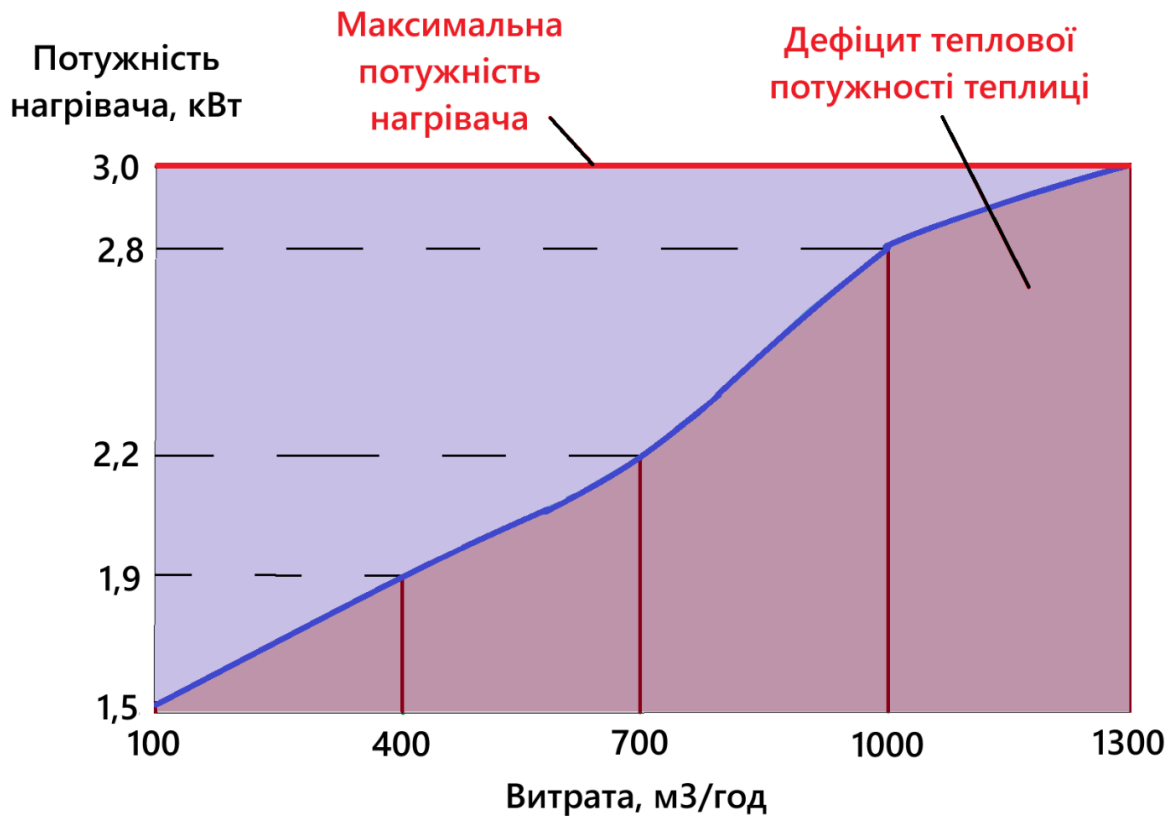


Рис.5.3. Функція дефіциту теплової потужності теплиці в залежності від зміни продуктивності вентилятора

При витраті вентилятора 100 м³/год необхідно забезпечити 1,5 кВт теплової потужності, що складає 51% всієї потужності нагрівача.

При витраті вентилятора 400 м³/год необхідно забезпечити 1,87 кВт теплової потужності, що складає 62% всієї потужності нагрівача.

При витраті вентилятора 700 м³/год необхідно забезпечити 2,21 кВт теплової потужності, що складає 74% всієї потужності нагрівача.

При витраті вентилятора 1000 м³/год необхідно забезпечити 2,77 кВт теплової потужності, що складає 92% всієї потужності нагрівача.

При витраті вентилятора 1300 м³/год необхідно забезпечити 3,0 кВт теплової потужності, що складає 100% всієї потужності нагрівача.

5.3. Алгоритм керування виконавчими пристроями

Загальний алгоритм роботи автоматизованої мехатронної системи зволоження повітря в тепличному об'єкті передбачає вмикання системи,

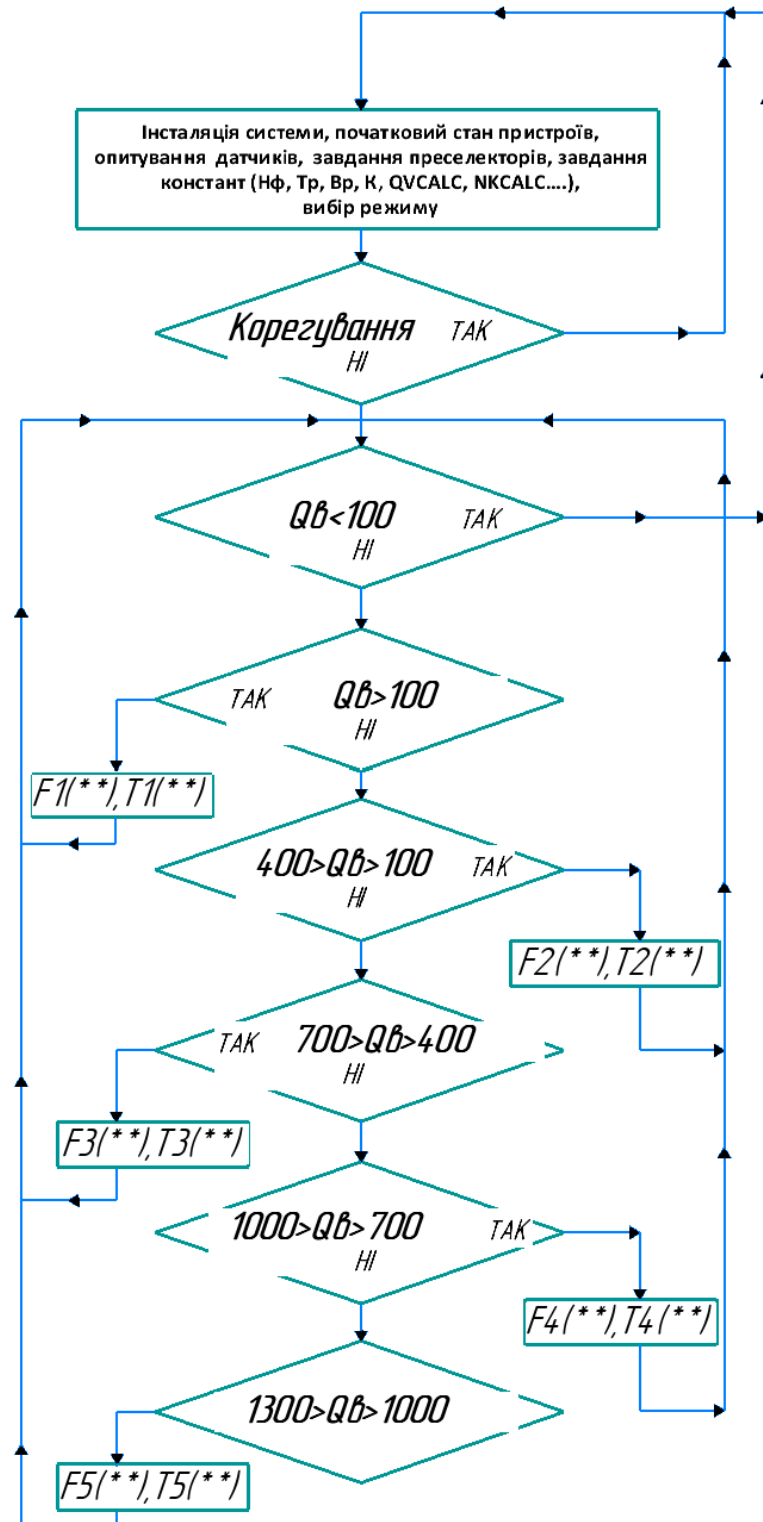


Рис.5.4. Алгоритм керування виконавчими пристроями теплиці: Нф – висота розміщення форсунок, Тр – температура повітря в середині теплиці, Вр –

вологість повітря в середині теплиці, K – кратність повітрообміну, QVCALC – підпрограма розрахунку продуктивності вентилятора, NKCALC - підпрограма розрахунку продуктивності нагрівача, Q_v – витрата вентилятора, F1- F5 – підпрограми роботи форсунок, T1-T5 – підпрограми роботи нагрівача

оновлення стандартних параметрів мікроклімату, опитування та оновлення автоматизованої системи керування, налаштування нових або перевірка попередніх констант, налаштування положення виконавчих пристроїв. Наступним кроком є перехід програми керування в початковий стан, де мають оновитися всі входи та виходи контролера.

При зміні параметрів зовнішнього середовища чи зміні культури, яка вирощується, чи зміні інших внутрішніх параметрів мікроклімату система керування має відкоригувати константи (режим роботи вентилятора, режим роботи нагрівача, режим роботи форсунок). Після корегування система має оновити всі початкові значення на поточні відповідно до нових вимог. Після оновлення значень система має опитати датчик стану потужності роботи вентилятора, якщо продуктивність менша за 100 м³/год, то система повертається на етап опитування датчика стану до того моменту поки продуктивність не стане більшою за 100 м³/год.

Якщо продуктивність стала більшою за 100 м³/год – значить вмикаються режими F1 та T1 для форсунок та нагрівача. Після чого відбувається опитування датчиків стану температури та вологості повітря і система повертається на етап корегування даних.

Якщо продуктивність вентилятора є в проміжку між 400 м³/год та 100 м³/год – значить вмикаються режими F2 та T2 для форсунок та нагрівача. Після чого відбувається опитування датчиків стану температури та вологості повітря і система повертається на етап корегування даних.

Якщо продуктивність вентилятора є в проміжку між 700 м³/год та 400 м³/год – значить вмикаються режими F3 та T3 для форсунок та нагрівача. Після

чого відбувається опитування датчиків стану температури та вологості повітря і система повертається на етап корегування даних.

```
PROGRAM P_FanSpeed
  FanSpeed: INT;    (* Поточна продуктивність вентилятора *)
  NTime: REAL;    (* Час роботи форсунок у секундах *)
  PauseTime: REAL := 14.4;
  TimerWork: TON;
  TimerPause: TON;
  NOutput: BOOL;    (* Вихід на форсунки *)
  State: INT := 0; (* 0 - старт, 1 - робота, 2 - пауза *)
END_VAR
(* --- Визначення часу роботи форсунок --- *)
CASE FanSpeed OF
  100: NTime := 5.6;
  400: NTime := 5.7;
  700: NTime := 6.1;
  1000: NTime := 6.8;
  1300: NTime := 7.8;
ELSE
  NTime := 0.0; (* якщо невідоме значення *)
END_CASE;
CASE State OF
  (* Початок – переход до фази роботи *)
  0:
    NOutput := FALSE;
    TimerWork(IN := FALSE);
    TimerPause(IN := FALSE);
    State := 1;
  (* Фаза роботи форсунок *)
  1:
    NOutput := TRUE;
    TimerWork(IN := TRUE, PT := T#1S * NTime);
    IF TimerWork.Q THEN
      NOutput := FALSE;
      TimerWork(IN := FALSE);
      State := 2;
    END_IF;
  (* Пауза між циклами *)
  2:
    TimerPause(IN := TRUE, PT := T#14.4S);
    IF TimerPause.Q THEN
      TimerPause(IN := FALSE);
      State := 1;    (* Початок нового циклу *)
    END_IF;
END_CASE;
```

Рис.5.5. Фрагмент коду керування форсунками

Якщо продуктивність вентилятора є в проміжку між 1000 м³/год та 700 м³/год – значить вмикаються режими F4 та T4 для форсунок та нагрівача. Після чого відбувається опитування датчиків стану температури та вологості повітря і система повертається на етап корегування даних.

Якщо продуктивність вентилятора є в проміжку між 1300 м³/год та 1000 м³/год – значить вмикаються режими F5 та T5 для форсунок та нагрівача. Після чого відбувається опитування датчиків стану температури та вологості повітря і система повертається на етап корегування даних.

На рис.5.4 наведено алгоритм роботи автоматизованої системи керування вологістю та температурою повітря в середині тепличного об'єкта.

Для прикладу на рис.5.5 наведено фрагмент коду керування форсунками туманоутворення написаного на мові ST.

5.4. Висновок до розділу

1. За результатами моделювання визначено дефіцит водяної пари в теплиці, розроблено цикл роботи форсунок та визначено коефіцієнт наповненості. Зі збільшенням продуктивності вентилятора збільшується час роботи форсунок, максимальне значення циклу роботи складає 15,7 секунд з витратою 8,6 г/хв.
2. За результатами моделювання визначено дефіцит теплової потужності теплиці при різних режимах роботи вентилятора, розраховано теплову потужність нагрівача для підтримання сталої температури в середині теплиці. Зі збільшенням продуктивності вентилятора збільшується потужність нагрівача, максимальне значення потужності для обігріву теплиці складає 3,0 кВт.
3. За рахунок визначених режимів роботи вентилятора та визначення втрати теплової потужності теплиці при цих режимах побудовано загальний алгоритм та програма керування форсунками та нагрівачем.
4. Запропоновано встановити 6 форсунок туманоутворення для стабілізації рівня вологості повітря не тільки по горизонтальній площині росту рослин, а й по вертикальній площині. Стабілізація вологості по вертикальній площині забезпечується механічним механізмом підйому та опусканню форсунок.

РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА СТАРТАП – ПРОЕКТУ

6.1. Опис ідеї проекту

Досить часто у теплицях виникає проблема захворювання рослин та утворення грибка через надмірне локальне зволоження повітря по всьому об'єму теплиці. Система форсунок туманоутворення може вирішити дану проблему. Для швидшої стабілізації та покриття всієї площі теплиці запропоновано встановити 6 форсунок (рис.6.1)

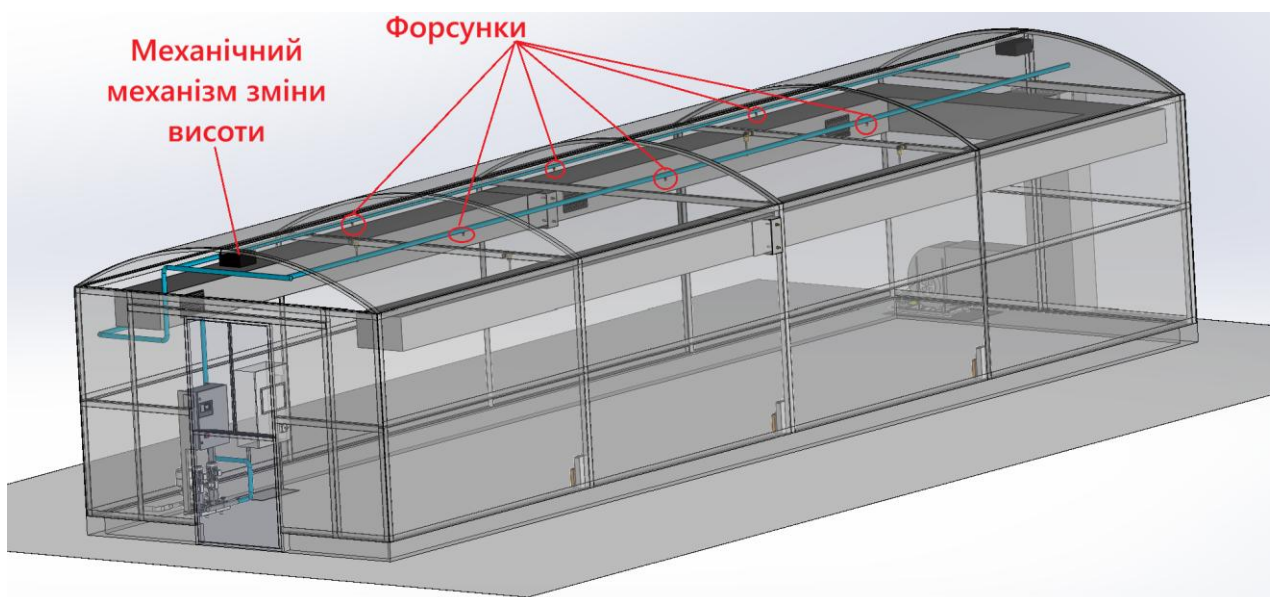


Рис.6.1. Загальний вигляд теплиці з механічним механізмом зміни висоти 6-ти форсунок

У таблиці 6.1 наведено зміст ідеї, напрямок її застосування та переваги для кінцевого споживача.

Таблиця 6.1

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Форсунки за допомогою механічного механізму	Промислові тепличні господарства	Економія води, зниження

можуть змінювати свою висоту в залежності від типу рослин, які будуть вирощуватися	Теплиці середнього об'єму	захворюваності рослин, підвищення врожайності, рівномірне розподілення вологи
--	---------------------------	---

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів наведено в табл.6.2 [35].

Таблиця 6.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики	Мій проєкт	Конкурент 1	Конкурент 2	W (слабка сторона)	N(нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
1	Зміна висоти розпилення	+	-	-			+
2	Автоматичне керування висотою	+	-	-			+
3	Адаптація до типу та фази росту рослин	+	-	-			+
4	Контролювання рівня вологості повітря	+	+	-		+	
5	Зволоження по зонам	+	+	+		+	
6	Дисперсність до 20 мкм	+	+	-			+
7	Компенсація вологості повітря в будь-якій зоні	+	-	-			+

З огляду на аналіз техніко-економічних характеристик, теплиці зі механічним механізмом зміни висоти розміщення форсунок є досить конкурентоспроможним продуктом.

6.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (табл. 6.3) [35].

Таблиця 6.3

Технологічна здійсненності ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Регулювання вологості повітря форсунками в залежності від фази росту рослин	Створення механічної системи піднімання та опускання форсунок	Наявна	Доступна
2		Використання стандартних форсунок, клапанів та приводів	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: дану ідею можна реалізувати на основі стандартного обладнання, додавши до нього привід системою піднімання та опускання магістралі форсунок туманоутворення.				

6.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Проведено аналіз попиту, результати відображені в таблиці 6.4 [35].

Таблиця 6.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2 компанії
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Невідомо
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає на 9-12 % в рік
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	EN ISO 4413: 2014 «Гідравлічні приводи. Загальні правила застосування та вимоги щодо безпеки для систем і їх складових»
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20 %

За попереднім оцінюванням ринок є привабливим для входження завдяки новій технології стабілізації вологи, хоча високі стандарти до систем керування та підтримування мікроклімату в теплиці потребують ретельної підготовки [35]. Визначено потенційні групи клієнтів, результати відображені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

п / п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Потреба у зональній компенсації дефіциту вологості в теплиці	Промислові тепличні господарства	Для них необхідне комплексне рішення по мікроклімату	Віддалене керування, різні рівні та зони зволоження

2	Необхідність точного регулювання вологості для запобігання захворювання рослин	Великі промислові теплиці	Орієнтуються на великі обсяги, надійність та економічний ефект від автоматизації	Висока продуктивність, автоматичне керування, можливість інтеграції з наявними системами
3	Потреба у зменшенні витрат води та енергії	Теплиці середнього об'єму	Часто обмежені в бюджеті, обирають рішення з оптимальним співвідношенням «ціна–якість»	Низьке енергоспоживан ня, доступність у сервісі, помірна ціна

Проводимо аналіз ринкового середовища, результати відображені в таблиці 6.6-6. 7[35].

Таблиця 6.6

Фактори загроз

п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Технологічний фактор	Нові розробки по рівномірності та стабілізації вологості в теплиці	Вдосконалення розробки
2	Ринковий фактор	Надто висока вартість	Розробка гнучкої пропозиції під різного споживача
3	Економічний фактор	Зростання вартості обладнання та матеріалів	Оптимізація системи, пошук

			нових постачальників з кращими пропозиціями
4	Технологічні ризик впровадження	Вихід з ладу обладнання	Тестування кожного продукту, додатковий сервіс для споживачів

Таблиця 6.7

Фактори можливостей

п/п	Фактор	Зміст можливостей	Можлива реакція компанії
1	Технологічний фактор	Зростання автоматизацію системи мікроклімату	Інвестування у вдосконалення алгоритмів керування та виконавчих пристроїв
2	Конкурентний фактор	Відсутність аналогів з механічним механізмом зміни висоти форсунок	Унікальність системи, конкурентна ціна
3	Фінансовий фактор	Наявність програм підтримки для розвитку агротехнологій (гранти, кредити, лізинг)	Підготовку проекту до участі у грантових програмах
4	Технологічні можливості виробництва	Використання стандартного обладнання та комплектуючих	Швидкий запуск виробництва, можливість масштабування без суттєвих витрат

Проводимо аналіз пропозиції, результати відображені в таблиці 6.8 [35].

Таблиця 6.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - монополія	На ринку існує кілька компаній, що пропонують системи зволоження, але продукти значно різняться за технологіями та функціоналом	Формування унікальної ціннісної пропозиції: механічний механізм, автоматизація, дрібнодисперсний туман; активний маркетинг
2. За рівнем конкурентної боротьби - національний	Присутні як українські виробники (системи туманоутворення), так і зарубіжні компанії (Ізраїль, Нідерланди)	Підвищення якості продукції, сертифікація за міжнародними стандартами, участь у міжнародних виставках
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Конкуренція відбувається між компаніями, що виробляють обладнання для теплиць: системи поливу, туманоутворення, вентиляції	Розширення комплексу послуг — монтаж, сервіс, навчання персоналу; створення партнерських програм для теплиць
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Система форсунок конкурує з іншими видами систем зволоження (високого тиску, ультразвукові, традиційні форсунки)	Розробка порівняльних таблиць, демонстрація переваг (економія води, стабільність вологості, адаптивність до культури)
5. За характером конкурент-	Більшість тепличних господарств орієнтуються на якість, точність роботи	Акцент на технологічних перевагах: автоматична зміна висоти, зональне

них переваг - неці нова	та надійність систем мікроклімату, а не лише на ціну	зволоження, інтеграція з датчиками, IoT
6. За інтенсивністю - не марочна	Бренди у цій галузі не мають сильної впізнаваності, рішення порівнюють за характеристиками, а не за назвою компанії	Створення власного бренду, просування через кейси, відгуки клієнтів, тестові інсталяції; формування корпоративної унікальності

Проводимо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера, додаток А) (табл. 6.9) [35].

Таблиця 6.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Компанії, що вже виробляють системи туманоутворення або високотискові зволоження (традиційні форсунки, системи ВТ) —	Компанії, що виробляють поливні системи, зрошення, вентиляційні системи — можуть розширити продукти і зайти у сегмент мікроклімату	Постачальники насосів, форсунок, приводів, трубопроводів; невелика кількість виробників приводить до залежності від цін	Промислові теплиці, середні тепличні господарства, фермери — мають середній рівень переговорної сили	Ультразвукові зволожувачі, системи крапельного поливу з туманом, мобільні вологоміри, вентиляційні системи з охолодженням

	пропонують подібний функціонал без механічної зміни висоти				
Висновки:	Необхідність чіткої диференціації ї продукту, технологічна перевага механічного механізму	Потреба в постійному вдосконален ні та швидкій комерціаліза ції технології	Важливість укладання довгостроко вих контрактів, пошук альтернатив них постачальн иків	Необхідніст ь конкурентн ої ціни, сервісу, демонстрації ї них інсталяцій	Необхідність технологічно ї переваги (20 мкм, адаптивність по висоті), доведення ефективності порівняно із замінниками

Аналіз за М. Портером показує, що галузь має середній рівень конкурентного тиску з потенціалом зростання. Прямі конкуренти ще не мають рішень із механічним механізмом зміни висоти форсунок, що створює вікно можливостей для виходу на ринок.

На основі аналізу конкуренції (табл. 6.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 6.2), вимог споживачів до товару (табл. 6.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 6.6-6.7) визначаємо та обґрунтовуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз наведено в таблиці 6.10 [35].

Таблиця 6.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Технологічний рівень продукту	Інновація у напрямку зволоження в теплиці по вертикалі росту рослин
2	Ціна	Низька вартість на монтаж та обслуговування

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 6.10) проводимо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 6.11) [35].

Таблиця 6.11

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту»

п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з компанією Holman Industries						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
	Технологічний рівень продукту						*		
	Ціна								*

Далі зроблено SWOT-аналіз (табл.6.12) [35].

Таблиця 6.12

SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. Новітня технологія, яка відсутня на ринку – пошаровість зволоження. 2. Точна та ефективна стабілізація вологи по всьому об'єму теплиці. 3. Економія води та електроенергії.	Слабкі сторони: 1.Необхідність стартового капіталу. 2.Вища ціна у порівнянні зі стандартними системами зволоження.
---	--

4. Збільшення кількості промислових господарств, а відповідно збільшення попиту на автоматизовані системи зволоження.	
Можливості: 1.Стрімкий розвиток тепличних господарств. 2.Актуальність зменшення витрат. 3.Участь у програмах для отримання фінансування.	Загрози: 1.Аналоги з Китаю. 2.Зростання цін на компоненти та матеріали.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів наведені в таблиці 6.13 [35].

Таблиця 6.13

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Пошук державних або приватних програм фінансування	Середня - є досить велика кількість програм, але зараз вони спрямовані на іншу сферу	Середні 6-18 місяців
2	Фінансування за власний кошт	Низька – залежить від власного капіталу	Короткі 4-6 місяців
3	Партнерство з виробниками обладнання	Висока – компанії зацікавленні в інноваціях	Короткі 2-4 місяців

6.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Визначаємо стратегії охоплення ринку (табл.6.14) [35].

Таблиця 6.14

Вибір цільових груп потенційних споживачів

п / п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
	Промислові тепличні господарства	Висока – є потреба у стабілізації вологості по всьому об'єму	Високий – для великих площ необхідно забезпечити рівномірність зволоження та унеможливити захворювання рослин	Середня – є стандартні рішення по зволоженню повітря по площі теплиць, але немає по висоті	Середня – потрібна презентація прототипу, сертифікація та демонстрація ефективності
	Теплиці середнього об'єму	Середня – є потреба у стабілізації вологості по всьому об'єму, але	Середній – заощадження коштів за рахунок енергоефективності	Низька – для даної групи, зазвичай, достатньо використовувати стандартні	Висока – ціна та енергоефективність

		не за велику ціну		рішення по зволоженню	
Які цільові групи обрано:					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) визначено стратегію диференційованого маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку сформовано базову стратегію розвитку (табл. 6.15) [35].

Таблиця 6.15.

Визначення базової стратегії розвитку

п / п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку *
1	Випуск системи зволоження для промислових теплиць	Диференційований маркетинг	механічним механізмом зміни висоти, точний контроль та стабілізація вологості	Стратегія інноваційного розвитку
2	Налаштування системи зволоження для теплиць середнього об'єму	Диференційований маркетинг	Висока енергоефективність, висока якість зволоження повітря без шкоди рослинам, співвідношення ціна - якість	Стратегія зростання (розширення ринку)

Наступним кроком було обрано стратегії конкурентної поведінки (табл. 6.16) [35].

Таблиця 6.16

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

п/п	Чи є проект «перешпопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Так	Так	Ні, компанія створює унікальну систему	Інноваційна стратегія з елементами випереджувальної конкуренції.

Далі розроблено стратегію позиціонування (табл. 6.17) [35].

Таблиця 6.17

Визначення стратегії позиціонування

п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Висока точність стабілізації вологості в об'ємі теплиці	Стратегія інноваційного розвитку	Механічним механізмом вертикальної зміни висоти форсунок; адаптивне зональне зволоження; автоматичне керування мікрокліматом	«Точність», «Контроль», «Технологічність»
2	Енергоефективність та	Стратегія інноваційно	Дрібнодисперсний туман (20 мкм), мінімальні витрати	«Ефективність», «Економія

	економія води	го розвитку / зростання	води, зменшення часу роботи насоса	ресурсів», «Оптимальність»
3	Розумна ціна при високій функціональності	Стратегія зростання	Низькі витрати на монтаж, використання доступних компонентів; висока якість при помірній ціні	«Доступність», «Цінність», «Вигідна інвестиція»

6.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Підсумовуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару (табл.6.18) [35].

Таблиця 6.18

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Стабільна та рівномірна вологість у всьому об'ємі теплиці	Точне зональне та вертикальне зволоження без ризику перезволоження та утворення грибка	Механічний механізм зміни висоти форсунок — відсутній у конкурентів; можливість адаптації до фази росту рослин
2	Запобігання захворюванню рослин	Мікроклімат без шоків, перепадів вологості; стабілізація умов	Дрібнодисперсний туман (≈ 20 мкм), рівномірний розподіл без крапельних утворень; інтелектуальне керування

3	Економія води та енергоресурсів	Зменшення споживання води до 30–40%, скорочення часу роботи насосів	Оптимізовані режими розпилення, автоматичне вимкнення по зонах, низькотискова економічна технологія
4	Зниження експлуатаційних витрат	Просте обслуговування, недорогі стандартні комплектуючі	Низька собівартість сервісу, висока надійність механічного механізму, використання недорогих вузлів
5	Підвищення врожайності	Оптимальні умови росту — вологість на рівні фізіологічної потреби культури	Адаптивна система зволоження по висоті, недосяжна для традиційних стаціонарних форсунок

Далі розробляємо трирівневу маркетингову модель товару (табл.6.19) [35].

Таблиця 6.19

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Базова потреба: забезпечення стабільного, рівномірного та контрольованого рівня вологості в теплиці. Основна вигода: адаптивне вертикальне зволоження, рівномірний розподіл вологи, економія ресурсів, зниження ризику захворювань, підвищення врожайності.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Механічний механізм зміни висоти форсунок.		

	2.Дрібнодисперсне туманоутворення (20 мкм).		
	3.Адаптивне зональне керування.		
	4.Енергоефективна гідропневматична схема.		
	5. Модульність.		
	6. Використання стандартних комплектуючих.		
	7. Швидка стабілізація вологості.		
	8. Захист від перезволоження.		
	Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування тощо		
	Пакування		
	Марка: ТОВ «Степчук В.О.», «Теплиця+»		
III. Товар із Товар із підкріпленням	До продажу: консультації, 3D-модель, розрахунок параметрів, індивідуальна адаптація.		
	Після продажу: гарантія, сервіс, онлайн-моніторинг, інтеграція, навчання.		
	Після продажу: гарантія, сервіс, онлайн-моніторинг, інтеграція, навчання.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: унікальний механічний механізм, власні алгоритми, адаптивне зональне зволоження, гідропневматична схема, інтеграція з 3D-моделлю			

Наступним кроком визначаємо цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня

доходів цільової групи споживачів (табл. 6.20). Аналіз проводиться експертним методом [35].

Таблиця 6.20

Визначення меж встановлення ціни

п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Низький / середній (стандартні форсунки, ультразвукові зволожувачі, системи високого тиску; простий функціонал, без адаптивності)	Середній (професійні системи туманоутворення без механічного механізму, зі стандартною автоматикою)	Середній та вище середнього (промислові тепличні комплекси та теплиці середнього об'єму мають достатній бюджет для інноваційних систем)	Нижня межа: на рівні або трохи вище товарів-замінників, з урахуванням вищої функціональності. Верхня межа: на рівні або трохи вище товарів-аналогів завдяки унікальному механічному механізму та інноваційності.

Наступним кроком визначаємо оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 6.21) [35].

Таблиця 6.21

Формування системи збуту

п / п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Клієнти здійснюють закупівлі раціонально, орієнтуючись на технологічність, надійність та економію ресурсів. Переважають професійні покупці (тепличні господарства, агропідприємства), що потребують консультацій і технічного супроводу.	Консультації щодо вибору конфігурації системи; технічна підтримка; монтаж та налаштування; гарантійний і післягарантійний сервіс; оперативна доставка комплектуючих; навчання персоналу замовника.	Короткий канал (виробник → кінцевий споживач) або виробник → дистриб'ютор → споживач для віддалених регіонів.	Комбінована система збуту: прямий продаж великим тепличним комплексам та через спеціалізованих дистриб'юторів/агросалони для середніх і малих господарств.

Розробляємо концепції маркетингових комунікацій (табл. 6.22) [35].

Таблиця 6.22

Концепція маркетингових комунікацій

п / п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для промо	Завдання рекламного промо	Концепція рекламного звернення
-------	---------------------------------------	--	-----------------------------------	---------------------------	--------------------------------

			зиціонування	відомлення	
1	Раціональний підхід до вибору обладнання; рішення приймаються на основі економічної вигоди, надійності та технологічності. Високий попит на експертні консультації та докази ефективності.	Спеціалізовані аграрні сайти, технічні форуми, YouTube-канали про тепличні технології, виставки та демонстрації, прямі переговори з виробником, галузеві соцмережеві групи. Інноваційність технології; оптимальне та рівномірне зволоження; адаптивний механічний механізм; економія води; стабільність мікроклімату; надійність(Facebook, Telegram).	Інноваційність технології; оптимальне та рівномірне зволоження; адаптивний механічний механізм; економія води; стабільність мікроклімату; надійність для професійних теплиць.	Показати технологічні переваги системи, продемонструвати економічний ефект, підкреслити унікальність механічного механізму, сформувавши довіру до виробника.	“Розумна система туманоутворення, що працює за вас”: підкреслення точності, адаптивності та економічності; акцент на професійному рівні рішення та реальних вигодах для тепличного господарства.

6.6. Висновок до розділу

Комплексний аналіз ринку та характеристик інноваційної механічної системи туманоутворення показав високий потенціал її успішного впровадження у професійні тепличні господарства. Дослідження споживачів виявило чіткий попит на технології, здатні забезпечувати стабільний мікроклімат, економити ресурси та працювати автономно – саме такі властивості є ключовими для вашого продукту.

У сукупності всі 22 таблиці підтверджують, що продукт має високий ринковий потенціал, правильно визначену цільову аудиторію, конкурентні переваги, оптимальну модель збуту та чітко сформовану комунікаційну стратегію. Це забезпечує стійку основу для запуску й масштабування інноваційної системи туманоутворення на ринку тепличних технологій.

ВИСНОВОК

У магістерській роботі здійснено комплексне дослідження процесів тепло- та вологообміну в тепличному об'єкті, розроблено адаптивну гідропневматичну мехатронну систему зволоження повітря та обґрунтовано алгоритми її роботи. На основі аналізу існуючих систем автоматизованого керування мікрокліматом встановлено, що ключовим фактором формування ефективної стратегії керування є врахування термодинамічних процесів у замкненому об'ємі теплиці. Це визначило підхід до побудови моделі, вибору технічних засобів та формування адаптивної логіки роботи системи.

На першому етапі роботи визначено початкові параметри та створено тривимірну модель тепличного об'єкта, яка є багатофункціональною і дозволяє проводити широкий спектр тепломасообмінних досліджень. Модель охоплює не лише процеси зміни вологості й температури, а й втрати теплоти, вплив вуглекислого газу, конфігурацію вентиляційних вікон та інші чинники, що формують мікроклімат. Це забезпечило науково обґрунтований фундамент для подальших експериментів.

У ході дослідження процесів розповсюдження вологості, температури та швидкості повітря в теплиці встановлено вплив продуктивності вентилятора на динаміку стабілізації параметрів мікроклімату. Визначено, що стабілізація вологості розпочинається вже на 5-й секунді роботи системи, а стабілізація температури — у діапазоні 5–7 секунд. Одночасно виявлено виникнення вихрових потоків, що формують локальні «мертві зони», які порушують рівномірність розподілу тепла та вологи. Це обґрунтувало необхідність додаткових засобів керування та зонального контролю в теплиці.

Проведений аналіз теплових втрат дав змогу кількісно оцінити обсяг теплоти, що передається через огорожувальні конструкції в навколишнє середовище. Це дозволило визначити дефіцит теплової потужності та сформулювати вимоги до нагрівача, який має підтримувати сталу температуру повітря при різних режимах вентиляції.

На підставі моделювання розраховано дефіцит водяної пари та визначено оптимальний цикл роботи форсунок. Встановлено, що зі зростанням продуктивності вентилятора збільшується тривалість циклу роботи зволожувальних пристроїв, максимальне значення якого становить 15,7 секунди при витраті 8,6 г/хв. Аналогічно розраховано необхідну теплову потужність нагрівача, максимальне значення якої досягає 3,0 кВт. На основі цих даних побудовано загальний алгоритм і програму керування форсунками та нагрівачем, що забезпечує адаптивне реагування системи на зміну параметрів мікроклімату.

Окремо було розроблено конструкцію системи туманоутворення з 6-ма форсунками та принципову гідравлічну схему системи. Проведений підбір обладнання, розрахунок втрат тиску та визначення діаметрів трубопроводів забезпечили відповідність системи реальним умовам експлуатації. Запропонована конфігурація з шістьма форсунками та механічним механізмом вертикального переміщення дозволяє стабілізувати вологість не лише у горизонтальній, а й у вертикальній площині, що суттєво покращує однорідність зволоження рослин.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що розроблена адаптивна гідропневматична мехатронна система зволоження повітря забезпечує високоточне підтримання мікрокліматичних параметрів теплиці, оптимізує витрати енергії та води, а також дозволяє враховувати динамічні зміни середовища. Отримані наукові висновки й технічні рішення можуть бути використані як база для створення інтелектуальних систем керування тепличними об'єктами різних масштабів та рівнів технологічності.

ДОДАТОК 1

Насосна станція 2 GP(E) MATRIX 3-3/0,65 (M) (рис.1):

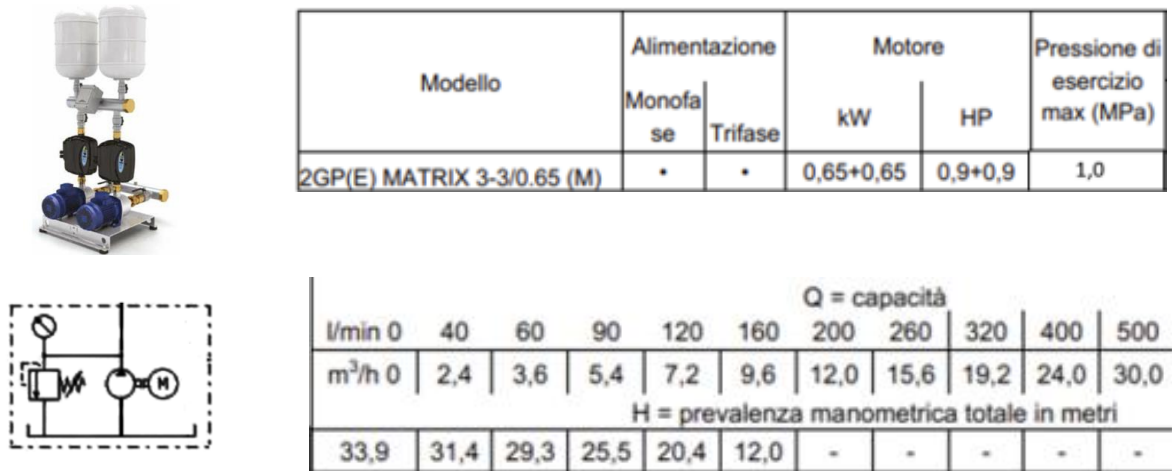


Рис.1. Насосна станція та її характеристики [21]

Редуктор тиску води Honeywell D05FS-1A (рис. 2):

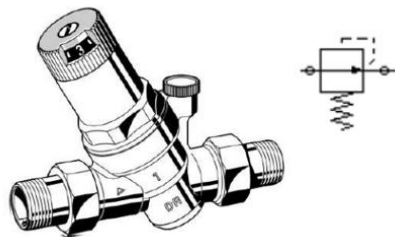


Рис.2. Редуктор тиску води Honeywell D05FS-1A [22]

Витратомір HERZ. Діапазон регулювання 0-3 л/хв (8532) (3F90023) (рис. 3):



Рис.3. Витратомір HERZ -3 л/хв (8532) (3F90023) [23]

Манометр AFRISO тип RF 50 RAD 0-10 бар | 1/4" | к.т. 2,5 (рис. 4):



Тип продукції	• манометр
Діаметр, мм	• 50
Розмір різьблення (дюйм)	• 1/4"
Виконання	• радіальний
Діапазон вимірювання тиску	• 0..10 бар
Клас точності	• 2,5
Призначення	• для водопостачання

Рис.4. Манометр AFRISO тип RF 50 RAD 0-10 бар | 1/4" | к.т. 2,5 [24]

Фільтр сітчастий Hunter (HFR-100-075-40) 1" з редуктором тиску 2.8 бар, 100 мкм (рис.5):



Рис.5. Фільтр сітчастий Hunter (HFR-100-075-40) 1" [25]

Гідравлічний замок Runxin RX pl (рис 6):



Рис.6. Гідравлічний замок Runxin RX pl [26]

Розподільник SIRAI L145R2-Z614A1/2x10 G1/2" PN 0,4-6 (рис.7):

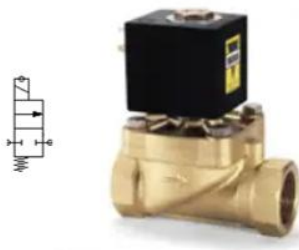


Рис. 7. Розподільник SIRAI L145R2-Z614A1/2x10 G1/2" PN 0,4-6 [27]

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фото з природним типом зволоження [Електронний ресурс].
<https://teplitca.kiev.ua/ua/a357405-teplitsa-zemle.html>
2. Фото з крапельним типом зволоження [Електронний ресурс].
<https://teplitca.kiev.ua/ua/a470961-kak-sdelat-kapelnyj.html>
3. Фото з туманоутворюючим типом зволоження [Електронний ресурс].
<https://tecnocooling.in.ua/ru/iskusstvennyj-tuman-v-teplice>
4. Фото з зрошенням огорожувальної конструкції [Електронний ресурс]. –
<https://www.farmtek.com/media/catalog/product/cache/f9d76ab52b9381a4c660f4521b58327f/1/0/108997f.jpg>
5. Фото з автоматичними системами клімат-контролю [Електронний ресурс]. –
https://www.mdpi.com/horticulturae/horticulturae-09-01255/article_deploy/html/images/horticulturae-09-01255-g001.png
6. Wang, X. et al. Smart greenhouse environmental control based on multi-sensor integration // *Applied Sciences*, 12(18), 9192, 2022. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/18/9192>
7. Liao, X. et al. Precision irrigation control technologies in modern agriculture // *Agriculture*, 13(7), 1442, 2023. –<https://www.mdpi.com/2077-0472/13/7/1442>
8. Arbel, A. et al. Evaporative cooling efficiency of a fogging system in a rose greenhouse // *ResearchGate*, 2003.
<https://www.researchgate.net/publication/240507771>
9. Park, S. et al. Evaluation of evaporative cooling systems in greenhouses // *PMC*, 2015. –<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4519188>
10. Kim, D. et al. Automation of irrigation and fertigation in greenhouses // *Agriculture*, 13(8), 1560, 2023. –<https://www.mdpi.com/2077-0472/13/8/1560>
- 11 Smirnov, A. Analysis of microclimate regulation in protected soil conditions // *E3S Web of Conferences*, 187, 03007, 2020. –
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018703007>
12. Фото системи кліматичного контролю теплиці [Електронний ресурс]. –

https://atpicak.ucoz.ua/load/navchalnij_posibnik/rozdil_5_avtomatizacija_t_p_u_zak_hishhenomu_grunti/5_5_avtomatizacija_mikroklimatu_v_teplicjakh_za_dopomogoju_programnikh_kontroleriv/24-1-0-75

13. Підвищення ефективності теплиць: інтеграція Інтернету речей та навчання з підкріпленням для оптимізованого клімат-контролю // *Sensors*, 24(24), 8109, 2024. – <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/24/8109>

14 Limited Climate Control with GA-PI Mode for MIMO Greenhouse Model // *DergiPark*, 2020. – <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1028495>

15. Огляд стратегій та моделей контролю навколишнього середовища для сучасних сільськогосподарських теплиць // *Sensors*, 25(5), 1388, 2025. – <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/5/1388>

16. Інтелектуальна регуляція температури та вологості в теплицях овочів на основі алгоритму PID з одним нейроном // *Electronics*, 13(11), 2083, 2024. – <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/11/2083>

17. Neural-networks-based models for greenhouse climate control [Електронний ресурс]. – <https://scispace.com/pdf/neural-networks-based-models-for-greenhouse-climate-control-14f8dwchtp.pdf>

18. Форсунка UM50M– <https://www.icspray.co.uk/uploads/nozzles/UltiMist.pdf>

19. Є.Ю. Синицина, О.П. Губарев, «Модель об'єкту керування мехатронної системи мікроклімату теплиці середнього об'єму» - *Mech. Adv. Technol.* Vol. 7, No. 3, 2023, pp. 330–336» – <https://journal.mmi.kpi.ua/article/view/290773/289501>

20. Буслов В. К. Методичні вказівки до курсового проекту за курсом "Проектування об'ємних гідроприводів" для студентів з фаху "Гідравлічні і пневматичні машини" / В. К. Буслов. – Київ: НТУУ "КПІ", 2008. – 80 с.

21. Насосна станція 2 GP(E) MATRIX 3-3/0,65 (M) – https://watton.ua/docs/ebara/DataBook_GP-GPE-MATRIX.pdf

22. Редуктор тиску води Honeywell D05FS-1A – <https://profimann.com.ua/images/companies/1/PDF/d05fs.pdf?1585217716984>

23. Витратомір HERZ. Діапазон регулювання 0-3 л/хв (8532) (3F90023) – https://sansmart.com.ua/download/pdf/herz/herz_5f87e3ae7285387bf24042ce5d6bb035.pdf
24. Манометр AFRISO тип RF 50 RAD 0-10 бар | 1/4" | к.т. 2,5 – <https://profimann.com.ua/uk/zaporno-reguliruyuschaya-armatura/kip/manometry-termometry-termomanometry/manometr-afriso-tip-rf-50-rad-0-10-bar-1-4-k.t.-2-5/>
25. Фільтр сітчастий Hunter (HFR-100-075-40) 1" – <https://ukrpoliv.com.ua/content/filtr-nerzhaveyushchaya-stal-hunter-hfr-100-75-40-s-regulyatorom-davleniya-28-bar>
26. Каталог. Runxin RX pl 24B (електронний ресур) (2024) – Режим доступу до ресурсу: https://teren.ua/ua/runxin-rx-pl-24b-34-kran-s-elektroprivodom/?gclid=Cj0KCQjwu8uyBhC6ARIsAKwBGpQHT7kqkz5pyYr22Dfoc3numt98ZU01K_lcZmu57l1VtSUMOldKqHEaAjLPEALw_wcB
27. Розподільник для системи зволоження повітря SIRAI L145R2-Z614A1/2x10 G1/2" PN 0,4-6 – <https://armatura.net.ua/klapan-elektromagnitniy-sirai-l145r2-z614a1-2x10-g1-2-pn-04-6/>
28. Ben Ali R., Bouadila S., Mami A. Development of a Fuzzy Logic Controller applied to an agricultural greenhouse experimentally validated. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 141. P. 798–810.
29. Fan Z., Li Y., Jiang L., Wang L., Li T., Liu X. Analysis of the Effect of Exhaust Configuration and Shape Parameters of Ventilation Windows on Microclimate in Round Arch Solar Greenhouse. *Sustainability*. 2023; 15(8):6432. DOI: 10.3390/su15086432.
30. Русанов С. А. Основи теплотехніки : навч. посіб. — К.: КНТУ, 2019.
31. Дубровська В.В., Шкляр В.І. Термодинаміка та теплообмін : навч. посіб. — Київ: НТУУ «КПІ», 2016.
32. Синицина Є. Ю. Гідропневматична система об'єкту тепличного господарства середнього об'єму: дис. ... д-ра філософії : 131 Прикладна механіка / Є. Ю. Синицина ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. І. Сікорського" ; наук. кер. О. П. Губарев. — Київ, 2025. — 168 с.

33. Mechatronic greenhouse microclimate temperature control system, Y. Synytsyna, O. Hubarev, Mech. Adv. Technol. Vol. 8, №2 (101), 2024, 164–171.
<https://journal.mmi.kpi.ua/article/view/298506/299275>
34. Мехатронна система керування вологістю мікроклімату теплиці, Є.Ю. Синицина, О.П. Губарев, Вісник машинобудування та транспорту, Т. 10, №2, 2024, 38-47
<https://met-journal.com.ua/uk/journals/t-10-2-2024/mekhatronna-sistema-keruvannya-vologistyuu-mikroklimatu-teplitsi>
35. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ:НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.