

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського  
Навчально-науковий інститут муніципального управління  
та міського господарства  
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

## ТЕМА РОБОТИ

### **«АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛИЦІ»**

Здобувача вищої освіти  
Гончара Романа Олександровича  
Освітня програма  
«Автоматизоване управління  
технологічними процесами»  
(Спеціальність 174 «Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології  
та робототехніка»)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Науковий керівник:  
к.т.н., доцент, Ківа І.Л.

\_\_\_\_\_

(підпис)

Національна шкала \_\_\_\_\_  
Кількість балів \_\_\_\_\_  
Оцінка: ECTS \_\_\_\_\_

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського  
Навчально-науковий інститут муніципального управління  
та міського господарства  
Кафедра інженерних систем та технологій  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані  
технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри

Наталія ОМЕЦІНСЬКА

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гончару Роману Олександровичу

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Автоматизована система керування мікрокліматом промислової теплиці  
керівник роботи: к.т.н., доцент, Ківа І.Л.  
затвержені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:  
від « 2 » жовтня 2025 р. № 116
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи: 5 грудня 2025р
3. Вихідні дані до роботи: Промислова грибна теплиця з багатозональною структурою для вирощування шампінйонів, глив та експериментальної секції лисичок, оснащена системами автоматизованого керування мікрокліматом, контролю параметрів субстрату та розсіяного освітлення.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Вступ. Теоретичний розділ. Дослідницько-аналітичний розділ. Проектно-рекомендаційний розділ. Охорона праці та навколишнього середовища. Загальні висновки по роботі. Список використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу: графічний матеріал виконаний у вигляді мультимедійної презентації.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	к.т.н., доцент, Ківа І.Л.		
2	к.т.н., доцент, Ківа І.Л.		
3	к.т.н., доцент, Ківа І.Л.		
4	к.т.н., доцент, Ківа І.Л.		

7. Дата видачі завдання 3 жовтня 2025р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи		Термін виконання етапів роботи	Заключний документ етапу
1	Вибір теми магістерської роботи, призначення керівника		до 08.09.2025	Затвердження переліку тем магістерських робіт та наукових керівників
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану магістерської роботи		до 15.09.2025	Список літературних (інформаційних) джерел, план роботи
3	Визначення об'єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми магістерського дослідження		до 22.09.2025	Текст вступу
4	Написання тексту магістерської роботи відповідно до її структури:		23.09.2025 – 10.11.2024	Текст розділів
	4.1	I розділ	23.09.2025 – 05.10.2025	
	4.2	II розділ	06.10.2025 – 20.10.2025	
	4.3	III розділ	21.10.2025 – 03.11.2025	
	4.4	IV розділ	04.11.2025 – 10.11.2025	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення		11.11.2025 – 14.11.2025	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків		15.11.2025 – 21.11.2025	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист магістерської роботи		24.11.2025 – 28.11.2025	Магістерська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування магістерської роботи		01.12.2025 – 05.12.2025	Магістерська робота
9	Реєстрація магістерських робіт на кафедрі		до 05.12.2025	Магістерська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист магістерської роботи		15.12.2025 – 26.12.2025	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

## АНОТАЦІЯ

**Гончар Р. О. Автоматизована система керування мікрокліматом промислової теплиці– Рукопис.**

Кваліфікаційна магістерська робота за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2025 рік.

Проект автоматизованої промислової теплиці для вирощування грибів спрямований на створення високотехнологічного агропромислового комплексу, здатного забезпечити стабільні врожаї у контрольованому мікрокліматичному середовищі. Робота поєднує сучасні інженерні рішення, системи моніторингу та інтелектуального керування для підтримання оптимальних параметрів повітря, субстрату та освітлення, необхідних для культивації шампінйонів, глив та експериментального вирощування лисичок. Особливу увагу приділено створенню багатозонального середовища з індивідуальними режимами у кожній секції теплиці, що дозволяє адаптувати мікроклімат до специфічних біологічних потреб кожного виду грибів.

Ключовою інновацією є впровадження високоточної автоматизованої системи, яка об'єднує датчики температури, вологості, концентрації CO<sub>2</sub>, параметрів субстрату та спеціалізовані системи мікротуманного зволоження й адаптивного розсіяного освітлення. Завдяки застосуванню програмованих логічних контролерів створюється можливість динамічного керування мікрокліматом, прогнозування змін та автоматичного коригування параметрів для забезпечення стабільного росту грибів у різних фазах виробничого циклу. Окремим компонентом проекту є експериментальна секція для культивації лисичок, яка моделює природні лісові умови та використовує нові підходи до керування світлом, субстратом і газовим обміном.

**Ключові слова:** промислова теплиця, гриби, шампінйони, гливи, лисички, мікроклімат, зволоження, освітлення, датчик, контролер, автоматизація, субстрат.

## ABSTRACT

### **Gonchar R. O. Automated microclimate control system for industrial greenhouses – Manuscript.**

The project of an automated industrial greenhouse for mushroom cultivation is aimed at creating a high-technology agro-industrial complex capable of maintaining stable yields within a controlled microclimatic environment. The work integrates modern engineering solutions, monitoring systems, and intelligent control algorithms to maintain optimal air, substrate, and lighting parameters required for cultivating button mushrooms, oyster mushrooms, and the experimental cultivation of chanterelles. Special attention is given to forming a multi-zone environment with individual regimes for each greenhouse section, allowing the microclimate to be precisely adapted to the specific biological requirements of each mushroom species.

A key innovation of the project is the implementation of a high-precision automated system that incorporates temperature, humidity, CO<sub>2</sub> concentration, and substrate-parameter sensors, as well as specialized micro-fog humidification units and adaptive diffuse lighting modules. Through the use of programmable logic controllers, the system enables dynamic control of the microclimate, forecasting of environmental changes, and automatic correction of parameters to ensure stable mushroom growth throughout the production cycle. A separate component of the project is an experimental section for chanterelle cultivation, designed to simulate natural forest conditions and employ advanced approaches to light management, substrate conditioning, and gas exchange.

**Keywords:** industrial greenhouse, mushrooms, champignons, oyster mushrooms, chanterelles, microclimate, humidification, lighting, sensor, controller, automation, substrate.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....	10
1.1 Вибір об'єкту автоматизації.....	10
1.2 Параметри гибної теплиці.....	17
1.3 Субстрат та харчування грибів.....	25
1.4 Висновки до розділу 1.....	28
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....	30
2.1 Вибір бази вирощування для розуміння умов автоматизації.....	30
2.2 Умови автоматизації.....	38
2.3 Контроль якості субстрату.....	54
2.4 Висновки до розділу 2.....	60
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ .....	62
3.1 Біологічні передумови вирощування лисичок.....	62
3.2 Формування мікроклімату експериментальної секції та вимоги до середовища культивації лисичок.....	64
3.3 Структура субстрату, технологія його підготовки та контроль фізико-хімічних параметрів.....	68
3.4 Алгоритми автоматизованого керування мікрокліматом секції та роль ПЛК у забезпеченні стабільності умов.....	71
3.5 Фази розвитку міцелію лисичок у штучних умовах та їх кореляція з параметрами середовища.....	74
3.6 Інтелектуальні моделі прогнозування врожайності, цифрова аналітика та оптимізація процесів культивації.....	77
3.7 Комплексна інтегральна модель експериментальної секції.....	81
3.8 Висновки до розділу 3 .....	85
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	88
4.1 Охорона праці при вирощуванні грибів.....	88
4.2 Техніка безпеки та охорона праці при роботі з міцелієм.....	91
4.3 Техніка безпеки та охорона праці при монтажних-налагоджувальних роботах у теплиці.....	94
4.4 Безпека у надзвичайних ситуаціях.....	97
4.5 Висновки до розділу 4.....	100
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ .....	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	105

## ВСТУП

У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу зростає потреба у підвищенні ефективності виробництва, стабільності врожайності та максимальному використанні потенціалу контрольованих умов вирощування. Урбанізація, зміни клімату та нестабільність традиційних джерел продовольства стимулюють пошук нових технологій, здатних забезпечити безперервне виробництво незалежно від сезонних і природних факторів. Саме тому промислові теплиці, оснащені системами автоматизації, стають одним із ключових напрямів інновацій у сільському господарстві. Проєкт автоматизованої теплиці для вирощування грибів, у якій інтегровано комплекс високоточних технічних рішень та моделювання природних умов, пропонує новий підхід до організації біотехнологічного виробництва.

Особливістю цього проєкту є поєднання традиційних методів культивуації грибів із сучасними інженерними системами, які забезпечують повний контроль за мікрокліматом теплиці. Регулювання температури, вологості, освітлення та газового складу повітря здійснюється за допомогою автоматизованих підсистем, що функціонують у взаємодії з датчиками, виконавчими механізмами та програмованими логічними контролерами. Така інтеграція дозволяє створити стабільне середовище для вирощування шампінйонів і глив, а також реалізувати експериментальну секцію для культивуації лисичок — виду грибів, який у природі потребує складних та специфічних умов.

На відміну від традиційних тепличних рішень, у цьому проєкті важливу роль відіграє багатозональність виробничого простору. Поділ теплиці на окремі секції з індивідуальними режимами мікроклімату дозволяє створювати оптимальні умови для кожного виду грибів, враховуючи їхні біологічні особливості. Експериментальна зона для вирощування лисичок потребує моделювання лісового середовища, зокрема контрольованого розсіяного освітлення, мікротуманного зволоження, керованої вентиляції та стабільності параметрів субстрату. Впровадження таких рішень є вагомим кроком у напрямку розширення можливостей промислового грибівництва.

Автоматизація процесів керування теплицею забезпечує високу точність відтворення природних умов, що неможливо досягти за ручного регулювання. За допомогою високочутливих давачів та програмованих контролерів здійснюється безперервний моніторинг параметрів, оперативна корекція відхилень та прогнозування змін у виробничому середовищі. Це створює сприятливі умови для стабільного росту грибів, знижує втрати, підвищує продуктивність праці та енергоефективність тепличного господарства.

Реалізація такого проєкту вимагає комплексного підходу, який включає принципи промислової автоматизації, біотехнології, системного аналізу та проєктування технічних засобів контролю. Особливу увагу приділено безпеці персоналу, енергоощадності та адаптації тепличних систем до можливих змін зовнішнього середовища, зокрема в умовах воєнного стану, коли важлива безперервність виробництва та стійкість інфраструктури.

**Об'єкт дослідження:** технологічно оснащена промислова теплиця для вирощування грибів у контрольованому мікрокліматичному середовищі.

**Предмет дослідження:** інтегровані системи автоматизованого керування мікрокліматом теплиці та технологічні рішення для забезпечення оптимальних умов культивування різних видів грибів.

**Методи дослідження:** аналіз технічної літератури, моделювання мікрокліматичних процесів, використання методів автоматизації, експериментальне відпрацювання режимів, інтеграція апаратних і програмних засобів у єдину систему керування.

**Практична цінність:** впровадження проєкту дозволяє значно підвищити ефективність промислового грибівництва, забезпечити стабільні врожаї, мінімізувати вплив людського фактора та економити ресурси завдяки автоматизованому керуванню. Проєкт відкриває можливість культивування вимогливих лісових грибів у штучних умовах, що розширює ринок продукції та підвищує конкурентоспроможність виробництва.

**Елемент наукової новизни:** запропоновано комплексну концепцію багатозонального автоматизованого середовища для вирощування грибів, що

вперше поєднує традиційні біологічні методи з високоточними технологіями автоматизації та адаптивного керування мікрокліматом, включно з експериментальною моделлю вирощування лисичок.

## РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Вибір об'єкту автоматизації.

У сучасному світі автоматизація вирощування живих організмів у контрольованих умовах набуває все більшого значення, оскільки вона дозволяє досягати високих показників продуктивності, стабільності та якості кінцевого продукту. Вибір об'єкта дослідження для дипломної роботи є ключовим етапом, оскільки він визначає не тільки технологічну спрямованість проекту, а й його практичну значущість. У цьому контексті обґрунтування вибору грибництва як промислового об'єкта для автоматизації є особливо важливим, адже воно демонструє універсальність принципів тепличного господарства та можливість застосування сучасних автоматизаційних технологій у нетрадиційних для теплиць системах вирощування.

Термін «теплиця» традиційно асоціюється з вирощуванням рослин, овочів або зелені у контрольованому середовищі, де підтримується оптимальна температура, вологість, освітлення та вентиляція. Проте якщо уважно розглянути суть тепличного господарства, стає зрозумілим, що ключовим критерієм є закриті приміщення з контрольованим мікрокліматом, незалежно від типу живого організму, що вирощується. Саме на основі цього критерію грибництво можна сміливо віднести до категорії тепличних систем, оскільки промислові гриби, особливо такі види, як шампіньйони, вешенки або навіть лисички, потребують регульованого середовища для оптимального росту.

Вирощування грибів у промислових умовах включає контроль таких параметрів, як температура, відносна вологість, вентиляція, концентрація CO<sub>2</sub> та освітлення. Ці параметри у великій мірі подібні до тих, що регулюються у традиційних овочевих теплицях, що робить принципи автоматизації універсальними. Технологія промислового грибництва, хоча й має свої специфічні відмінності (наприклад, використання субстрату замість ґрунту, відсутність потреби у фотосинтезі для деяких видів), все ж залишається

системою життєзабезпечення живого організму у контрольованих умовах, що є визначальним для класифікації як теплиці.

Крім того, сучасні тенденції у розвитку агропромислового виробництва свідчать про необхідність універсализації технологій закритого вирощування, що дозволяє адаптувати існуючі інженерні рішення до різних видів організмів. У цьому сенсі використання терміну «промислова теплиця для грибів» є не лише коректним, а й виправданим з методологічної та практичної точки зору. Воно підкреслює, що методологія контролю мікроклімату та автоматизації процесів росту застосовується не обмежено лише до рослин, а може бути успішно адаптована до грибів [3].

Обґрунтування вибору грибництва як об'єкта автоматизації також підтримується економічними та практичними аргументами. Промислове вирощування грибів у закритих приміщеннях дозволяє отримати високу продуктивність на одиницю площі, скоротити ризики втрат урожаю через погодні умови, патогени або шкідників, а також забезпечити стабільну якість продукції протягом усього року. Саме ці фактори роблять автоматизовану теплицю для грибів привабливим об'єктом дослідження, адже вони дозволяють поєднати інженерну складність системи управління з безпосередньою економічною ефективністю проекту.

З точки зору інженерної системи, промислова грибна теплиця включає аналогічні компоненти, що й традиційна овочева теплиця: сенсорні системи для моніторингу температури та вологості, автоматизовані системи вентиляції та зрошення, контроль концентрації газів, а також можливість інтеграції додаткових рішень, таких як розсіяне освітлення для стимуляції росту. Таким чином, з технічної точки зору вибір грибництва дозволяє розширити сферу застосування існуючих технологій автоматизації, водночас залишаючись в рамках теми дипломної роботи.

Ще один аргумент на користь такого вибору полягає в науково-дослідницькому потенціалі. Гриби, на відміну від багатьох рослин, мають високу чутливість до умов середовища, що дозволяє експериментально оцінювати

ефективність автоматизованих систем у широкому діапазоні режимів. Це відкриває можливість дослідження оптимальних алгоритмів контролю мікроклімату, підвищення продуктивності та якості продукту, а також розробки нових рішень, таких як автоматичне регулювання розсіяного освітлення для різних фаз росту.

Враховуючи всі наведені аргументи, вибір грибництва як об'єкта промислової теплиці для автоматизації є повністю виправданим і науково обґрунтованим. Це рішення дозволяє поєднати універсальні принципи тепличного господарства з особливостями специфічного біологічного об'єкта, забезпечити практичну цінність дослідження та створити основу для впровадження інноваційних систем контролю мікроклімату, які можна буде адаптувати і до інших видів живих організмів [10].

Вибір грибництва як об'єкта для промислової теплиці обумовлюється не лише технічними та економічними критеріями, а й біологічною специфікою самих грибів, що визначає необхідність створення високотехнологічного середовища для контролю їхнього розвитку. Гриби, на відміну від рослин, не здійснюють фотосинтез і живляться за рахунок органічного субстрату, який слугує їм джерелом поживних речовин. Саме ця особливість робить їх вирощування у закритих системах більш передбачуваним і водночас вимогливим до умов середовища, оскільки будь-які коливання температури, вологості або газового складу повітря можуть істотно вплинути на ріст та якість плодів.

З інженерної точки зору, промислова теплиця для грибів є складною багаторівневою системою, що поєднує у собі фізичні, біологічні та програмні компоненти управління. До фізичних компонентів належать сенсори температури, вологості, датчики концентрації  $\text{CO}_2$  та  $\text{O}_2$ , датчики освітленості, системи зрошення та вентиляції, а також модулі подачі живильного субстрату. Біологічна складова – це сам субстрат та міцелій гриба, який росте на ньому, формуючи грибницю. Програмна складова – це алгоритми автоматизації, які забезпечують підтримку оптимальних параметрів середовища в реальному часі,

прогнозування циклів росту, а також адаптацію умов під різні фази розвитку грибів.

Саме інтеграція цих трьох складових дозволяє розглядати промислову грибну теплицю як повноцінну технологічну систему, що функціонує за принципами сучасного «розумного господарства». Порівняння з традиційними овочевими теплицями підтверджує, що хоча механізми живлення організмів різні, принципи контролю мікроклімату та автоматизації залишаються аналогічними, а методи оптимізації – навіть більш критичними для грибів, адже вони надзвичайно чутливі до будь-яких відхилень.

Одним із ключових аспектів є контроль вологості. Гриби потребують високої відносної вологості повітря – зазвичай у межах 85–95% – для формування плодів та підтримки здорової міцеліальної структури. Надлишок вологи або її недостатність може спричинити як розвиток патогенів, так і передчасне висихання грибів. Тому впровадження інтелектуальних систем зрошення та автоматичного зволоження повітря, що регулюються сенсорами, є обов'язковим. При цьому датчики повинні бути розташовані у різних точках приміщення, оскільки мікроклімат у великих виробничих цехах не є однорідним, і локальні перепади вологості можуть негативно вплинути на врожай.

Температурний режим також має критичне значення. Для різних видів грибів оптимальні температури росту різняться, але загальною тенденцією є необхідність підтримки стабільної температури у межах 15–25 °C протягом усього циклу розвитку. Інженерні системи теплиці повинні включати як системи опалення та охолодження, так і механізми вентиляції, що забезпечують рівномірний розподіл повітря. При цьому інтеграція температурних сенсорів з автоматизованим керуванням дозволяє підтримувати стабільність умов навіть при коливаннях зовнішньої погоди, що особливо важливо для комерційного вирощування грибів у зимовий період.

Не менш важливою складовою є контроль концентрації газів. В процесі росту гриби активно поглинають кисень і виділяють CO<sub>2</sub>, що при високій концентрації може гальмувати розвиток плодів. Тому сучасна промислова

грибна теплиця обладнується системами активного обміну повітря і сенсорами CO<sub>2</sub>, інтегрованими з автоматичною вентиляцією. Це дозволяє підтримувати оптимальний газовий склад та уникати стресових умов для грибів, що безпосередньо впливає на їхню якість і кількість урожаю [17].

Ще одним перспективним напрямком є автоматизація освітлення. Для багатьох видів грибів світло не є джерелом енергії, як у рослин, проте воно стимулює процеси формування плодів. Особливо це актуально для видів, таких як лисички, де освітлення впливає на розміри та форму плодового тіла. Використання розсіяного LED-освітлення з регульованим спектром та інтенсивністю, керованого автоматично на основі сенсорних показників, дозволяє оптимізувати умови росту і підвищити якість продукції. Це нововведення є прикладом того, як інженерні рішення для овочевих теплиць можуть бути адаптовані та вдосконалені для грибноцтва, підкреслюючи інноваційний характер дослідження.

Таким чином, вибір грибноцтва як об'єкта промислової теплиці є не лише методологічно обґрунтованим, а й відкриває широкі можливості для впровадження інженерних новацій та автоматизаційних рішень, які дозволяють підвищити ефективність виробництва, стабільність умов і якість кінцевого продукту. Цей підхід демонструє, що концепція теплиці як закритого контрольованого середовища універсальна і може застосовуватися не лише до рослин, а й до різних живих організмів, що потребують оптимального мікроклімату для розвитку.

Ще одним фундаментальним аргументом на користь вибору грибноцтва як об'єкта промислової теплиці є особливості субстрату та життєвого циклу грибів, що визначають необхідність точного та гнучкого контролю умов середовища. На відміну від рослин, які ростуть у ґрунті та отримують поживні речовини через кореневу систему із зовнішнього середовища, гриби живляться за рахунок поживного субстрату, який включає органічні компоненти, такі як солома, тирса, зернові відходи або компост. Цей субстрат не тільки забезпечує живильні речовини для росту міцелію та формування плодів, але й створює середовище, у

якому температурні та вологості параметри набувають критичного значення, адже навіть невелике відхилення може призвести до розвитку патогенів або уповільнення росту.

Інженерна інтеграція субстрату в промислову теплицю вимагає особливої уваги до систем його підготовки, стерилізації та подачі. В умовах великого виробництва субстрат попередньо готують у спеціальних камерах, де контролюється його вологість, температура та рівень мікробіологічної чистоти. Потім субстрат транспортують у виробничі приміщення, де він розміщується у контейнерах або на полицях, а міцелій інокулюють вручну або автоматично. Всі ці процеси потребують координації з автоматизованою системою управління мікрокліматом, оскільки зміна вологості, температури або вентиляції безпосередньо впливає на рівномірність росту грибів по всьому субстрату [29].

Ще одна особливість, що робить грибництво придатним для класифікації як теплиці, – це циклічність розвитку грибів, яка тісно пов'язана з умовами середовища. Цикл росту складається з фаз активного розвитку міцелію та фаз формування плодів. Кожна фаза потребує своєчасної адаптації параметрів: у фазі росту міцелію потрібна висока вологість і помірна температура, а у фазі плодоношення – стабільна температура, оптимальна вентиляція та, у деяких випадках, спеціалізоване освітлення. Система автоматизації повинна відслідковувати перехід між фазами та коригувати параметри, забезпечуючи максимальну ефективність процесу.

Важливим аспектом є розподіл умов у просторі. У великих промислових приміщеннях параметри мікроклімату можуть значно відрізнятись від одного кута приміщення до іншого, особливо якщо приміщення обладнане багаторівневими стелажми для субстрату. Тому автоматизація включає не лише центральне управління, а й локальні зональні сенсори та виконавчі механізми, що дозволяють підтримувати оптимальні умови у кожній зоні окремо. Таке рішення підкреслює інженерну складність і високий рівень технологічності грибною теплиці, доводячи її спорідненість із класичною концепцією теплиці.

Ще одним аргументом на користь такого вибору є можливість інтеграції інноваційних рішень, які зазвичай не застосовуються у традиційних овочевих теплицях. До них належать:

Розсіяне LED-освітлення для стимуляції плодоношення специфічних видів грибів, таких як лисички або вешенки. В автоматизованих системах інтенсивність та спектр світла можна коригувати залежно від фаз росту, що забезпечує максимальну якість і продуктивність.

Системи автоматичного зволоження субстрату з точним контролем вологості. Вони інтегруються з датчиками, що вимірюють водний баланс субстрату, і дозволяють уникати пересушування або надмірного зволоження.

Системи обміну повітря і регулювання CO<sub>2</sub>, що підтримують оптимальну газову середу, підвищуючи ефективність росту та здоров'я грибів [15].

Програмні алгоритми прогнозування росту, які на основі даних сенсорів і попередніх циклів дозволяють передбачати фазу плодоношення і автоматично адаптувати параметри теплиці.

Все це показує, що промислова грибна теплиця – це високотехнологічний комплекс, що поєднує біологію, інженерію та програмування, а вибір грибництва як об'єкта дослідження дозволяє розкрити тему дипломної роботи максимально широко і глибоко.

Окрім цього, грибництво як об'єкт має високу практичну значущість, що також підтримує його вибір. Сучасний ринок грибів потребує стабільних та передбачуваних поставок продукції, а ручне вирощування не здатне забезпечити необхідний обсяг і якість. Автоматизація дозволяє не лише збільшити врожайність, а й знизити трудові витрати, підвищити безпеку виробництва та зменшити вплив людського фактора, що особливо важливо для комерційних підприємств.

Таким чином, обґрунтування вибору грибництва як об'єкта промислової теплиці ґрунтується на комплексі факторів: біологічних (специфіка росту грибів), інженерних (складність та універсальність систем контролю мікроклімату), економічних (ефективність та стабільність виробництва) та науково-

дослідницьких (можливість впровадження інновацій та експериментальної оптимізації параметрів). Всі ці аспекти роблять грибництво не лише прийнятним, а й ідеально відповідним об'єктом

## **1.2 Параметри гибної теплиці.**

Температура є одним із ключових параметрів у будь-якій системі закритого вирощування живих організмів, і промислове грибництво не є винятком. Гриби надзвичайно чутливі до коливань температури, і навіть невелике відхилення від оптимального режиму може призвести до затримки росту, деформації плодів або розвитку патогенів. У промислових умовах температура контролюється на всіх етапах – від підготовки субстрату до дозрівання грибів – оскільки різні фази розвитку мають специфічні температурні потреби. Під час росту міцелію зазвичай потрібна температура нижча, ніж під час плодоношення, а фаза формування плодів потребує більш стабільного та точного регулювання, адже надмірне нагрівання може висушити субстрат і сповільнити розвиток грибів, тоді як занадто низька температура гальмує метаболічні процеси та уповільнює синтез необхідних речовин для росту плодового тіла.

Інженерно підтримка температурного режиму у промисловій грибній теплиці здійснюється через інтегровані системи опалення, охолодження та вентиляції, які взаємодіють між собою і керуються центральною автоматизованою системою. Датчики температури розташовуються у різних точках приміщення, на різних рівнях стелажів, щоб відстежувати локальні коливання, які можуть виникати через неоднорідне прогрівання або охолодження повітря. Ця інформація обробляється контролером, що визначає необхідні дії: підключення опалювальних елементів, регулювання потоку холодного повітря або активація циркуляційних вентиляторів. Система автоматично підтримує температурний баланс у всіх зонах, що є критично важливим для рівномірного росту грибів, оскільки локальні перегріву чи

охолодження можуть призвести до нерівномірного розвитку плодових тіл і погіршення загальної врожайності.

Технічні аспекти контролю температури також включають вибір матеріалів конструкції теплиці. Для промислових грибних теплиць використовують теплоізоляційні панелі, які мінімізують втрати тепла і дозволяють економно підтримувати потрібний температурний режим навіть у зимовий період. Крім того, застосовуються сенсори та системи з точністю до градуса або навіть десяткових часток градуса, що дозволяє проводити тонке регулювання мікроклімату. У більш розвинених системах використовуються програмні алгоритми прогнозування, які враховують зовнішню температуру, теплові втрати будівлі та фазу розвитку грибів, щоб автоматично адаптувати режим опалення або охолодження без втручання людини [7].

Важливим є також вплив температури на фізіологічні процеси гриба. Оптимальна температура підтримує активний метаболізм міцелію, забезпечує ефективне використання поживних речовин із субстрату, стимулює утворення ферментів, які необхідні для деградації органічних компонентів субстрату, а також сприяє формуванню структур плодового тіла. Будь-які відхилення впливають на швидкість росту, розмір та форму плодів, що, у промислових масштабах, безпосередньо позначається на економічних показниках. Наприклад, надмірне нагрівання у верхніх шарах стелажів може призвести до того, що верхні гриби будуть дрібнішими і деформованими, а нижні залишаться в нормі, що створює нерівномірний урожай і потребує додаткової сортувальної роботи.

Контроль температури у промисловій грибній теплиці також пов'язаний із енергетичною ефективністю системи. Надмірне використання опалення чи охолодження призводить до зайвих витрат енергії, а недостатній контроль створює ризик втрати врожаю. Тому автоматизація дозволяє підтримувати баланс між ефективністю і стабільністю, забезпечуючи економію ресурсів і підвищення якості продукту.

І нарешті, контроль температури у промисловій грибній теплиці є передумовою для інтеграції інших параметрів. Наприклад, вологість повітря і

субстрату безпосередньо залежить від температури, оскільки тепло впливає на випаровування води. Оптимальна температура дозволяє системам зволоження працювати ефективніше, забезпечуючи рівномірну вологість у всіх зонах приміщення. Те ж саме стосується вентиляції та газового складу повітря: правильний температурний режим забезпечує коректну циркуляцію повітря і оптимальні умови для поглинання кисню та виділення CO<sub>2</sub>.

Таким чином, температура виступає фундаментальним параметром у промисловому грибництві, від якого залежить не лише біологічний розвиток грибів, а й ефективність інженерних систем управління, економічна доцільність і стабільність виробничого процесу. Вибір температурного режиму і його автоматизований контроль – це ключове завдання будь-якої сучасної грибної теплиці, яке визначає успіх проекту і є основою для впровадження інших систем автоматизації, таких як контроль вологості, освітлення і газового складу.

Вологість є одним із найважливіших параметрів у системі контролю мікроклімату промислової грибної теплиці, оскільки від неї безпосередньо залежить ріст і розвиток грибів, формування плодового тіла та загальна продуктивність виробництва. Для грибів оптимальна відносна вологість повітря зазвичай коливається в межах від 85 до 95 %, що значно перевищує вимоги більшості рослин, вирощуваних у теплицях. Високий рівень вологості необхідний для підтримки здорового міцелію, запобігання пересиханню субстрату та створення сприятливого середовища для інтенсивного плодоношення. Будь-які відхилення від цього режиму, навіть короточасні, можуть призвести до зниження врожайності, розвитку хвороботворних мікроорганізмів або нерівномірного росту плодів.

Інженерне забезпечення вологості в промисловій грибній теплиці здійснюється через комплекс систем зволоження, регульованих автоматично. До таких систем відносяться розпилювачі, форсунки високого тиску, парові генератори та спеціальні зволожувачі повітря, що підключені до датчиків вологості. Сенсори встановлюються у різних точках приміщення та на різних рівнях стелажів для контролю локальних змін вологості, оскільки великі

виробничі цехи часто мають неоднорідний мікроклімат. Зібрані дані надходять у центральний контролер, який обробляє інформацію і визначає, які виконавчі механізми активувати. Таким чином, система забезпечує динамічну підтримку оптимальної вологості, адаптуючись до змін температури, швидкості вентиляції та фаз росту грибів [49].

Особливістю грибного вирощування є взаємозв'язок вологості повітря та субстрату. Підвищена вологість повітря зменшує швидкість випаровування води із субстрату, що сприяє стабільному живленню міцелію. Водночас надмірна вологість без належної вентиляції може призвести до конденсації на стелажах і стінах приміщення, що створює сприятливі умови для розвитку плісняви та бактерій. Інженери, проектуючи промислові грибні теплиці, обов'язково враховують ці фактори, поєднуючи зволоження з системами вентиляції, щоб уникати надлишкової конденсації та забезпечувати однорідне зволоження субстрату на всій площі теплиці.

Крім того, вологості приділяється особлива увага у фазі плодоношення. У цей період гриби активно формують плодове тіло, і його розвиток безпосередньо залежить від підтримки стабільного водного балансу. Вологість повітря впливає на розмір, щільність та форму плодів. При недостатньому рівні вологості вони можуть деформуватися, покривна шкірка стає сухою, а маса плодів зменшується. Надлишок вологості, навпаки, підвищує ризик зараження грибів хворобами, викликає появу плям та погіршує товарний вигляд. Саме тому автоматизація вологості стає критичною умовою стабільного виробництва, адже ручне регулювання у великих промислових приміщеннях практично неможливе і не забезпечує достатньої точності.

В інженерному сенсі автоматизація вологості тісно пов'язана з контролем температури та вентиляції, оскільки ці параметри взаємодіють. Наприклад, при підвищенні температури випаровування з субстрату зростає, і система автоматичного зволоження повинна компенсувати втрати вологи. Аналогічно, збільшення швидкості вентиляції прискорює випаровування, і контролер регулює зволоження, щоб підтримувати стабільну відносну вологість у всіх

зонах приміщення. Такі комплексні рішення дозволяють створити умовно автономну теплицю, де параметри підтримуються на оптимальному рівні без постійного втручання людини.

Ще один аспект – енергетична ефективність та економія ресурсів. Автоматизоване регулювання вологості дозволяє зменшити споживання води, уникати надмірного зволоження і зайвого нагріву або охолодження приміщення. Використання датчиків з високою точністю та адаптивних алгоритмів управління забезпечує баланс між стабільністю мікроклімату та економічними витратами, що особливо важливо для промислових підприємств.

Не менш важливою є можливість інтеграції вологості з іншими інженерними нововведеннями. Наприклад, у поєднанні з системою розсіяного освітлення можна регулювати інтенсивність світла залежно від вологості та температури, створюючи оптимальні умови для росту специфічних видів грибів, таких як лисички або вешенки. Такі комплексні рішення не тільки підвищують врожайність, а й дозволяють проводити експерименти, вивчати взаємозв'язок між різними параметрами середовища і формувати алгоритми для прогнозування циклів росту [40].

Таким чином, вологість є критично важливим параметром у промисловому грибництві, що визначає успішність виробництва, якість продукту та ефективність інженерної системи теплиці. Її точний контроль забезпечує оптимальні умови для росту міцелію, формування плодового тіла та зменшення ризиків розвитку патогенів, одночасно дозволяючи економно витратити ресурси та інтегрувати новітні технології автоматизації. Вибір і підтримка правильного рівня вологості стають основою для стабільного, високопродуктивного та науково-інноваційного вирощування грибів у промислових теплицях.

Вентиляція та контроль газового складу повітря є невід'ємними компонентами промислової грибною теплиці, адже вони безпосередньо впливають на обмін речовин міцелію, формування плодового тіла та загальну продуктивність виробництва. На відміну від рослин, гриби не здійснюють фотосинтезу, проте вони активно дихають, поглинаючи кисень і виділяючи

вуглекислий газ. Підвищена концентрація  $\text{CO}_2$  може сповільнювати ріст грибів, деформувати плодові тіла та навіть пригнічувати розвиток міцелію, що робить контроль газового складу повітря критично важливим для стабільного виробництва.

Інженерно система вентиляції у промисловій грибній теплиці проектується таким чином, щоб забезпечити рівномірний обмін повітря у всіх зонах приміщення, враховуючи розміщення стелажів, висоту приміщення, площу та обсяг повітря. У великих виробничих цехах без правильно спроектованої вентиляції виникають локальні зони з підвищеною концентрацією  $\text{CO}_2$ , що призводить до нерівномірного росту грибів і зниження врожайності. Для вирішення цієї проблеми застосовуються як природна вентиляція з регульованими клапанами, так і механічна вентиляція з вентиляторами і каналними системами, інтегрованими з автоматизованими датчиками, які вимірюють концентрацію газів і швидкість повітряного потоку.

Сучасні сенсори  $\text{CO}_2$  та  $\text{O}_2$  забезпечують високу точність вимірювання і здатні передавати дані в центральний контролер у реальному часі. Контролер аналізує ці дані та визначає необхідні дії для підтримки оптимального газового складу. При високому рівні  $\text{CO}_2$  автоматично активується приплив свіжого повітря або підключається система витяжки, при низькій концентрації кисню може бути збільшено циркуляційний потік повітря, щоб забезпечити його рівномірний розподіл. Такі автоматизовані системи дозволяють підтримувати стабільні умови для росту міцелію та плодів навіть у великих промислових приміщеннях, де ручне регулювання було б складним і малоефективним.

Крім підтримки оптимального газового складу, вентиляція виконує ще одну критично важливу функцію – регулювання температури та вологості повітря. При циркуляції повітря забезпечується рівномірний розподіл тепла і вологи, що створює однорідний мікроклімат по всьому приміщенню. Інженери проектують систему таким чином, щоб уникати зон застою повітря, де можуть утворюватися локальні перепади температури або вологості, які негативно впливають на розвиток грибів. Вентиляційні канали та форсунки розміщуються

у різних точках теплиці, з урахуванням висоти стелажів і об'єму субстрату, що дозволяє забезпечити оптимальну циркуляцію повітря у всіх шарах росту [25].

Біологічно, правильний газовий склад впливає на метаболізм міцелію, на активність ферментів, необхідних для перетворення субстрату у поживні речовини, а також на формування плодового тіла. Надлишок CO<sub>2</sub> пригнічує ріст і може призвести до утворення подовжених, вузьких або деформованих плодів, що значно знижує комерційну цінність продукції. Оптимальний рівень кисню забезпечує інтенсивний ріст і правильну морфологію плодів, а також запобігає розвитку патогенів, оскільки деякі шкідливі мікроорганізми більш активно розмножуються при високих концентраціях CO<sub>2</sub>.

Системи вентиляції також інтегруються з іншими елементами автоматизації, наприклад, з датчиками вологості та температури. Це дозволяє створити комплексну систему управління мікрокліматом, де кожен параметр впливає на інший, і контроль здійснюється не локально, а як частина цілісної автоматизованої системи. Наприклад, під час інтенсивного випаровування з субстрату вентиляція допомагає рівномірно розподілити вологе повітря, запобігаючи конденсації, а при підвищенні температури система вентиляції регулює швидкість обміну повітря, щоб уникнути перегріву грибів.

Таким чином, вентиляція та контроль газового складу повітря у промисловій грибній теплиці є критично важливими параметрами, без яких неможливо забезпечити стабільний розвиток грибів, високу продуктивність і якість продукції. Їх інтеграція з температурою та вологістю дозволяє створити комплексну, ефективну та автоматизовану систему управління мікрокліматом, яка здатна підтримувати оптимальні умови для росту міцелію та плодового тіла у будь-яких виробничих масштабах. Вибір і точне регулювання цих параметрів є основою успішного промислового грибництва і одним із ключових факторів при проектуванні сучасних теплиць, що поєднують біологічну специфіку організму з інженерними та технологічними інноваціями.

Освітлення у промисловій грибній теплиці є одним із специфічних параметрів, що відрізняє грибництво від традиційного вирощування рослин,

адже гриби не здійснюють фотосинтезу. Проте світло відіграє критичну роль у стимуляції формування плодів і визначенні морфології плодових тіл. Дослідження показують, що певні спектри світла можуть прискорювати або сповільнювати формування плодового тіла, впливати на його розмір, форму і щільність. Для видів, таких як вешенка чи лисичка, освітлення визначає правильну орієнтацію та розгалуження плодів, їхню товарну привабливість та зручність для збору. Тому впровадження розумного освітлення у промислових грибних теплицях є невід'ємною частиною системи автоматизації.

Інженерно освітлення в теплиці організовується за допомогою розсіяних LED-модулів з регульованим спектром та інтенсивністю, які розташовуються на різних рівнях стелажів. Це дозволяє підтримувати однорідний рівень освітленості по всій площі виробничого приміщення, враховуючи висоту розташування субстрату та щільність стелажів. Розсіяне світло запобігає утворенню тіней та нерівномірному росту плодів, що особливо важливо у великих промислових приміщеннях. Сенсори освітленості контролюють інтенсивність світла в різних зонах теплиці, а центральна система автоматизації регулює живлення LED-модулів залежно від фаз росту грибів та встановлених алгоритмів виробництва.

Вплив освітлення на біологічні процеси грибів не обмежується формуванням плодів. Світло також стимулює певні метаболічні шляхи, впливає на розподіл міцелію у субстраті і навіть може зменшувати розвиток патогенів, оскільки деякі шкідливі мікроорганізми гірше ростуть при певному спектрі світла. У фазі активного росту міцелію освітлення може бути зменшене або навіть відсутнє, тоді як під час плодоношення його інтенсивність і спектр оптимізуються для стимуляції формування якісних плодів. Ця динамічна зміна підкреслює необхідність автоматизації, оскільки ручне регулювання в великих промислових приміщеннях практично неможливе і не гарантує стабільності умов.

Автоматизація освітлення у сучасних теплицях також дозволяє інтегрувати цей параметр з іншими аспектами мікроклімату, такими як температура,

вологість та вентиляція. Наприклад, при підвищенні температури або вологості світлові модулі можуть змінювати інтенсивність або спектр, щоб компенсувати стресові умови для грибів. Це створює комплексну систему управління, де всі параметри взаємопов'язані, що дозволяє досягати максимальної стабільності умов і забезпечує високий урожай та якість продукції [21].

Крім того, автоматизація освітлення дає можливість проводити експериментальні дослідження та впроваджувати нові технологічні рішення. Наприклад, змінюючи спектр і тривалість світлового впливу, можна визначати оптимальні умови для конкретного виду грибів або підвищувати товарну привабливість продукції. Це дозволяє промисловим підприємствам адаптувати технологію до ринку, підвищуючи конкурентоспроможність та ефективність виробництва.

Таким чином, освітлення у промисловій грибній теплиці є не лише технічним параметром, а й біологічним стимулятором розвитку, який інтегрується в загальну автоматизовану систему управління мікрокліматом. Його точне регулювання дозволяє забезпечити стабільний ріст міцелію, правильну форму та розмір плодів, запобігати деформації та розвитку патогенів, а також оптимізувати економічні та енергетичні витрати. Світло, яке контролюється автоматично та інтегрується з іншими параметрами мікроклімату, стає ключовим чинником успішного промислового грибництва, демонструючи синергію біології та інженерії у сучасних технологічних теплицях.

### **1.3 Субстрат та харчування грибів.**

Субстрат, зображений на Рисунку 1.1, у промисловому грибництві є основою життя грибів і одночасно критичним елементом, який визначає продуктивність та якість врожаю. На відміну від рослин, які отримують поживні речовини через кореневу систему з ґрунту, гриби живляться безпосередньо через міцелій, проникаючи у субстрат і виділяючи ферменти для розкладання

органічних сполук. Саме тому правильний вибір, підготовка та управління субстратом є ключовим завданням у будь-якій промисловій грибній теплиці.



Рис 1.1 Субстрат для вирощування грибів

Субстрат складається з органічних компонентів, таких як солома, тирса, відходи зернових, компостовані залишки або суміші цих матеріалів. Його склад визначає поживну цінність, доступність води та повітря для міцелію. Перед використанням субстрат піддається підготовці, яка включає подрібнення, змішування, зволоження та стерилізацію або пастеризацію для знищення патогенів і конкурентних мікроорганізмів. В умовах промислового виробництва ця підготовка здійснюється у спеціальних камерах або тунелях, де автоматизовані системи контролюють температуру, вологість і час обробки. Такий підхід забезпечує однорідність субстрату та високу безпеку виробництва, що критично важливо для комерційного грибництва.

Після підготовки субстрат розміщується на стелажах або у контейнерах, де відбувається інокуляція міцелієм. Інокуляція може здійснюватися вручну або автоматично, і точність цієї операції визначає рівномірність росту грибів у майбутньому. Важливо, щоб міцелій розподілявся рівномірно по всьому об'єму субстрату, оскільки локальні прогалини або надлишки міцелію можуть призвести до нерівномірного росту плодових тіл і зниження врожайності. У великих промислових приміщеннях автоматизація цього процесу дозволяє контролювати точну дозу міцелію на один контейнер або секцію, забезпечуючи стабільність виробництва.

Крім того, субстрат є не лише джерелом поживних речовин, а й ключовим елементом мікроклімату, оскільки він впливає на вологість та температуру у зоні

росту грибів. Поглинаючи та випаровуючи воду, субстрат взаємодіє з повітрям у приміщенні, а його температура залежить від теплообміну з навколишнім середовищем. Інженери враховують ці фактори при проектуванні систем зволоження, опалення та вентиляції, інтегруючи їх у єдину автоматизовану систему управління. Це дозволяє підтримувати стабільний водний та температурний баланс у всіх шарах росту, що безпосередньо впливає на ріст і розвиток грибів.

Харчування грибів через субстрат включає забезпечення міцелію необхідними макро- та мікроелементами, які містяться у його органічних компонентах. Ці елементи витрачаються міцелієм для синтезу білків, ферментів та структурних компонентів плодового тіла. Недостатня концентрація поживних речовин або їх нерівномірний розподіл у субстраті може призвести до уповільнення росту, деформації плодів та зниження врожайності. У промислових теплицях для контролю цього аспекту використовуються системи моніторингу вологості та щільності субстрату, а також програми прогнозування фаз росту, які дозволяють визначати оптимальний час зрошення та підживлення субстрату.

Особливо важливо відзначити взаємозв'язок субстрату з іншими параметрами мікроклімату. Оптимальна температура та вологість повітря забезпечують ефективне використання води у субстраті, підтримуючи баланс між випаровуванням і поглинанням. Вентиляція впливає на газообмін, який відбувається безпосередньо у субстраті, і забезпечує кисень для міцелію та видалення надлишку вуглекислого газу. Освітлення, у свою чергу, стимулює формування плодового тіла над субстратом, а його інтеграція з іншими параметрами дозволяє забезпечити оптимальні умови для всього циклу росту.

Таким чином, субстрат і харчування грибів є фундаментальним компонентом промислової грибної теплиці. Його правильний вибір, підготовка та інтеграція у систему автоматизованого контролю мікроклімату забезпечують рівномірний ріст міцелію, формування якісних плодів, зменшення ризику хвороб і максимальну ефективність виробництва. Субстрат виступає одночасно і

біологічною основою, і частиною інженерної системи теплиці, демонструючи синергію біології та технології у сучасному промисловому рибництві [33].

#### **1.4 Висновки до розділу 1.**

У результаті аналізу технологічних процесів грибною виробництва обґрунтовано доцільність вибору промислової грибною теплиці як об'єкта автоматизації. Даний об'єкт характеризується високою залежністю якості та стабільності врожаю від параметрів мікроклімату, значною тривалістю виробничого циклу та необхідністю безперервного контролю умов середовища. Ручне або напівавтоматичне керування такими процесами не забезпечує достатньої точності та повторюваності режимів, що призводить до втрат продукції та підвищення експлуатаційних витрат.

Застосування автоматизованої системи керування дозволяє забезпечити стабільне підтримання технологічних параметрів, зменшити вплив людського фактора, підвищити продуктивність виробництва та адаптувати процес вирощування до різних видів грибів. Обраний об'єкт автоматизації є доцільним з технічної, економічної та виробничої точок зору, а також має потенціал для масштабування та впровадження інноваційних рішень, зокрема експериментальних зон для вирощування вимогливих видів грибів.

Проведене дослідження параметрів грибною теплиці показало, що ефективність процесу вирощування грибів визначається комплексним впливом температури, вологості повітря, вологості субстрату, газового складу повітря, інтенсивності вентиляції та стабільності мікроклімату. Кожен з цих параметрів є взаємопов'язаним, а відхилення хоча б одного з них від оптимального діапазону негативно впливає на ріст і розвиток грибів.

Автоматизований контроль мікроклімату дозволяє не лише підтримувати задані значення параметрів, а й забезпечувати їх плавну зміну відповідно до фаз виробничого циклу. Запровадження багатозональної структури теплиці створює умови для одночасного вирощування різних видів грибів з індивідуальними режимами. Особливе значення має стабільність параметрів, що є критичною для

експериментальних секцій, зокрема для вирощування лисичок, де додатково використовується кероване розсіяне освітлення.

Аналіз субстрату та системи живлення грибів підтвердив, що якість і структура субстрату є одним з ключових факторів, які визначають інтенсивність росту, рівномірність розвитку та врожайність грибів. Субстрат виконує не лише функцію поживного середовища, а й впливає на теплові, вологісні та хімічні процеси, що відбуваються у зоні кореневої частини грибів.

Контроль вологості, температури та кислотності субстрату є необхідною умовою стабільного технологічного процесу. Автоматизований моніторинг цих параметрів дозволяє своєчасно виявляти відхилення, запобігати деградації поживного середовища та забезпечувати оптимальні умови для живлення грибів на всіх етапах розвитку. Раціональний підбір і контроль субстрату підвищує ефективність використання ресурсів, зменшує ризики втрати врожаю та створює передумови для впровадження експериментальних технологій у промислових умовах.

## РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Вибір бази вирощування для розуміння умов автоматизації.

Шампінйони – це один із найпоширеніших і комерційно важливих видів грибів, які вирощуються у промислових умовах. Вони належать до роду *Agaricus*, який включає велику кількість видів, кожен з яких має свої специфічні біологічні та технологічні особливості. Для промислового вирощування обирають ті види, які демонструють високу врожайність, стійкість до змін мікроклімату та хвороб, а також привабливу зовнішню форму плодового тіла. У нашому випадку мова йде про два основні типи: звичайні шампінйони (*Agaricus bisporus*), зображені на Рисунку 2.1, та королівські шампінйони, зображені на Рисунку 2.2, з коричневою шапочкою, які часто називають «креміні» або «коричневі шампінйони».



Рис 2.1 Білі шампінйони



Рис 2.2 Королівські шампіньйони

Звичайні шампіньйони – це класичний вид, який найчастіше зустрічається на ринку і відомий споживачам завдяки своєму білому кольору шапочки та ніжному смаку. Вони мають порівняно компактне плодове тіло, відносно високу стійкість до транспортування та зберігання, а також високу врожайність при промисловому вирощуванні. У промислових теплицях ці шампіньйони добре адаптуються до автоматизованого контролю температури, вологості, вентиляції та освітлення, що дозволяє підтримувати стабільний ріст і отримувати врожай кілька разів на рік.

Королівські шампіньйони з коричневою шапочкою відрізняються більш насиченим кольором, щільною структурою плодового тіла і інтенсивнішим смаком, що робить їх популярними на ринку делікатесних продуктів. Біологічно вони мають трохи більш тривалий цикл розвитку порівняно з білими шампіньйонами, потребують трохи вищої уваги до вологості і точного контролю мікроклімату під час формування плодів. Промислове вирощування коричневих шампіньйонів часто поєднує технології, розроблені для звичайних шампіньйонів, з додатковими алгоритмами автоматизації, які дозволяють контролювати швидкість росту шапочки та рівень  $\text{CO}_2$  для формування щільного, товарного плодового тіла.

Особливістю обох видів є те, що вони реагують на мікроклімат та інженерні параметри по-різному. Наприклад, зміни температури або вологості,

які ще прийнятні для білих шампінйонів, можуть сповільнювати ріст коричневих, або навпаки, створювати нерівномірність плодів. Це означає, що система автоматизації промислової теплиці повинна бути налаштована таким чином, щоб забезпечувати оптимальні умови для обох видів одночасно, або передбачати зонування приміщення з різними параметрами, якщо вирощування відбувається паралельно [37].

Біологічно шампінйони розвиваються через міцелій, який активно проникає у субстрат, засвоює органічні компоненти і підготовлює ґрунт для формування плодового тіла. Звичайні шампінйони і коричневі різновиди мають схожу структуру міцелію, однак різниця у морфології плодового тіла, щільності шапочки та кольорі вимагає точного контролю параметрів мікроклімату, особливо під час фаз плодоношення. Інженерні рішення у промислових теплицях, такі як регульоване освітлення, розсіяне зволоження та зонована вентиляція, дозволяють досягти однорідного росту і високої товарної якості для обох видів.

Таким чином, вибір шампінйонів для промислового вирощування у теплиці є логічним і обґрунтованим, оскільки вони добре адаптуються до контрольованого середовища, демонструють високу врожайність, мають комерційно привабливу форму і смакові якості. Врахування різновидів – звичайних і королівських з коричневою шапкою – дозволяє створити універсальну технологічну платформу, здатну забезпечити стабільне виробництво та відповідати сучасним ринковим вимогам. Промислове вирощування цих шампінйонів у теплицях демонструє синергію біологічних потреб гриба та інженерних рішень, що робить технологію ефективною, передбачуваною та економічно доцільною.

Гливи, або вешенки, належать до роду *Pleurotus* і є одними з найбільш популярних видів грибів для промислового вирощування завдяки високій врожайності, невибагливості та стійкості до змін мікроклімату. Існує велика кількість видів глив, кожен з яких має специфічні біологічні особливості, смакові якості та потреби у вирощуванні. У промисловому контексті найчастіше

вирощують вешенку звичайну (*Pleurotus ostreatus*) і деякі її різновиди, які характеризуються різним кольором шапочки – від світло-сірого до насичено-коричневого.

Біологія глив відрізняється від шампіньйонів кількома ключовими аспектами. По-перше, міцелій глив здатний розвиватися на більш широкому спектрі субстратів, включаючи солому, тирсу, залишки зернових культур та комбіновані суміші. Це дає змогу промисловим підприємствам використовувати відходи сільськогосподарського виробництва для економного вирощування грибів, що знижує собівартість і робить технологію екологічно привабливою. По-друге, гливи характеризуються швидким ростом і високою інтенсивністю плодоношення, що дозволяє отримувати декілька урожаїв з одного субстратного блоку за короткий період.

У промислових теплицях вирощування глив вимагає контролю температури, вологості, вентиляції та освітлення, як і у випадку шампіньйонів, але з деякими відмінностями. Оптимальна температура для росту міцелію глив зазвичай нижча, ніж для шампіньйонів, і коливається в межах 20–25 °С, тоді як температура плодоношення може бути трохи нижчою – 15–20 °С, залежно від виду. Вологість повітря підтримується на рівні 85–95 %, що сприяє інтенсивному росту плодового тіла і запобігає пересиханню субстрату. Вентиляція особливо важлива для глив, оскільки вони активно виділяють вуглекислий газ у процесі росту, а надлишок CO<sub>2</sub> може призводити до видовження ніжки та деформації шапочки [44].

Освітлення глив відіграє меншу роль порівняно з шампіньйонами, однак воно впливає на орієнтацію плодів і стимулює утворення правильних форм шапочки. У промислових теплицях застосовують розсіяне світло з помірною інтенсивністю, яке забезпечує рівномірний ріст плодів, особливо у високих стелажних системах. Автоматизація освітлення дозволяє підтримувати постійний фотоперіод, що позитивно впливає на якість продукції та одночасно економить електроенергію.

Субстрат для глив підготовляється аналогічно до шампінйонів, але з урахуванням специфіки виду. Його ферментація та пастеризація забезпечують оптимальну поживну цінність і відсутність конкурентних мікроорганізмів. Гливи швидко проникають міцелієм у субстрат, засвоюючи поживні речовини, що визначає високу інтенсивність росту плодів і скорочує час виробничого циклу. Автоматизоване управління температурою, вологістю та вентиляцією дозволяє забезпечити однорідний розвиток плодів на всьому об'ємі субстрату, що є ключовим для промислового виробництва.

Важливо зазначити, що гливи, на відміну від шампінйонів, менш вибагливі до точності мікроклімату, але більш чутливі до якості субстрату і концентрації CO<sub>2</sub>. Це означає, що промислова теплиця для вирощування глив потребує точного контролю газового складу повітря, автоматизованого управління зволоженням та температурою, а також постійного моніторингу стану субстрату. Такий комплексний підхід дозволяє забезпечити стабільну врожайність, однорідність плодів та високу якість продукції для ринку.

Таким чином, вирощування глив у промисловій теплиці є ефективним, економічно доцільним і технологічно гнучким процесом. Застосування автоматизованих систем контролю мікроклімату, освітлення та підготовки субстрату дозволяє досягти високої врожайності та стабільної якості, адаптуючи виробництво до різних видів глив та ринкових потреб. Промислове вирощування глив демонструє поєднання біологічної специфіки виду та інженерних рішень, що забезпечує ефективність і передбачуваність технологічного процесу.

Порівняння шампінйонів і глив у промисловому грибництві дозволяє зрозуміти специфіку їхніх біологічних потреб і вимоги до систем автоматизації теплиць. Хоча обидва види вирощуються на субстраті і потребують контролю мікроклімату, існують суттєві відмінності у їхніх фізіологічних характеристиках, оптимальних умовах росту та підходах до автоматизації [23].

Шампінйони характеризуються більш вибагливим і специфічним мікрокліматом. Їхній міцелій потребує точного контролю температури, вологості і газового складу, особливо під час фаз плодоношення, оскільки будь-яке

відхилення може призвести до деформації шапочки, нерівномірного росту або зниження врожайності. Білий звичайний шампінйон менш чутливий до незначних коливань, тоді як коричневі шампінйони (королівські) потребують більш стабільних параметрів, особливо вологості та концентрації CO<sub>2</sub>, щоб формувати щільне і товарно привабливе плодове тіло. У промисловій теплиці для шампінйонів необхідна високоточна система автоматизації, яка забезпечує динамічне регулювання температури, вологості, вентиляції, газового складу та освітлення на всіх рівнях стелажів, що дозволяє підтримувати однорідність умов у великому приміщенні.

Гливи, навпаки, демонструють більшу пластичність до змін мікроклімату. Їхній міцелій здатний активно рости на різноманітних субстратах, а плодове тіло швидко формується навіть за відносно широкого діапазону температур і вологості. Оптимальна температура для росту міцелію глив зазвичай нижча, ніж для шампінйонів, а фазу плодоношення можна підтримувати при менш точному регулюванні температури і вологості. При цьому гливи більш чутливі до якості субстрату та концентрації CO<sub>2</sub>, оскільки надлишок газу може викликати видовження ніжки та нерівномірну форму плодів. Вирощування глив у промислових теплицях вимагає автоматизованого контролю, але з меншою точністю параметрів у порівнянні з шампінйонами, що робить їх більш «терплячими» до незначних відхилень у мікрокліматі.

Щодо освітлення, шампінйони реагують на світло сильніше, оскільки воно стимулює формування шапочки, визначає її орієнтацію та розгалуження плодового тіла. Для глив світло менш критичне, але все ж впливає на правильну форму плодів і їхній ріст у вертикальному просторі стелажів. Автоматизація освітлення в обох випадках дозволяє підтримувати оптимальний фотоперіод, інтегруючи цей параметр з вологою, температурою і вентиляцією для досягнення високої якості продукції.

Що стосується субстрату, шампінйони більш вимогливі до його підготовки, складу і стерильності, оскільки будь-які патогени або нерівномірність поживних речовин безпосередньо впливають на формування

плодів і врожайність. Гливи навпаки здатні рости на більш широкому спектрі матеріалів і менш чутливі до незначних відмінностей у складі субстрату, що робить їх вирощування економічно вигіднішим і технологічно простішим.

З технологічного погляду, вирощування шампінйонів вимагає точного зонування теплиці, контролю окремих параметрів у різних частинах приміщення, а також інтеграції складних алгоритмів автоматизації. Вирощування глив менш залежне від зонування і допускає більш гнучке використання ресурсів, однак потребує ретельного контролю субстрату і газового складу повітря. Це означає, що спільне вирощування шампінйонів і глив у промисловій теплиці потребує продуманого підходу, де певні зони налаштовуються під конкретний вид гриба, або використовуються адаптивні алгоритми, які одночасно підтримують оптимальні умови для обох видів.

Таким чином, порівняння шампінйонів і глив у контексті промислового вирощування демонструє їхні різні біологічні потреби та технологічні вимоги. Шампінйони більш вимогливі до точності параметрів мікроклімату, особливо коричневі різновиди, тоді як гливи більш пластичні, але чутливі до якості субстрату та CO<sub>2</sub>. Розуміння цих відмінностей дозволяє ефективно проектувати промислові теплиці, інтегрувати автоматизовані системи контролю і забезпечувати стабільну, високоякісну продукцію для ринку, демонструючи синергію біології та інженерії у сучасному грибництві.

Вибір шампінйонів і глив для вирощування у промисловій теплиці обґрунтований кількома взаємопов'язаними аспектами: біологічними особливостями грибів, технологічною адаптивністю, ринковою привабливістю та можливістю інтеграції у автоматизовану систему управління мікрокліматом. Перш за все, обидва види демонструють високу врожайність у контрольованих умовах. Шампінйони, особливо звичайні та королівські з коричневою шапочкою, здатні давати стабільний урожай при дотриманні точних параметрів температури, вологості та вентиляції. Вони відомі на ринку і мають попит серед споживачів, що робить їх комерційно вигідними для промислового виробництва. Коричневі шампінйони, завдяки більш насиченому кольору і щільній структурі

плодового тіла, відносяться до преміум-сегменту, що дозволяє підприємству диференціювати продукцію та підвищувати прибутковість [42].

Гливи, у свою чергу, характеризуються високою пластичністю та невибагливістю до субстрату і мікроклімату. Вони швидко формують плодове тіла і здатні давати декілька урожаїв з одного субстратного блоку за короткий період, що робить їх економічно ефективними для промислового вирощування. Використання глив дозволяє оптимізувати витрати на підготовку субстрату та управління мікрокліматом, знижуючи енергетичні та трудові витрати. Крім того, гливи добре реагують на автоматизовані системи вентиляції, зволоження та освітлення, що дозволяє інтегрувати їх у єдину тепличну систему з мінімальними ризиками для врожайності.

Ще одним важливим аспектом є сумісність видів з системами автоматизації мікроклімату. Шампінйони потребують високоточних налаштувань температури, вологості, концентрації CO<sub>2</sub> і освітлення, що дозволяє максимально використовувати можливості сучасних сенсорів та контролерів. Гливи менш вимогливі, але чутливі до складу субстрату і газового балансу, що робить їх контроль більш простим і надійним. Комбіноване вирощування цих видів дозволяє проектувати гнучку систему автоматизації, де одна теплиця здатна підтримувати оптимальні умови для обох груп грибів, з можливістю зонування або адаптивного регулювання параметрів у реальному часі.

Обґрунтування вибору також включає економічний і технологічний аспекти. Шампінйони та гливи мають великий попит на ринку свіжих і перероблених продуктів, що забезпечує стабільний комерційний результат. Вирощування цих видів у промислових теплицях дозволяє використовувати відходи сільського господарства як субстрат, що робить процес екологічно прийнятним і економічно ефективним. Інженерно, обидва види добре інтегруються у стелажні системи, автоматизовані системи зволоження, вентиляції та освітлення, що забезпечує високу продуктивність, якість продукції та стабільність технологічного процесу.

Таким чином, вибір шампінйонів і глив для промислового вирощування у теплиці є логічним і обґрунтованим з біологічної, технологічної та економічної точки зору. Вони поєднують високий рівень врожайності, адаптивність до автоматизованого мікроклімату, привабливі смакові та зовнішні характеристики і можливість оптимізації витрат на виробництво. Використання цих видів демонструє ефективну синергію біологічних потреб грибів та інженерних рішень сучасного промислового грибництва, забезпечуючи стабільну, передбачувану та економічно вигідну продукцію.

## **2.2 Умови автоматизації.**

Вибір промислової теплиці для вирощування грибів, зокрема шампінйонів і глив, обґрунтований низкою біологічних, технологічних та економічних факторів. Хоча гриби не здійснюють фотосинтез, на відміну від рослин, вони потребують контрольованого середовища для стабільного росту і формування високоякісних плодів. Промислова теплиця дозволяє створити такі умови, де температура, вологість, вентиляція, концентрація газів та освітлення регулюються автоматично, забезпечуючи оптимальні параметри для конкретного виду грибів [47].

Головною перевагою теплиці є можливість точного контролю температурного режиму, який критично впливає на ріст міцелію та плодоношення. Шампінйони, особливо королівські з коричневою шапочкою, вимагають стабільної температури під час росту і формування плодів, оскільки будь-яке відхилення може сповільнити розвиток або спровокувати деформацію плодів. Гливи більш пластичні до температурних коливань, але також мають оптимальні діапазони, у яких проявляється максимальна врожайність і правильна форма плодового тіла. Промислова теплиця з системою автоматизації дозволяє підтримувати необхідний температурний баланс для обох видів одночасно, інтегруючи нагрівання, охолодження та вентиляцію в єдиний технологічний цикл.

Другим критичним фактором є регулювання вологості, що впливає на водний баланс субстрату і повітря, а також на формування шапочки грибів. Шампінйони вимагають високої точності підтримки вологості, тоді як гливи допускають невеликі коливання. Промислова теплиця забезпечує рівномірне зволоження через системи розпилення або пароутворення, що дозволяє уникнути пересихання субстрату, нерівномірного росту та розвитку патогенів. Автоматизація цієї системи забезпечує стабільність процесу навіть у великих приміщеннях і при змінних зовнішніх умовах.

Важливим аспектом є контроль газового складу повітря, зокрема концентрації CO<sub>2</sub> та кисню, оскільки міцелій активно дихає і виділяє вуглекислий газ. Надлишок CO<sub>2</sub> може спричинити видовження ніжки і деформацію шапочки, особливо у шампінйонів. Промислова теплиця з вентиляційною системою та сенсорами газів дозволяє забезпечити оптимальний газообмін для обох видів грибів, інтегруючи контроль у загальну систему автоматизації.

Освітлення, хоч і не критично для фотосинтезу, відіграє роль у формуванні плодового тіла та орієнтації шапочки грибів. У промисловій теплиці воно організоване як розсіяне світло з регульованою інтенсивністю і спектром, що дозволяє контролювати ріст і форму плодів, зменшуючи деформацію і покращуючи товарний вигляд.

Нарешті, промислова теплиця забезпечує стабільність субстрату і умов вирощування протягом усього циклу. Вона дозволяє використовувати стелажні системи, інтегровані системи зволоження, вентиляції та освітлення, автоматично регулюючи параметри залежно від фази росту грибів. Це особливо важливо для комбінації шампінйонів і глив, оскільки кожен вид має свої оптимальні умови, а теплиця дозволяє підтримувати ці умови паралельно або через зонування.

Таким чином, вибір промислової теплиці обґрунтований необхідністю створення контрольованого, стабільного і інтегрованого середовища для вирощування грибів, де можна точно управляти температурою, вологою, освітленням, вентиляцією та субстратом. Це забезпечує високу продуктивність,

якість і передбачуваність виробництва, дозволяє інтегрувати автоматизовані системи управління і робить технологію ефективною з економічної та інженерної точки зору. Промислова теплиця виступає як універсальна платформа, здатна адаптуватися під різні види грибів і забезпечувати стабільне вирощування шампінйонів і глив у масштабі комерційного виробництва [50].

При промисловому вирощуванні шампінйонів і глив важливим аспектом є створення оптимального мікроклімату для кожного виду грибів. Хоча обидва види вирощуються на субстраті і потребують контрольованого середовища, їхні біологічні потреби відрізняються. З цієї причини є необхідність секціонувати теплицю, тобто розділити її на окремі зони, де параметри температури, вологості, вентиляції та освітлення можна підтримувати незалежно для кожного виду грибів.

Шампінйони, особливо коричневі різновиди, потребують більш стабільного і точного мікроклімату. Їхній міцелій і плодові тіла чутливі до коливань температури та вологості. Наприклад, надлишок  $\text{CO}_2$  може викликати видовження ніжки, нерівномірність шапочки або сповільнення росту, а нестабільна вологість може призвести до пересихання субстрату і зниження врожайності. У секціонованій теплиці для шампінйонів можна створити окрему зону з більш точним контролем температури, вологості та інтенсивності вентиляції, інтегруючи автоматизовані системи сенсорного моніторингу, що підтримують стабільність умов у реальному часі.

Гливи, навпаки, більш пластичні до коливань температури і вологості, але чутливі до якості субстрату і концентрації  $\text{CO}_2$ . Їхній ріст і формування плодів також залежать від рівномірного газообміну та доступу до розсіяного світла, особливо у стелажних системах. В окремій зоні для глив можна підтримувати трохи ширший температурний діапазон, інтенсивніше зволоження та контроль газового складу, що дозволяє максимально ефективно використовувати субстрат і скоротити час виробничого циклу.

Секціонування теплиці також дозволяє уникнути конкуренції між видами грибів за умови мікроклімату. Якщо вирощувати шампінйони та гливи у загальному

приміщенні без зонування, параметри, оптимальні для одного виду, можуть бути шкідливими для іншого. Наприклад, температура та концентрація CO<sub>2</sub>, оптимальні для шампінйонів, можуть сповільнити ріст глив або викликати деформацію їхніх плодів. Розділення теплиці на секції дозволяє створювати індивідуальний мікроклімат, де кожен вид отримує оптимальні умови для росту та плодоношення, що забезпечує високу врожайність і однорідність продукції.

З інженерного боку, секціонування теплиці передбачає встановлення перегородок, зонування систем опалення, зволоження, вентиляції та освітлення. Кожна секція обладнується сенсорами, автоматичними регуляторами та системами моніторингу, що дозволяють підтримувати потрібні параметри у режимі реального часу. Це інтегрується в загальну систему управління, яка керує всіма секціями теплиці, забезпечуючи адаптивність під різні види грибів і їхні фази росту.

Таким чином, секціонування промислової теплиці є критично важливим заходом при спільному вирощуванні шампінйонів і глив. Воно дозволяє забезпечити індивідуальні умови для кожного виду, оптимізувати технологічні процеси, підвищити врожайність і якість продукції, а також ефективно інтегрувати автоматизовані системи управління мікрокліматом. Секційна організація теплиці демонструє, як інженерні рішення і біологічні потреби грибів взаємодіють для досягнення максимальної ефективності промислового виробництва.

Система контролю температури є одним із ключових елементів промислової теплиці для вирощування шампінйонів і глив, оскільки обидва види грибів мають різні оптимальні температурні діапазони, а стабільність температури безпосередньо впливає на ріст міцелію, формування плодів та врожайність. Для того щоб забезпечити точний контроль температури, теплиця секціонується на окремі зони, де створюються індивідуальні параметри мікроклімату для кожного виду грибів [27].

Для секції шампінйонів необхідно використовувати датчики високої точності, оскільки цей вид грибів дуже чутливий до коливань температури. Оптимально застосовувати цифрові термодатчики типу DS18B20, зображений на

Рисунку 2.3, або РТ100, зображений на Рисунку 2.4, які відрізняються стабільністю показників, високою точністю вимірювання (до  $\pm 0,1$  °C у випадку РТ100) і здатністю працювати у вологому та тепличному середовищі. Ці датчики можна розташовувати на різних рівнях стелажів і у ключових точках секції, щоб відстежувати температуру повітря і субстрату, що критично для рівномірного росту плодів. DS18B20 добре підходить для систем автоматизації, оскільки має цифровий вихід і легко інтегрується у контролери типу Arduino або промислові ПЛК, що дозволяє отримувати точні дані і в реальному часі регулювати нагрівальні або охолоджувальні елементи. РТ100 використовується у випадках, коли потрібна висока точність і стабільність на довготривалій основі, наприклад, у великих промислових секціях, де невеликі коливання температури можуть спричинити нерівномірний ріст і деформацію плодів.



Рис 2.3 Термодатчик DS18B20



Рис 2.4 Термодатчик РТ100

Для секції глив можна застосовувати ті ж типи датчиків, але їх точність може бути трохи нижчою, оскільки гливи більш пластичні до коливань

температури. DS18B20 у цьому випадку є достатнім для підтримки оптимального температурного режиму, а розташування датчиків у ключових точках секції дозволяє відстежувати температуру верхніх і нижніх рівнів стелажів. Важливо, щоб датчики контролювали температуру субстрату, оскільки гливи активно ростуть у нижніх шарах стелажів, де температура може відрізнятись від температури повітря на верхніх рівнях. Дані від датчиків передаються у центральну систему управління, яка автоматично регулює нагрівання або охолодження, враховуючи зовнішні кліматичні умови і фазу росту грибів [13].

Вибір конкретного типу датчика залежить від потреб секції і бюджету, але основними критеріями залишаються висока точність, стабільність показників, можливість підключення до систем автоматизації та стійкість до підвищеної вологості і специфічного мікроклімату теплиці. Цифрові датчики DS18B20 добре підходять для більш гнучких, менш критичних ділянок, таких як секція глив, а PT100 або аналогічні високоточні термопари оптимальні для секції шампінйонів, де навіть незначні коливання температури можуть вплинути на однорідність росту плодів.

Таким чином, використання датчиків типу DS18B20 і PT100 дозволяє побудувати інтегровану систему контролю температури, яка забезпечує стабільний і прогнозований розвиток грибів у кожній секції. Дані від датчиків передаються у контролер, що управляє нагрівальними і охолоджувальними елементами, вентиляцією та іншими пристроями мікроклімату, забезпечуючи індивідуальні умови для шампінйонів і глив. Така система є фундаментом для ефективного промислового вирощування грибів, дозволяє підтримувати високу однорідність продукції та інтегрується у повну автоматизовану систему управління теплицею.

Система регулювання температури у секційованій промисловій теплиці для вирощування шампінйонів і глив працює як комплексний механізм, що поєднує датчики температури, контролери, нагрівальні та охолоджувальні елементи, а також вентиляційні пристрої. Датчики DS18B20 та PT100

встановлюються у ключових точках кожної секції, включно з верхнім і нижнім рівнями стелажів, для забезпечення повного контролю температури повітря і субстрату. Ці датчики постійно відстежують фактичні показники і передають цифрові або аналогові сигнали на центральний контролер, який обробляє дані у реальному часі. Контролер порівнює отримані значення з заданими оптимальними параметрами для кожного виду грибів і визначає, які дії необхідні для корекції мікроклімату.

Для секції шампінйонів, де точність температурного режиму критично важлива, контролер може активувати нагрівальні елементи, такі як електричні або водяні нагрівачі, у разі падіння температури нижче заданого діапазону, або включати охолоджувальні системи, наприклад, вентилятори з охолодженням або холодні повітряні завіси, якщо температура перевищує оптимальну. Датчики PT100 забезпечують точність регулювання до десятих градуса, що дозволяє підтримувати стабільну температуру навіть при зовнішніх коливаннях, запобігаючи стресу для грибів і нерівномірному росту плодів.

У секції глив, враховуючи їхню більшу термопластичність, система регулювання може працювати у ширшому діапазоні і з менш критичною точністю. Дані від датчиків DS18B20 дозволяють контролеру коригувати роботу обігріву або охолодження, підтримуючи середню температуру повітря і субстрату у межах оптимальних значень для цього виду грибів. Навіть при невеликих коливаннях температури система здатна оперативно відновлювати потрібний режим, забезпечуючи рівномірний ріст плодів і запобігаючи утворенню деформованих чи дрібних плодів [6].

Система регулювання інтегрована з вентиляційною мережею теплиці, що дозволяє змішувати або замінювати повітря у кожній секції для підтримки необхідного газового складу, водночас підтримуючи температуру у заданому діапазоні. Контролер може керувати швидкістю вентиляторів, направляючи потік холодного або теплого повітря у конкретні зони, щоб уникнути нерівномірного прогріву чи переохолодження. Автоматизована система також

забезпечує плавне регулювання, уникаючи різких змін температури, які могли б вплинути на якість грибів.

Таким чином, інтеграція датчиків DS18B20 і PT100 у систему регулювання температури дозволяє створити інтелектуальну тепличну секцію, де контролер у реальному часі реагує на найменші відхилення від заданих параметрів, підтримує стабільну температуру для кожного виду грибів і коригує роботу нагрівальних та охолоджувальних елементів без втручання людини. Це забезпечує передбачуваний ріст міцелію, однорідність плодів і максимальну врожайність, демонструючи високий рівень інженерної інтеграції між біологічними потребами грибів і автоматизованою системою управління мікрокліматом.

Система підтримки вологості у промисловій теплиці для вирощування шампінйонів і глив є одним із ключових факторів забезпечення стабільного росту грибів і формування високоякісного врожаю. Вологість повітря та субстрату безпосередньо впливає на водний баланс міцелію, розвиток плодового тіла і товарний вигляд грибів, тому контроль вологості потребує високої точності, особливо у промислових масштабах, де на великій площі навіть незначні коливання параметрів можуть призвести до нерівномірності росту і зниження врожайності.

Для секції шампінйонів застосовуються цифрові гігрометри високої точності, такі як DHT22, зображений на Рисунку 2.5, або SHT35, які здатні вимірювати відносну вологість з точністю до 2–3 %. Ці датчики мають цифровий вихід і легко інтегруються у систему автоматизації, дозволяючи отримувати дані в реальному часі та аналізувати їх для корекції мікроклімату. Встановлюються вони на різних рівнях стелажів і у ключових точках секції, включно з зонами, де росте субстрат, оскільки саме там вологість найбільше впливає на розвиток міцелію і формування шапочки шампінйонів. У великих секціях може використовуватися кілька десятків таких датчиків, щоб забезпечити максимально точне відстеження параметрів по всій площі.



Рис 2.5 Цифровий гігрометр DHT22

Для секції глив, яка більш стійка до коливань вологості, можна використовувати ті ж цифрові датчики або менш точні моделі, такі як АМ2320 або DHT11, які забезпечують достатню точність для контролю вологості на рівні  $\pm 5\%$ . Вони також розташовуються на різних рівнях стелажів, включаючи верхні і нижні ряди, щоб забезпечити рівномірний мікроклімат. Датчики передають сигнали на центральний контролер, який обробляє дані і формує команду для системи зволоження [12].

Корекція вологості здійснюється за допомогою ультразвукових генераторів пари або промислових пароутворювачів на основі нагрівальних елементів, що дозволяють підтримувати заданий рівень вологості без різких стрибків. У секції шампінйонів підтримується відносна вологість повітря на рівні 85–95 %, що є оптимальним для росту міцелію і формування щільної шапочки без тріщин. Ультразвукові генератори подають дрібнодисперсну пару, яка швидко змішується з повітрям і рівномірно поширюється по всій секції. Важливо, що вони здатні працювати у високій вологості і не спричиняють перегріву приміщення, що є критично важливим для шампінйонів.

Секція глив вимагає трохи менш суворого контролю вологості – оптимально підтримувати 80–90 %. Тут застосовуються ті ж ультразвукові генератори або пароутворювачі меншої потужності, оскільки гливи більш пластичні до коливань вологи. Однак навіть у цій секції важливо забезпечити

рівномірний розподіл пари, особливо на нижніх рівнях стелажів, де повітря може пересихати швидше через рух повітря [1].

Автоматизація системи підтримки вологості інтегрується із системою контролю температури, оскільки температура впливає на відносну вологість повітря. Контролер аналізує показники датчиків вологості та температури одночасно і регулює роботу генераторів пари, вентиляторів і нагрівальних елементів так, щоб підтримувати оптимальний мікроклімат у кожній секції. Наприклад, якщо датчики виявляють падіння вологості у зоні шампінйонів, контролер активує ультразвукові генератори, одночасно коригуючи роботу вентиляції, щоб волога рівномірно розподілилася по всій секції і не створювала локальні «сухі» зони.

Для великих промислових секцій застосовуються системи центрального подавання пари з трубопроводами і розпилювачами, які дозволяють подати вологу до різних точок секції одночасно. Такі системи забезпечують стабільну роботу навіть при великих об'ємах приміщень, де використання одного генератора недостатньо. Контролер керує подачею пари за зонами, адаптуючи її до реальних показників датчиків і змін зовнішнього клімату.

Таким чином, використання датчиків типу DHT22, SHT35, AM2320 та DHT11 у поєднанні з ультразвуковими генераторами пари і промисловими пароутворювачами створює інтелектуальну систему підтримки вологості, яка забезпечує стабільний водний баланс, рівномірне формування плодів та максимальну врожайність. Система інтегрована з контролем температури і вентиляцією, що дозволяє оптимально регулювати мікроклімат у кожній секції, підтримуючи індивідуальні умови для шампінйонів і глив, і забезпечує передбачуваний і високоякісний урожай у промислових масштабах.

Система вентиляції та газообміну у промисловій секційованій теплиці для вирощування шампінйонів і глив є невід'ємною частиною мікроклімату і критично важливою для підтримки оптимальних умов росту грибів. Вона забезпечує контроль концентрації вуглекислого газу, регулює рух повітря, сприяє підтримці стабільної температури та вологості, і водночас запобігає

виникненню локальних зон застою повітря, де може розвиватися цвіль або патогени. Для секціонованої теплиці, де однією з зон вирощуються шампінйони, а іншою гливи, система вентиляції повинна мати індивідуальне регулювання для кожної секції, оскільки потреби у газообміні і обміні повітря для цих видів грибів різняться.

Для контролю концентрації CO<sub>2</sub> у кожній секції встановлюються цифрові датчики CO<sub>2</sub> типу MH-Z19 або Senseair S8, зображений на Рисунок 2.6, які дозволяють точно вимірювати вміст вуглекислого газу в діапазоні від 0 до 5000 ppm з точністю  $\pm 50$  ppm. Для шампінйонів критично важливо підтримувати концентрацію CO<sub>2</sub> у межах 800–1000 ppm під час плодоношення, оскільки перевищення цього рівня призводить до видовження ніжки, деформації шапочки і зниження товарного вигляду плодів. Для глив допустимий рівень CO<sub>2</sub> трохи вищий – до 1200 ppm – без негативного впливу на врожайність, але надлишок газу може сповільнити ріст. Датчики CO<sub>2</sub> інтегруються у центральний контролер, який аналізує їхні показники та формує команди для вентиляційних пристроїв.



Рис 2.6 Датчики CO<sub>2</sub> Senseair S8

Рух повітря у теплиці забезпечується промисловими осьовими або відцентровими вентиляторами, такими як VENTS або Soler&Palau, зображений на Рисунок 2.7, які здатні подавати або видаляти повітря з регульованою швидкістю в залежності від потреб секції. Для секції шампінйонів контрольована вентиляція дозволяє забезпечити необхідний обмін повітря, щоб видаляти надлишок CO<sub>2</sub>, не пересушуючи при цьому повітря і субстрат. У секції

глив вентиляційні пристрої працюють у менш критичному режимі, але їхня роль важлива для підтримки однорідного газового складу та рівномірного руху повітря по всій секції, особливо на нижніх рядах стелажів, де концентрація CO<sub>2</sub> може бути більшою через активний ріст міцелію.



Рис 2.7 Вентилятор Soler&Palau

Контролер, інтегрований із датчиками CO<sub>2</sub> і температури, забезпечує динамічну регуляцію вентиляції, одночасно підтримуючи задані параметри вологості і температури. Наприклад, якщо датчики CO<sub>2</sub> виявляють перевищення концентрації у зоні шампінйонів, контролер активує вентилятори з подачею свіжого повітря, при цьому паралельно коригуючи роботу ультразвукових генераторів пари, щоб уникнути пересихання повітря. У секції глив аналогічний процес відбувається у більш м'якому режимі, оскільки ці гриби менш чутливі до коливань концентрації газів [19].

Для великих промислових теплиць застосовуються каналні системи вентиляції з регульованими заслінками і повітропроводами, які дозволяють подавати або відводити повітря до окремих секцій, а також створювати необхідний мікроклімат у верхніх і нижніх рівнях стелажів. Вентиляційні системи можуть бути оснащені інверторними приводами, що дозволяє плавно змінювати швидкість повітря, запобігаючи різким стрибкам температури та вологості, і забезпечує рівномірний газообмін по всій секції.

Таким чином, інтеграція датчиків CO<sub>2</sub> типу MH-Z19 і Senseair S8 з промисловими вентиляторами, заслінками і центральним контролером створює

ефективну систему вентиляції та газообміну, яка забезпечує підтримку оптимального рівня CO<sub>2</sub>, рівномірний рух повітря, контроль вологості та температури. Це дозволяє підтримувати індивідуальні умови для секції шампінйонів і глив, забезпечуючи стабільний ріст міцелію, однорідне формування плодів і високий урожай у промисловому масштабі. Секційована вентиляція разом із автоматизованим контролем температури та вологості створює повністю інтегрований мікроклімат, де всі параметри працюють узгоджено, а людина втручається лише для моніторингу та планового обслуговування обладнання.

Секція вирощування шампінйонів у промисловій теплиці потребує максимально точного контролю мікроклімату, оскільки цей вид грибів дуже чутливий до коливань температури, вологості та концентрації вуглекислого газу. Інтегрована система автоматизації забезпечує координацію всіх параметрів, дозволяючи створювати стабільний мікроклімат у реальному часі без постійного ручного втручання. В основі системи лежить центральний програмований логічний контролер (ПЛК), наприклад Siemens S7-1200 або WAGO 750-881, який приймає сигнали з усіх датчиків і формує команди для регулюючих пристроїв. Контролер запрограмований на підтримку оптимальних умов росту шампінйонів, а також на забезпечення безпечної роботи обладнання і сигналізацію у разі виходу параметрів за допустимі межі.

Датчики температури, такі як PT100, встановлюються на різних рівнях стелажів і безпосередньо в субстраті, щоб відстежувати температуру повітря та середовища росту. Вони забезпечують точність вимірювань до десятих градуса, що критично для формування щільних і рівномірних плодів шампінйонів. Датчики вологості типу SHT35 або DHT22 контролюють відносну вологість повітря і сигналізують контролеру про необхідність корекції через ультразвукові генератори пари або промислові пароутворювачі. Для контролю газового складу повітря використовуються датчики MH-Z19 або Senseair S8, що дозволяють підтримувати концентрацію CO<sub>2</sub> на рівні 800–1000 ppm, оптимальному для плодоношення шампінйонів.

Всі датчики підключені до ПЛК, який аналізує отримані дані за спеціально розробленими алгоритмами. Якщо датчики виявляють відхилення температури від заданого діапазону, контролер автоматично активує нагрівальні елементи, такі як електричні або водяні нагрівачі, або охолоджувальні пристрої – вентилятори з подачею холодного повітря або холодні повітряні завіси. При падінні вологості контролер активує ультразвукові генератори пари, рівномірно розподіляючи вологу по всій секції і при цьому коригуючи роботу вентиляції, щоб уникнути локальних пересихань субстрату або повітря. Якщо концентрація CO<sub>2</sub> підвищується вище допустимого рівня, контролер збільшує швидкість вентиляції через промислові осьові або каналні вентилятори VENTS, Soler&Palau, при цьому оптимально регулюючи швидкість подачі і видалення повітря завдяки інверторним приводам, що забезпечує плавний газообмін без різких коливань температури і вологості [26].

Система автоматизації також забезпечує логічну взаємодію між усіма підсистемами: зміна температури враховується при подачі пари для зволоження, концентрація CO<sub>2</sub> впливає на роботу вентиляторів, а автоматичні заслінки і повітропроводи перенаправляють потоки повітря для підтримки рівномірного газообміну по всій секції. Для великих приміщень використовується роздільна система зонального контролю, де кожна група стелажів має власні датчики та окремі виконавчі пристрої, але всі вони координуються через центральний ПЛК.

Інтерфейс управління системою автоматизації дозволяє оператору візуально контролювати температуру, вологість і концентрацію CO<sub>2</sub> у кожному сегменті секції шампінйонів, встановлювати графіки зміни параметрів у різні фази росту грибів і отримувати попередження у разі несправностей обладнання або виходу показників за допустимі межі. Завдяки такій інтеграції забезпечується передбачуваний розвиток міцелію, однорідне формування плодів, висока врожайність і зниження ризику втрат продукції через нестабільність мікроклімату.

Таким чином, секція шампінйонів у промисловій теплиці стає автономною у підтримці оптимальних умов росту завдяки комплексній

інтеграції ПЛК Siemens S7-1200 або WAGO 750-881, зображений на Рисунку 2.8, датчиків PT100, SHT35, DHT22, MH-Z19/Senseair S8, ультразвукових генераторів пари, промислових пароутворювачів і вентиляторів VENTS/Soler&Palau з інверторними приводами. Це дозволяє забезпечити високий рівень однорідності врожаю, контрольовану якість продукції і ефективне управління мікрокліматом на всіх стадіях росту шампінйонів.

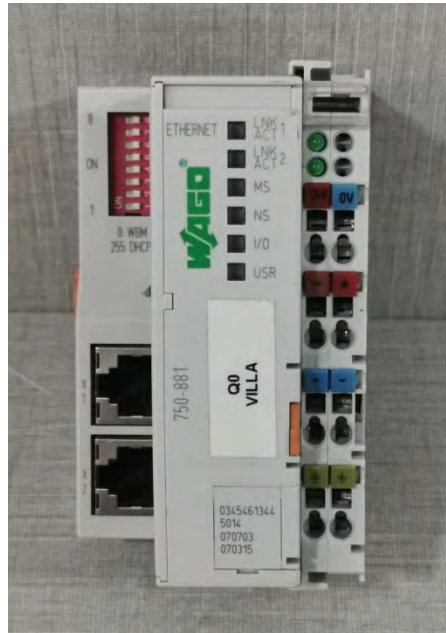


Рис 2.8 Контролер WAGO 750-881

Секція вирощування глив у промисловій теплиці має особливості мікроклімату, які відрізняються від потреб шампінйонів, оскільки цей вид грибів більш стійкий до коливань температури та вологості, але водночас потребує контрольованого газообміну для оптимального росту міцелію і формування плодового тіла. Інтегрована система автоматизації у секції глив забезпечує координацію всіх параметрів мікроклімату, дозволяючи підтримувати індивідуальні умови росту на кожному рівні стелажів і у різних зонах секції. Центральним елементом системи є програмований логічний контролер (ПЛК), наприклад WAGO 750-881 або Siemens S7-1200, який приймає сигнали від усіх датчиків і формує команди для виконавчих пристроїв. Контролер запрограмований з урахуванням біологічної пластичності глив, що

дозволяє дещо ширший допустимий діапазон параметрів без негативного впливу на врожайність [36].

Для контролю температури у секції глив використовуються датчики DS18B20 або PT100, які встановлюються на різних рівнях стелажів і у субстраті. DS18B20 забезпечує цифрову передачу даних з точністю  $\pm 0,5$  °C, що достатньо для глив, а PT100 може застосовуватися для контролю більш критичних зон, наприклад, у нижніх рядах стелажів, де температура субстрату безпосередньо впливає на розвиток міцелію. Датчики вологості типу DHT22 або AM2320 відстежують рівень відносної вологості повітря і передають дані до контролера. Для підтримки оптимальної вологості у секції глив застосовуються ультразвукові генератори пари або пароутворювачі середньої потужності, які підтримують рівень вологості у межах 80–90 %, що забезпечує нормальний ріст і формування плодів без пересихання субстрату.

Контроль газового складу повітря здійснюється за допомогою датчиків MH-Z19 або Senseair S8, що дозволяють підтримувати концентрацію CO<sub>2</sub> до 1200 ppm. Контролер автоматично регулює вентиляційні пристрої, такі як промислові осьові або каналні вентилятори VENTS або Soler&Palau, для видалення надлишку CO<sub>2</sub> і забезпечення рівномірного газообміну. Оскільки гливи менш чутливі до концентрації вуглекислого газу, вентиляція у секції працює більш м'яко, без різких змін швидкості подачі повітря, але при цьому забезпечує стабільний рух повітря по всій секції, включаючи нижні ряди стелажів.

ПЛК координує роботу температурних датчиків, гігрометрів і датчиків CO<sub>2</sub>, формуючи команди для нагрівальних, охолоджувальних і зволожувальних систем. Наприклад, якщо датчики виявляють зниження вологості у нижніх рядах стелажів, контролер активує ультразвукові генератори пари, одночасно підтримуючи температуру повітря на стабільному рівні і регулюючи вентиляцію, щоб уникнути локальних зон сухості. Якщо температура субстрату падає нижче оптимального значення, контролер активує водяні або електричні нагрівачі, а при перевищенні температури – охолоджувачі або подачу свіжого повітря через вентилятори.

Система інтегрована із заслінками і повітропроводами, що дозволяє зонально регулювати подачу повітря і пари до різних ділянок секції, забезпечуючи рівномірний мікроклімат на всіх рівнях стелажів. Використання інверторних приводів на вентиляторах дозволяє плавно змінювати швидкість повітряного потоку, запобігаючи різким коливанням температури і вологості, що особливо важливо для нижніх рядів стелажів, де концентрація CO<sub>2</sub> та температура можуть відрізнятись від верхніх рівнів [32].

Інтерфейс управління системою автоматизації дозволяє оператору моніторити температуру, вологість і концентрацію CO<sub>2</sub> у режимі реального часу, встановлювати графіки зміни параметрів для різних фаз росту глив і отримувати попередження про відхилення параметрів або несправності обладнання. Завдяки інтеграції ПЛК WAGO 750-881 або Siemens S7-1200, датчиків DS18B20, PT100, DHT22, AM2320, MH-Z19/Senseair S8, ультразвукових генераторів пари і вентиляційних систем VENTS/Soler&Palau створюється автономна секція глив з стабільним мікрокліматом, яка забезпечує рівномірний ріст міцелію, формування повноцінних плодів і високий урожай у промисловому масштабі.

### **2.3 Контроль якості субстрату.**

Субстрат для шампінйонів містить комплекс поживних речовин, що впливають на ріст міцелію і розвиток плодів. До позитивних компонентів, які стимулюють ріст, належать азот, фосфор, калій, кальцій і магній. Азот у доступній формі, зокрема у вигляді амонійних або нітратних сполук, забезпечує інтенсивне розростання міцелію і формування щільної шапочки грибів. Фосфор важливий для синтезу нуклеїнових кислот та енергетичного обміну клітин міцелію, а калій впливає на водний баланс і тургор клітин, сприяючи правильній структурі плодового тіла. Кальцій стабілізує клітинні мембрани і сприяє однорідності плодів, а магній бере участь у фотосинтезі та активації ферментних систем субстрату, що опосередковано впливає на ріст грибів.

До негативних речовин, які можуть пригнічувати ріст шампінйонів, відносяться важкі метали (мідь, свинець, кадмій, ртуть), надлишок амонійних

солей, фенольні сполуки та органічні кислоти у високих концентраціях. Надлишок амонійних сполук може викликати закислення субстрату, що пригнічує міцелій і підвищує ризик розвитку конкурентних мікроорганізмів. Важкі метали токсичні навіть у невеликих кількостях, а феноли та органічні кислоти можуть сповільнювати ферментативні процеси і уповільнювати ріст грибів.

Контроль концентрації цих речовин здійснюється за допомогою лабораторного аналізу субстрату перед засівом міцелію. Для визначення вмісту азоту, фосфору і калію застосовуються класичні методи хемілюмінесцентного та спектрофотометричного аналізу, наприклад із використанням спектрофотометра Thermo Scientific Genesys 150, зображений на Рисунок 2.9, або Hach DR6000, які дозволяють швидко і точно визначати концентрації мінеральних речовин у субстраті. Для контролю кальцію і магнію застосовують атомно-абсорбційний спектрометр (AAS), наприклад Shimadzu AA-7000, що забезпечує точність вимірювань до часток ppm.



Рис 2.9 Спектрофотомета Thermo Scientific Genesys 150

Для визначення вмісту важких металів і потенційно токсичних елементів у субстраті використовуються ICP-OES (індуктивно-зв'язана плазмова емісійна спектроскопія) або ICP-MS (мас-спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою). Ці методи дозволяють одночасно визначити кілька елементів із високою точністю і чутливістю, що особливо важливо у промислових масштабах

для забезпечення безпечного і продуктивного середовища для росту шампінйонів [46].

Для контролю органічних сполук і фенольних кислот застосовують високоефективну рідинну хроматографію (HPLC), яка дозволяє визначати концентрації сполук, що можуть пригнічувати ріст міцелію. Показники органічних кислот, фенолів та азоту коригуються на етапі підготовки субстрату шляхом додавання вапна, компосту або регуляторів рН, що забезпечує оптимальні умови для розвитку грибів.

Таким чином, комплексний контроль субстрату для секції шампінйонів включає не тільки рН, температуру і вологість, але й хімічний склад у плані мінеральних та органічних компонентів, а також токсичних речовин. Використання спектрофотометрів Thermo Scientific Genesys 150 або Nach DR6000, атомно-абсорбційних спектрометрів Shimadzu AA-7000, ICP-OES/ICP-MS і HPLC дозволяє забезпечити точний контроль позитивних і негативних компонентів субстрату, що у поєднанні з автоматизованою системою мікроклімату гарантує високу врожайність шампінйонів і стабільну якість продукції.

Субстрат для вирощування глив відрізняється від субстрату для шампінйонів складом і вимогами, оскільки цей вид грибів більш пластичний до коливань умов, але водночас потребує специфічних поживних речовин для формування повноцінного плодового тіла та високої врожайності. Переважними компонентами субстрату для глив є солома пшениці, кукурудзи або овес, деревна тріска, відходи лісопереробної промисловості, пташиний послід та мінеральні добавки. Ці компоненти забезпечують необхідний баланс вуглеводів, білків і мінералів, які активують розростання міцелію і стимулюють швидке формування плодів.

До позитивних речовин, які сприяють росту глив, належать азот у помірних концентраціях, фосфор, калій, кальцій, магній і залізо. Азот забезпечує інтенсивний ріст міцелію, але для глив його концентрація може бути трохи вищою, ніж для шампінйонів, оскільки вони менш чутливі до надлишку.

Фосфор і калій активують ферментативні процеси і водний баланс у клітинах міцелію, кальцій стабілізує структуру плодів, магній активує ферменти і покращує ріст міцелію, а залізо важливе для синтезу ферментів, що відповідають за дихання клітин і накопичення енергії.

До негативних компонентів, які можуть пригнічувати ріст глив, належать надлишок важких металів (свинець, кадмій, мідь), фенольні сполуки, органічні кислоти та надлишок амонійних солей. Певні феноли та органічні кислоти у великих концентраціях сповільнюють ферментативні процеси, пригнічують ріст міцелію і можуть спричинити неповноцінне формування плодів. Надлишок амонійних солей може призвести до закислення субстрату і підвищення активності конкурентних мікроорганізмів, що негативно впливає на врожайність [41].

Контроль концентрації поживних та токсичних речовин у субстраті для глив здійснюється за допомогою лабораторних методів. Для визначення азоту, фосфору, калію та інших мінералів застосовуються спектрофотометричні методи на приладах Thermo Scientific Genesys 150 або Hach DR6000, що дозволяють швидко оцінити поживний потенціал субстрату. Для кальцію, магнію та заліза використовується атомно-абсорбційна спектроскопія (AAS), наприклад Shimadzu AA-7000, яка забезпечує точні вимірювання у ppm.

Для визначення важких металів та токсичних елементів у субстраті застосовують ICP-OES або ICP-MS, що дозволяє одночасно оцінити концентрацію декількох елементів і гарантувати безпеку середовища для росту грибів. Для контролю органічних кислот та фенольних сполук використовується високоефективна рідинна хроматографія (HPLC), яка дозволяє визначити їхню концентрацію до часток ppm і коригувати склад субстрату до внесення міцелію.

Після контролю і корекції складу субстрат проходить пастеризацію або стерилізацію для знищення конкурентних мікроорганізмів. Температура субстрату у процесі пастеризації контролюється за допомогою термопар типу K або цифрових термометрів OMEGA HH506, зображений на Рисунку 2.10, що забезпечує рівномірне прогрівання і готовність субстрату до засіву міцелію.

Після внесення міцелію датчики вологості і температури, інтегровані у систему автоматизації теплиці, контролюють умови росту глив, підтримуючи оптимальний рівень вологості 80–90 % і температуру 24–26 °С.



Рис 2.10 Цифровий термометр OMEGA HH506

Таким чином, контроль субстрату для глив охоплює хімічний аналіз на позитивні (азот, фосфор, калій, кальцій, магній, залізо) та негативні (важкі метали, фенольні сполуки, надлишок амонійних солей, органічні кислоти) компоненти, а також контроль вологості, рН і температури пастеризації. Використання спектрофотометрів Thermo Scientific Genesys 150 або Nach DR6000, атомно-абсорбційних спектрометрів Shimadzu AA-7000, ICP-OES/ICP-MS, HPLC і цифрових термометрів OMEGA HH506 забезпечує високу точність вимірювань і створює стабільне і безпечне середовище для росту міцелію глив у промислових масштабах [11].

Субстрат для вирощування шампінйонів і глив має спільні риси, але водночас існують суттєві відмінності, які визначають потреби кожного виду грибів і підхід до контролю його якості. Для шампінйонів субстрат має більш збалансований склад з точки зору азоту, фосфору, калію та мінералів, оскільки ці гриби чутливі до коливань поживних речовин. Королівські шампінйони із коричневою шапочкою потребують трохи підвищеного вмісту азоту для розвитку шапочки насиченого кольору, а фосфор і калій впливають на інтенсивність росту міцелію та щільність плодового тіла. Гливи більш пластичні

до коливань складу субстрату, але потребують більшу кількість органічних компонентів, таких як деревна тріска, кукурудзяна або пшенична солома, що забезпечує інтенсивний ріст міцелію і швидке формування плодів.

Що стосується негативних компонентів, для обох видів грибів критично важливий контроль важких металів, фенольних сполук та надлишку амонійних солей. Для шампінйонів навіть невелика концентрація важких металів може пригнічувати розвиток міцелію і викликати деформацію плодів, тоді як гливи більш терпимі до деяких відхилень, хоча надлишок токсичних речовин все одно знижує врожайність. Надлишок амонійних сполук або органічних кислот у субстраті для обох видів може призвести до закислення середовища і розвитку конкурентних мікроорганізмів, але шампінйони більш чутливі до таких змін, ніж гливи.

Контроль позитивних і негативних компонентів здійснюється схожими методами для обох видів грибів, але з різною точністю і частотою перевірки. Для визначення азоту, фосфору, калію та інших мінералів застосовуються спектрофотометричні методи (Thermo Scientific Genesys 150 або Nach DR6000), які дозволяють оцінити поживний потенціал субстрату і коригувати його склад до внесення міцелію. Для кальцію, магнію, заліза та інших мінералів використовується атомно-абсорбційна спектроскопія (Shimadzu AA-7000). Для визначення важких металів застосовуються ICP-OES та ICP-MS, що дозволяють одночасно оцінити декілька елементів у межах ppm, а для органічних кислот і фенольних сполук – HPLC.

Крім хімічного складу, контроль рН, вологості і температури пастеризації субстрату також має відмінності. Для шампінйонів рН має бути у межах 7,0–7,5, тоді як гливи можуть нормально розвиватися у субстраті з рН 6,5–7,5. Оптимальна вологість для шампінйонів складає 65–70 %, а для глив – 80–90 %, що визначає налаштування систем зволоження та вентиляції у секціях. Температура пастеризації субстрату для обох видів зазвичай досягає 60–70 °С, але для глив допускається невелика більша інтерпретація, оскільки вони менш чутливі до коливань температури при термічній обробці.

Таким чином, порівняльний аналіз субстратів для шампінйонів і глив показує, що обидва види потребують контролю основних параметрів: азоту, фосфору, калію, кальцію, магнію, заліза, важких металів, фенольних сполук, органічних кислот, рН, вологості і температури. Різниця полягає у чутливості грибів до коливань і оптимальних межах, що впливає на вибір методів контролю та точність вимірювань. Використання спектрофотометрів, атомно-абсорбційних спектрометрів, ICP-OES/ICP-MS, HPLC та цифрових термометрів забезпечує комплексний контроль субстрату для обох видів, дозволяючи створювати безпечне і продуктивне середовище для промислового вирощування шампінйонів і глив у секційованих теплицях.

#### **2.4 Висновки до розділу 2.**

У результаті опрацювання розділів, присвячених вибору бази вирощування грибів, формуванню умов автоматизації та контролю якості субстрату, встановлено, що ефективність промислового грибівництва безпосередньо залежить від комплексного підходу до організації технологічного середовища. Вибір бази вирощування у вигляді промислової теплиці дозволяє забезпечити ізольований, керований простір, у якому можливо стабільно підтримувати задані мікрокліматичні параметри незалежно від зовнішніх умов. Така база створює технічні передумови для впровадження систем автоматизованого керування та масштабування виробничих процесів.

Аналіз умов автоматизації показав, що застосування програмованих логічних контролерів, систем моніторингу та виконавчих механізмів є необхідним для забезпечення точності, безперервності та надійності керування мікрокліматом теплиці. Автоматизація дозволяє синхронізувати роботу підсистем вентиляції, зволоження, температурного регулювання та освітлення, знижуючи вплив людського фактора та забезпечуючи стабільність технологічних режимів на всіх етапах вирощування. Запровадження зворотного зв'язку від датчиків забезпечує оперативне коригування параметрів та підвищує загальну керованість виробничого процесу.

Контроль якості субстрату розглянуто як один із ключових елементів забезпечення стабільного росту та високої продуктивності грибів. Субстрат виконує не лише функцію поживного середовища, але й визначає теплові, вологісні та хімічні умови у зоні розвитку грибів. Автоматизований контроль вологості, температури та кислотності субстрату дозволяє підтримувати його оптимальні характеристики, запобігати деградації поживного середовища та мінімізувати ризики втрати врожаю. Поєднання контролю якості субстрату з автоматизованими системами керування мікрокліматом забезпечує цілісність технологічного процесу та підвищує ефективність використання ресурсів.

Таким чином, сукупний аналіз вибору бази вирощування, умов автоматизації та контролю якості субстрату підтверджує доцільність використання комплексної автоматизованої системи у промисловій грибній теплиці. Реалізація запропонованих рішень створює умови для стабільного та керованого виробництва грибів, підвищує надійність технологічного процесу та формує основу для впровадження інноваційних і експериментальних методів культивування у промислових масштабах.

## РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Біологічні передумови вирощування лисичок.

Створення експериментальної секції промислової теплиці для вирощування лисичок відкриває можливість формування унікального технологічного простору, в якому природні біологічні закономірності розвитку гриба поєднуються з інженерними принципами керування мікрокліматом та автоматизованими алгоритмами оптимізації росту. Лисички, на відміну від традиційних тепличних грибів, таких як шампіньйони та гливи, мають складну біологічну організацію і чітку залежність від динамічних параметрів середовища. Саме це робить експериментальну секцію необхідною, оскільки вирощування лисичок у стандартних тепличних умовах не дає стабільних результатів, а їх параметри росту потребують окремого дослідження, моделювання та точного керування.

Основою формування секції є розуміння того, що лисички є грибами, чутливими до найменших коливань середовища. Температурний режим, вологість, структура субстрату, концентрація вуглекислого газу, ступінь освітленості, тривалість фотоперіоду, повітрообмін, швидкість переміщення повітря, присутність летких органічних сполук, мікробна чистота — усі ці параметри визначають не тільки швидкість росту, а й морфологію плодового тіла. Експериментальна секція повинна бути побудована як повністю ізольоване середовище, у якому кожен параметр керується програмованою логікою ПЛК з можливістю предиктивної адаптації через аналіз даних, що надходять від сенсорної системи. Тобто секція працює не просто як теплиця з автоматикою, а як лабораторний комплекс, у якому біологічні процеси відповідають точним інженерним моделям.

Мікроклімат у секції лисичок формується на основі багаторівневої системи керування, де кожен параметр має не фіксовані значення, а допустимі коридори, у межах яких ПЛК автоматично визначає оптимальні значення. Наприклад, температура не лише підтримується у межах 16–20 °С, а й коригується залежно

від вологості, активності дихання міцелію, виявлених змін у стані субстрату. Така взаємодія параметрів створює динамічний мікроклімат, що наближається до природних умов росту гриба у лісовій екосистемі, але при цьому забезпечує однорідність і стійкість врожаю.

Субстрат у секції лисичок має не менш складну структуру, ніж сам мікроклімат. Він формується не лише з деревних компонентів, але і з мікроелементів, що визначають інтенсивність росту міцелію. Субстрат має бути стабільним, вологоємним, повітропроникним, але водночас з достатньою кількістю легкодоступних поживних речовин. Вимірювання рН, рівня азоту, фосфору, калію, мікроелементів, токсинів, органічних кислот і продуктів розкладу є частиною системи контролю субстрату. Для цього використовуються портативні сенсори, стаціонарні зонди вологості типу VH400 або Decagon 5TE, аналізатори рН, а також спектрофотометричні тести. Дані з цих приладів надходять у ПЛК, який формує загальну модель стану субстрату, визначає рівень потреби у коригуванні вологості або внесенні поживних розчинів [18].

Освітлення у секції лисичок формується за принципом тотального розсіювання. Лисички не потребують яскравого світла, але надзвичайно чутливі до спектрального складу освітлення. В експериментальній секції використовується система LED-модулів з широким спектром регулювання, де співвідношення синьої, зеленої та червоної частин спектру може адаптуватися відповідно до фаз росту міцелію. Програма ПЛК визначає інтенсивність світла на основі даних датчиків BH1750, зображений на Рисунку 3.1, та TSL2561, а також аналізу швидкості росту. При зниженні активності міцелію система автоматично підвищує інтенсивність світла або коригує спектральний склад. Освітлення впливає не лише на біологічні процеси, але й на субстрат, температуру всередині секції та циркуляцію повітря, тому все це враховується у моделі.



Рис 3.1 Датчик освітлення BH1750

Вентиляція у секції формується як повільна, рівномірна, без різких потоків повітря. Лисички дуже чутливі до турбулентних повітряних потоків, які можуть спричиняти пересихання поверхні плодів, нерівномірність забарвлення або деформації. У секції застосовуються повільнообертові вентилятори з можливістю регулювання обертів, а також система клапанів, які забезпечують оновлення повітря без втрат вологості. Усі вентиляційні процеси контролюються датчиками CO<sub>2</sub> MH-Z19 або Senseair S8, що визначають рівень газообміну. Якщо концентрація CO<sub>2</sub> починає підвищуватися, ПЛК активує додаткову вентиляцію, але робить це з мінімальним впливом на температуру та вологість.

### **3.2 Формування мікроклімату експериментальної секції та вимоги до середовища культивування лисичок.**

Створення експериментальної секції для вирощування лисичок у промисловій теплиці передбачає формування складної, багаторівневої ієрархії параметрів, серед яких кожен має вагомий вплив на кінцеву якість плодів. У такій секції усі процеси, починаючи від підготовки субстрату й закінчуючи моментом збору врожаю, мають бути не лише контрольованими, а й динамічно керованими відповідно до реального стану міцелію. Традиційні підходи, які застосовуються для вирощування простіших грибів, таких як шампінйони чи гливи, тут фактично непридатні, оскільки лисички проявляють виражену реакцію навіть на незначні зміни температури, вологості, швидкості повітряного

руху чи освітлення. Саме тому секція повинна бути побудована не як теплиця, а як технологічний лабораторний модуль із високим ступенем автоматизації.

Мікроклімат, який формується в експериментальній секції, має бути максимально наближеним до природних умов, у яких лисички зростають у змішаних лісах. Ці гриби у природному середовищі отримують стабільну вологість завдяки шару лісової підстилки, що утримує воду, тоді як температура коливається поступово, без різких змін. Експериментальна секція повинна відтворювати ці умови, але на значно більш технологічному рівні. Температурний діапазон підтримується вузьким, з мінімальними похибками, оскільки навіть підвищення на два градуси може уповільнити розвиток міцелію на сорок відсотків. Лисички не витримують різких добових коливань температури, тому система обігріву й охолодження у секції повинна бути здатною до плавного регулювання, а датчики температури мають бути розташовані у трьох вимірах — у повітрі, у субстраті й на рівні плодового тіла. Такий підхід дозволяє ПЛК створити повну картину мікроклімату.

Вологість повітря в експериментальній секції підтримується на рівні, близькому до насичення, без перевищення порогу утворення конденсату. Лисички, як і більшість лісових грибів, залежать від високої вологості, але при цьому не можуть нормально плодоносити у середовищі з надлишковим конденсатом, який порушує газообмін поверхні шапочки та призводить до гнильних уражень. Саме тому у секції необхідно відтворити стан «вологого, але не мокрого повітря». Цього досягають за допомогою дрібнодисперсної системи зволоження високого тиску, у якій вода розбивається на дрібні частки, що не осідають на поверхні грибів. Рівень вологості контролюється датчиками цифрового типу SHT31, здатними фіксувати навіть дрібні відхилення, а ПЛК керує зволожувачами у реальному часі [8].

Структура субстрату є ключовим фактором, який визначає, чи буде дана експериментальна секція успішною. На відміну від шампінйонів, які ростуть на компості, або глив, що чудово розвиваються на соломі, лисички потребують субстрату, максимально наближеного до лісової підстилки. Він повинен бути

легким, пористим, з високою вологоємністю та одночасно достатньою аерацією. Це середовище повинно забезпечувати можливість постійного газообміну між субстратом та атмосферою секції. У промислових умовах для цього створюють багатокомпонентні субстратні суміші, що складаються з дрібної тирси листяних порід дерев, подрібненої сухої деревини, подрібнених залишків моху, інколи додають невеликі частки соснової кори, оскільки вона природним чином містить мікроелементи, присутні у природних екологічних нішах лисичок. Усі компоненти стерилізуються термічним або хімічним способом для уникнення розвитку конкурентних мікроорганізмів.

Після підготовки субстрат проходить фазу стабілізації, під час якої ПЛК контролює його температуру, вологість та рН. Для цього у субстрат занурюють зонди, що вимірюють вологість (типу Decagon 5TE), а також окремі датчики температури PT100 у захисних гільзах. ПЛК на основі цих даних керує подачею води та температурними модулями, забезпечуючи однакову структуру субстрату у всіх точках об'єму. Субстрат у лисичок не може бути надто щільним: при нестачі аерації міцелій розвивається повільно і часто зазнає стадії «глухої фази», коли гриб не має можливості розростатися через нестачу кисню. Тому секція оснащується системою аераційних каналів, розташованих у нижньому шарі субстрату.

Освітлення в експериментальній секції проектується за принципом відсутності жорстких тіней. Лисички потребують світла, але не прямого — у природі до них доходить лише розсіяне світло крізь крону дерев. Саме тому система освітлення створюється на основі LED-панелей, Рисунок 3.3 із матовими розсіювачами, Рисунок 3.4, що забезпечують однорідний спектральний потік. Окремі панелі можуть регулювати спектр, якість світла та інтенсивність на основі аналізу показників, зібраних датчиками TSL2561, зображений на Рисунку 3.2. Якщо ПЛК фіксує зниження активності росту, система може змінити спектральне співвідношення, збільшивши частку синього світла, яке стимулює розвиток поверхневих структур плодового тіла.



Рис 3.2 Датчик якості світла TSL2561



Рис 3.3 LED-панель



Рис 3.4 Розсіювач LED-панелі

Повітрообмін у секції організовується таким чином, щоб уникати утворення локальних зон підвищеної концентрації  $\text{CO}_2$ . У природі лисички

ростуть у середовищі з помірною циркуляцією повітря, і саме тому у секції встановлюються вентиляційні канали з низькошвидкісними вентиляторами. Їхня робота коригується ПЛК на основі значень, зафіксованих датчиками МН-Z19. Система працює за принципом адаптивної вентиляції, тобто швидкість та напрямок подачі повітря змінюються з урахуванням потреб гриба в різні фази розвитку.

### **3.3 Структура субстрату, технологія його підготовки та контроль фізико-хімічних параметрів.**

Формування повноцінної технологічної моделі експериментальної секції для вирощування лисичок вимагає створення багатофакторної системи керування, у якій кожен параметр середовища має визначальне значення не сам по собі, а у взаємодії з іншими факторами. Лисички являють собою один із найчутливіших видів грибів, який реагує на зміни будь-якого мікрокліматичного параметра з такою точністю, яка недосяжна у вирощуванні традиційних тепличних культур. Саме тому експериментальна секція повинна працювати не як звичайний тепличний комплекс, а як інтелектуальна автоматизована система з високою здатністю до адаптації, прогнозування та стабілізації умов [30].

Одним із ключових параметрів, який визначає швидкість і якість розвитку міцелію лисичок, є температура субстрату, яка часто відрізняється від температури повітря в секції на 2–4 °С через екзотермічні процеси всередині самого субстрату. У природних умовах лисички формують колонії там, де підстилка має збалансовану температуру, і будь-яке відхилення може змінити поведінку міцелію. У промисловій секції це вимагає встановлення додаткових датчиків температури у різних точках субстратного шару. Показники з цих датчиків постійно аналізуються ПЛК, який може зменшити або збільшити інтенсивність вентиляції або активувати систему локального охолодження. Це дозволяє уникнути перегрівання субстрату, яке може призвести до його висихання та сповільнення росту міцелію, а іноді навіть до його загибелі.

Крім того, важливою складовою є розуміння того, що температура у секції змінюється поступово протягом доби, і штучне відтворення цього природного ритму дозволяє підвищити врожайність. Наприклад, у нічний час температура зазвичай знижується на один–два градуси, і саме такий режим сприяє активізації обмінних процесів міцелію. Автоматизована система керування у секції дозволяє відтворювати ці коливання з високою точністю. Вентиляційні системи можуть працювати на мінімальній швидкості, а підігрів увімкнено в економному режимі, що забезпечує плавну зміну параметрів мікроклімату протягом доби.

Зволоження у секції також виконується не хаотично, а згідно з чіткою моделлю, в якій враховується не тільки показник вологості повітря, але й стан поверхні субстрату. Якщо поверхня надто суха, це означає, що субстрат починає втрачати воду, а міцелій лисичок у таких умовах переходить у сповільнену фазу розвитку. На відміну від глив чи шампіньйонів, які здатні адаптуватися до тимчасового дефіциту вологи, лисички реагують на нього практично миттєво: зупиняється ріст гіф, а формування плодів затримується. Для того щоб унеможливити такі ситуації, поверхню субстрату періодично сканує система оптичних сенсорів, які фіксують ступінь його зволоження. Зображення аналізується програмним модулем ПЛК, який визначає ступінь сухості або вологості за відтінком і структурою поверхні. Якщо система виявляє тенденцію до пересихання, зволожувачі вмикаються у режимі дрібнодисперсного туману.

Наступним важливим параметром є вентиляція. На відміну від багатьох видів грибів, лисички мають природну схильність до росту у середовищі з повільним, але постійним повітрообміном. У природі повітря циркулює під дією вітру, температурних градієнтів і конвекційних потоків, які проходять крізь лісову підстилку. У секції відтворення подібних умов можливе лише за допомогою спеціально налаштованої системи вентиляції, яка працює так, щоб повітря не створювало турбулентності. Якщо повітряний потік буде надто сильним, це призведе до пересихання плодового тіла, а надто слабка вентиляція викличе накопичення CO<sub>2</sub> та уповільнення розвитку гриба. Для контролю цього параметра використовуються вентилятори з низькими обертами та

сервоприводні клапани, які відкриваються з точністю до одного градуса. Концентрація CO<sub>2</sub> вимірюється датчиками МН-Z19, що передають дані до ПЛК у реальному часі.

Освітлення є ще одним критичним компонентом, який багато років залишався недооціненим у промисловому грибництві. Лисички формують плодові тіла тільки за наявності певного спектрального складу світла, і це не просто інтенсивність, а співвідношення спектрів. Так, синя частина спектра стимулює формування початкових плодових зачатків, зелена стабілізує розвиток шапочок, а червона відповідає за завершення циклу плодоношення. Це означає, що освітлення у секції повинно працювати у режимі спектральної модуляції. Сучасні LED-панелі дозволяють регулювати спектральний склад світла з високою точністю. У секції використовується програмна модуляція спектра відповідно до фази росту міцелію. У перші дні після інокуляції субстрату світло мінімальне; у фазі колонізації міцелію система працює на переважанні синьої частини спектра; у фазі плодоношення інтенсивність світла зростає, а спектр стає теплішим з домінуванням червоної і жовтої складових [39].

Субстрат у експериментальній секції проходить складний технологічний цикл підготовки. На першому етапі відбирається якісна сировина — деревина листяних порід, переважно береза, бук або граб, які забезпечують оптимальний баланс поживних речовин. Соснову деревину застосовують рідше, оскільки вона містить смоли, які можуть спричиняти уповільнення росту міцелію. Втім, у невеликих концентраціях компоненти соснової кори можуть покращити структуру субстрату, особливо у фазі плодоношення. На другому етапі деревину подрібнюють до часток певної фракції, оскільки надто велика фракція знижує площу контакту міцелію з субстратом, а надто дрібна призводить до надмірного ущільнення. Оптимальна фракція становить 2–5 міліметрів.

Після підготовки деревині субстрат проходить пастеризацію — термічну або парову, залежно від конструкції секції. Пастеризація дозволяє знищити конкурентів міцелію лисичок, таких як плісняви або бактерії, які можуть активно розвиватися у деревних середовищах. Після пастеризації субстрат

охолоджується до температури інокуляції, а ПЛК контролює швидкість цього охолодження, щоб уникнути конденсації. Інокуляція проводиться стерильно, за допомогою спеціальних рукавів та фільтрованого повітря, що запобігає потраплянню патогенів.

У наступній фазі розвитку секція переходить у режим контролю мікроклімату. ПЛК збирає дані з десятків датчиків, створюючи загальну картину стану середовища. Усі параметри зберігаються у базі даних, що дозволяє формувати прогноз розвитку міцелію. Наприклад, якщо система бачить, що температура субстрату підвищилася на 1.5 °C за останню годину, це означає, що міцелій активно росте, і виникає ризик перегріву. У такому випадку система підсилює вентиляцію, знижує температуру повітря і збільшує частоту зволоження. Якщо ж температура падає, система включає підігрів підлоги та бокових стінок.

Усе це робить експериментальну секцію повноцінною інтелектуальною системою, здатною адаптуватися до стану грибів так само, як природна екосистема, але із значно вищою стабільністю і передбачуваністю. Наступний блок буде ще більшим і присвячений біології лисичок, алгоритмам ПЛК, моделям прогнозування та масштабуванню секції до промислових обсягів.

### **3.4 Алгоритми автоматизованого керування мікрокліматом секції та роль ПЛК у забезпеченні стабільності умов.**

Дослідження розвитку лисичок у контрольованому середовищі експериментальної секції вимагає значно ширшого підходу, ніж просте відтворення температурно-вологісних характеристик природного лісового середовища. Лисички належать до тих видів грибів, у яких розвиток міцелію, швидкість формування плодових тіл та їх морфологічні властивості залежать не від одного-двох параметрів, а від складної композиції умов, які впливають на гриб одночасно і взаємопов'язаним способом. Саме тому будь-який технологічний режим у секції повинен бути гнучким, адаптивним і здатним реагувати на найменші зміни у поведінці гриба, що вимагає не лише

автоматизації, а і аналітичних алгоритмів, які формують передбачення того, як зміна одного фактора вплине на інші.

Окрему роль у системі відіграє цикл дихання міцелію, який є своєрідним індикатором активності гриба. Міцелій лисички споживає кисень і виділяє вуглекислий газ у кількостях, що безпосередньо відображають інтенсивність його росту. У природних умовах цей газ дифундує через лісову підстилку і не створює локального накопичення. У промисловій секції ситуація інша: якщо повітря не рухається рівномірно або якщо вентиляція недостатня,  $\text{CO}_2$  починає накопичуватися у нижніх шарах повітря, зокрема поблизу поверхні субстрату, де і знаходиться міцелій. Це призводить до зниження метаболізму гриба, сповільнення росту і навіть до часткової деградації молодих плодових зачатків. Саме тому датчики  $\text{CO}_2$  повинні бути розташовані не лише у повітрі на рівні плодів, але і безпосередньо над поверхнею субстрату, на висоті кількох сантиметрів. ПЛК на основі цих даних формує карту газових потоків у секції та налаштовує роботу вентиляції так, щоб не лише оновлювати повітря у верхніх шарах секції, а й забезпечувати рівномірний газообмін поблизу поверхні субстрату [43].

Тісно пов'язаний із газообміном процес теплопередачі у секції. Розвиток міцелію супроводжується виділенням тепла, що у великих секціях призводить до локального підвищення температури повітря на декілька градусів. У природних умовах це тепло швидко розсіюється через ґрунт, коріння дерев та конвективні потоки, але у промисловій секції без активного керування температурою виникають перегріті ділянки. Такі ділянки є вкрай шкідливими для лисичок: міцелій у них переходить у «захисний режим», знижуючи обмінні процеси, і тоді грибниця розвивається нерівномірно. Для виявлення таких зон у секції використовуються тепловізійні датчики або ІЧ-сенсори, що формують карту теплових аномалій, а ПЛК коригує роботу локальних охолоджувальних модулів. У великих секціях навіть кілька вентиляторів можуть бути спеціально спрямовані не на загальну циркуляцію повітря, а на усунення окремих перегрітих точок.

Освітлення у секції не просто відіграє роль стимулятора росту плодів, а забезпечує ще й правильну орієнтацію плодових тіл у просторі. Лисички у природі формують шапочки таким чином, щоб вони максимально ефективно відбивали світло і залишались видимими для певних комах, які сприяють розповсюдженню спор. У контрольованому середовищі важливо забезпечити таке світлове поле, яке не створюватиме різких напрямлених потоків, щоб плодові тіла не нахилилися в один бік. Саме тому LED-панелі у секції розташовуються на кількох рівнях, під різними кутами, а розсіювачі створюють рівномірне освітлення, яке імітує світло, що проходить крізь крону дерев. ПЛК контролює інтенсивність освітлення у кожній зоні, а датчики освітленості збирають дані для побудови карти світлового поля, за якою система визначає, чи не створюються темні або надмірно освітлені ділянки.

Субстрат у секції, хоча й залишається у стабільному стані протягом більшої частини циклу, має динамічні властивості. Він поглинає воду, виділяє тепло, поступово змінює хімічний склад у процесі росту міцелію. У перші дні міцелій активно розростається, споживаючи доступні цукри та інші поживні речовини, після чого починає інтенсивно продукувати ферменти, що розкладають деревину. Ці ферменти змінюють кислотність субстрату. Якщо рН знижується надто різко або різко зростає, це впливає на активність грибниці. Саме тому секція обладнана рН-зондами довготривалої дії, здатними фіксувати повільні зміни кислотності у межах субстрату. ПЛК використовує ці дані для регулювання мікроклімату: при різкому зниженні рН температура трохи знижується, щоб уповільнити ферментативні процеси, а при надмірному підвищенні — збільшується вологість, щоб активізувати природні механізми стабілізації.

Не менш важливим компонентом є мікробна чистота секції. Лисички у природних умовах ростуть у середовищі, де присутня величезна кількість бактерій, грибів-конкурентів, спор плісняви та інших мікроорганізмів. Однак у природі екосистема врівноважена, і кожен компонент контролюється численними взаємодіями. У промисловій секції такого балансу немає, тому

найменше мікробне забруднення може призвести до витіснення міцелію лисички. Саме тому весь повітряний простір секції повинен проходити через систему фільтрів з рівнем очищення не нижче HEPA H13. ПЛК контролює стан фільтрів, а датчики тиску визначають ступінь їхнього забруднення. При досягненні критичного рівня система автоматично пропонує заміну фільтрів або переходить у режим підвищеної вентиляції.

Автоматизація секції передбачає не лише просте управління окремими системами, а й побудову складних аналітичних моделей. ПЛК зберігає історію всіх параметрів: температуру, вологість, CO<sub>2</sub>, інтенсивність освітлення, вологість субстрату, рН. На основі цих даних створюється модель поведінки міцелію. Наприклад, якщо система бачить, що у період активного росту субстрат нагрівається швидше, ніж очікувалося, це може означати надмірне ущільнення субстрату, неправильний баланс поживних речовин або активну ферментативну фазу. У такому випадку система коригує мікроклімат, одночасно створюючи аналітичні висновки для оператора.

Особливе місце займає модель прогнозування урожайності. Використовуючи штучний інтелект, який аналізує форму плодових зачатків, кількість мікроструктур на поверхні субстрату, теплову активність міцелію та інші параметри, система здатна прогнозувати момент початку масового плодоношення, його інтенсивність і очікувану масу плодів. Це надзвичайно важливо для операторів секції, оскільки дозволяє планувати збирання, коригувати режим освітлення, вологість і вентиляцію до максимально оптимальних значень.

### **3.5 Фази розвитку міцелію лисичок у штучних умовах та їх кореляція з параметрами середовища.**

Розвиток лисичок у контрольованому середовищі експериментальної секції є складним поєднанням біологічних закономірностей і технологічної точності, яка дозволяє наблизити умови вирощування до природних екосистем, зберігаючи при цьому стабільність і керованість процесу. Лисички розвиваються

через кілька послідовних фаз, кожна з яких має характерні метаболічні зміни, що відповідають потребам міцелію та плодів у конкретному наборі параметрів мікроклімату. Розуміння цих фаз дає можливість створити гнучкі алгоритми ПЛК, що працюють не за фіксованими правилами, а за адаптивними моделями, які реагують на стан гриба.

На першій фазі розвитку, що називається фазою проростання міцелію, основним завданням системи є створення умов, які дозволять гіфам активно поширюватися через субстрат. Міцелій у цей період надзвичайно чутливий до вологості: якщо повітря недостатньо насичене вологою, субстрат починає втрачати воду, а міцелій, який знаходиться у поверхневому шарі, може увійти у стан «стиснення», коли гіфи скорочують площу розгалуження. У природі таке явище компенсується регулярними опадами, вологістю підстилки та затіненістю. У секції за подібний ефект відповідає система дрібнодисперсних туманогенераторів, що забезпечують вологість у межах 92–96%. ПЛК аналізує не лише показники датчиків вологості, але й температуру субстрату, оскільки швидке зростання міцелію супроводжується виділенням тепла, яке пришвидшує випаровування вологи [34].

Друга фаза, фаза інтенсивного росту міцелію, характеризується поступовим охопленням усієї маси субстрату та формуванням так званої міцелійної «мережі», що є передумовою для майбутнього плодоношення. Під час цієї фази мікроклімат повинен залишатися максимально стабільним. Лисички не реагують позитивно на різкі зміни навіть у межах одного градуса температури. Саме тому алгоритми ПЛК для цієї фази включають функцію згладжування, яка не дозволяє системі одразу реагувати на миттєві зміни датчиків, а аналізує динаміку показників за останні хвилини. Такий підхід забезпечує природніші умови, оскільки у лісі температура не змінюється стрибкоподібно, а коливається повільно.

У фазі формування плодових зачатків починається найвідповідальніший етап. Тут вступають у дію алгоритми, які базуються на візуальному аналізі секції. Камери високої роздільної здатності фіксують поверхню субстрату та

мікроструктури, які з'являються у вигляді дуже дрібних, майже прозорих конусів — це майбутні плодові тіла. На основі аналізу світла, що відбивається, системи штучного інтелекту визначають кількість утворених зачатків і їх рівномірність. Якщо алгоритм бачить, що певні ділянки мають меншу кількість зачатків, він може коригувати локальну інтенсивність освітлення або тривалість фотоперіоду для стимуляції росту.

Під час фази активного плодоношення зміни у мікрокліматі повинні відбуватися максимально повільно. ПЛК переходить у режим «м'якої стабілізації», коли корекції виконуються мінімальними кроками. Лисички в цей період дуже залежні від стабільності: різке зниження вологості на кілька відсотків або підвищення CO<sub>2</sub> на сотню ppm може спричинити зупинку росту плодів, їх деформацію або зміну забарвлення. Освітлення у фазі плодоношення також повинно бути рівномірним, із домінуванням теплого спектру. Система може навіть регулювати колірну температуру освітлення, оскільки лисички формують свій характерний золотистий відтінок лише у певному спектральному діапазоні.

Моделі прогнозування в експериментальній секції базуються на поєднанні даних з усіх сенсорів. Температура, вологість, CO<sub>2</sub>, швидкість росту міцелію, аналіз зображень, активність вентиляції — усе це перетворюється на єдину інформаційну матрицю. На її основі алгоритми прогнозують, як зміниться врожай у найближчі години або дні. Якщо алгоритм бачить, що інтенсивність росту зменшується, він може рекомендувати збільшити вологість. Якщо ж розвиток відбувається надто швидко, це може свідчити про швидке виснаження субстрату, і система зменшує температуру для уповільнення метаболізму.

Економічна ефективність секції ґрунтується на оптимізації витрат енергії, води та субстрату. У традиційних грибних виробництвах основною статтею витрат є обігрів. У секції лисичок алгоритм ПЛК контролює температуру таким чином, щоб не перегрівати повітря у верхніх шарах, а рівномірно розподіляти теплові потоки через нижню систему підігріву. Це значно зменшує витрати на обігрів при збереженні стабільної температури. Аналогічно мінімізуються

витрати на воду — дрібнодисперсний туман працює точково, а система аналізує якість зволоження через оптичні сенсори, не допускаючи перезволоження. Таким чином, мікроклімат у секції не тільки стабільний, а й економічно оптимізований.

Аварійні сценарії також є невід'ємною частиною системи. ПЛК повинен бути здатним миттєво реагувати на різкі зміни: вихід з ладу датчика, стрибок CO<sub>2</sub>, аварію у системі вентиляції або зволоження. У таких випадках система може переходити у режим аварійного охолодження, активувати резервні вентилятори або запускати аварійне розсіювання води для тимчасової стабілізації вологості. Усі аварійні дії фіксуються у журналі подій, що дозволяє аналізувати можливі причини збоїв [4].

Масштабування секції до промислових обсягів можливе лише тоді, коли система здатна відтворювати стабільні умови незалежно від розміру приміщення. Для цього алгоритми ПЛК повинні враховувати інерційність великих об'ємів повітря та тепла. У великих секціях повітря прогрівається нерівномірно, і ПЛК повинен координувати роботу десятків вентиляторів, нагрівачів, охолоджувачів і зволожувачів так, щоб усі ділянки секції мали однакові умови. Це досягається за допомогою зонального моделювання, коли секція ділиться на віртуальні зони, кожна зі своїми параметрами, а ПЛК обчислює середні значення.

### **3.6 Інтелектуальні моделі прогнозування врожайності, цифрова аналітика та оптимізація процесів культивування.**

Функціонування експериментальної секції для вирощування лисичок у штучно створеному мікрокліматі передбачає не лише точне відтворення зовнішніх умов, а й глибоке розуміння внутрішніх біологічних процесів, що визначають поведінку міцелію. Лисички як вид мають складну будову міцеліальної системи, яка відрізняється від багатьох інших грибів тим, що вона формує довготривалі симбіотичні зв'язки у природних умовах. Хоча у промисловій секції немає дерева-партнера, що забезпечує метаболічний обмін,

технологія вирощування лисичок моделює такі стани за допомогою комплексної структури субстрату та керованих параметрів середовища, які стимулюють міцелій діяти за природними механізмами.

Модель розвитку міцелію лисички у штучному середовищі описується як поетапний процес, що включає адаптацію до субстрату, формування мережі гіф, створення міцеліальних матів і подальший перехід до фази ініціації плодових тіл. На першому етапі міцелій, який вводиться у субстрат, починає адаптуватися до структури нового середовища. У цей момент відбувається активація ферментів, здатних розкласти деревинні компоненти та мікроструктури субстрату. Температура субстрату у цій фазі важлива не менше, ніж у повітрі. Занадто низька температура сповільнює ферментативну активність, тоді як надто висока призводить до часткового руйнування білкових структур міцелію. Саме тому у секції використовується багатоточковий температурний моніторинг, що дозволяє ПЛК підтримувати оптимальний діапазон.

На другому етапі розвиток міцелію переходить у фазу експансії. Гіфи активно розростаються, створюючи складну розгалужену мережу, в якій кожен відрізок виконує свою функцію: одні гіфи відповідають за поширення у глибину субстрату, інші — за пошук поживних речовин, треті — за укріплення структури міцеліального шару. У природних умовах саме ця фаза визначає майбутню плодючість грибниці. У секції інтенсивність експансії міцелію залежить від кількох параметрів: стабільності температури, рівня вологості, доступності кисню і структури субстрату. Якщо субстрат надто щільний, гіфи стикаються з механічним опором, і ріст уповільнюється. Якщо субстрат занадто пористий, гіфи не отримують достатньо вологи. Саме тому у секції підбирається баланс між щільністю і водоутримувальною здатністю субстрату [20].

Особливість лисичок полягає у тому, що міцелій може переходити у фазу повільного росту навіть за сприятливих умов, якщо співвідношення між вологістю повітря і вологою субстрату виходить за межі природних значень. Якщо поверхня субстрату пересихає, міцелій у верхньому шарі змінює свою поведінку, формуючи захисні структури замість ростових. У природі такі стани

компенсуються опадами або високою вологістю лісової підстилки. У секції ці функції виконує система дрібнодисперсного туману, яка активується не лише за показниками сенсорів, а й за алгоритмами, що враховують темпи висихання субстрату на основі температури та вентиляції.

Третій етап розвитку — формування міцеліального мату — є критичним для подальшого плодоношення. На цьому етапі гіфи починають переплітатися, утворюючи щільніші ділянки. У природі такі ділянки з'являються там, де гриб має оптимальні умови. У секції щільність міцеліального мату можна контролювати опосередковано через параметри мікроклімату. Якщо температура трохи підвищується, а вологість залишається стабільною, гіфи формують міцнішу структуру. Якщо ж температура падає, структура може бути пухкішою. ПЛК аналізує динаміку росту і може звертати увагу оператора на необхідність корекції параметрів.

Четвертий етап — ініціація плодових тіл. Це один із найчутливіших процесів у розвитку лисичок. На цьому етапі гриб реагує на світло, температуру, рівень  $\text{CO}_2$  і навіть на структуру поверхні субстрату. У природних умовах ініціація відбувається тоді, коли світло проникає крізь рослинний покрив і досягає міцелію, вологість підвищується після дощу, а температура стабілізується. У секції такі умови створюються за допомогою програмованих алгоритмів: освітлення збільшується на певний відсоток, вологість утримується ближче до верхньої межі, а вентиляція працює у режимі повільної циркуляції. У цей момент важливо не допустити різких змін  $\text{CO}_2$ , оскільки надмірне його зниження призведе до того, що плодові зачатки сформуються занадто інтенсивно і швидко виснажать міцелій [28].

Біологічна поведінка лисичок у штучному середовищі має свої особливості. Наприклад, ці гриби мають здатність формувати симетрію плодового тіла лише за умов рівномірного освітлення. Якщо у певній частині секції світло слабкіше, плодові тіла можуть рости асиметрично, нахилиючись до джерела світла. Це не лише погіршує якість продукції, а й ускладнює моделювання мікроклімату, оскільки лисички, що ростуть асиметрично, мають

інший розподіл тепла і вологи. Тому система освітлення секції повинна створювати максимально однорідне світлове поле.

У процесі росту лисичок у секції можуть виникати стресові фактори. До них належать різкі зміни температури, зниження вологості, надлишкова вентиляція, забруднення повітря мікрочастками, патогени або неправильний склад субстрату. Лисички реагують на стрес не так, як більшість грибів. Вони не припиняють ріст повністю, але змінюють його характер: плодові тіла стають більш дрібними, а міцелій укріплює свою структуру замість того, щоб переходити у фазу плодоношення. У секції такі сценарії контролюються за допомогою алгоритмів, що аналізують різкі відхилення параметрів і коригують їх до безпечних значень.

Важливою складовою функціонування секції є хімічні процеси у субстраті. Лисички виділяють ферменти, що розкладають компоненти деревини і забезпечують гриб поживними речовинами. Ці ферменти діють лише за певної кислотності, тому контроль рН є одним з основних параметрів. Різке зниження рН свідчить про надмірну активність ферментів, тоді як підвищення може бути сигналом недостатнього розкладання субстрату. ПЛК використовує дані датчиків рН і вносить корективи у температуру, вологість і вентиляцію, щоб стабілізувати процеси.

У наступних стадіях моделювання поведінки міцелію під час плодоношення можна побачити ще одну особливість: лисички активно випаровують воду через поверхню плодового тіла, створюючи мікрошар вологи навколо себе. Якщо вентиляція надто інтенсивна, цей шар руйнується, і гриби втрачають здатність зберігати форму. Тому вентиляція у секції працює так, щоб повітря рухалося надзвичайно повільно, не зачіпаючи мікробару [35].

Хімічний склад повітря має не менше значення, ніж фізичні параметри. Лисички мають високу чутливість до летких органічних сполук, які можуть утворюватися у секції через роботу обладнання, розкладання субстрату або навіть через використання миючих засобів. У секції застосовуються спеціальні VOC-сенсори, що виявляють такі сполуки, а ПЛК має можливість відключати

вентиляцію з рециркуляцією і переходити у режим зовнішнього повітропостачання.

### 3.7 Комплексна інтегральна модель експериментальної секції.

Функціонування експериментальної секції для вирощування лисичок у промисловій теплиці є складною взаємодією живих процесів та інженерних систем, у якій кожен компонент впливає на інший. Створення стабільної системи культивування лисичок вимагає поєднання систем автоматичного регулювання з адаптивними мікрокліматичними моделями, Рисунок 3.5, 3.6, що враховують найдрібніші зміни у поведінці міцелію та грибів. Під впливом параметрів середовища гриб не лише змінює темп росту, а й модифікує внутрішню структуру своїх гіф, перебудовуючи ферментативні процеси, що визначають швидкість розкладання субстрату. Саме тому ПЛК у секції повинен не просто стабілізувати температуру, вологість чи освітлення, а й прогнозувати динаміку розвитку міцелію на основі поточних та історичних даних.

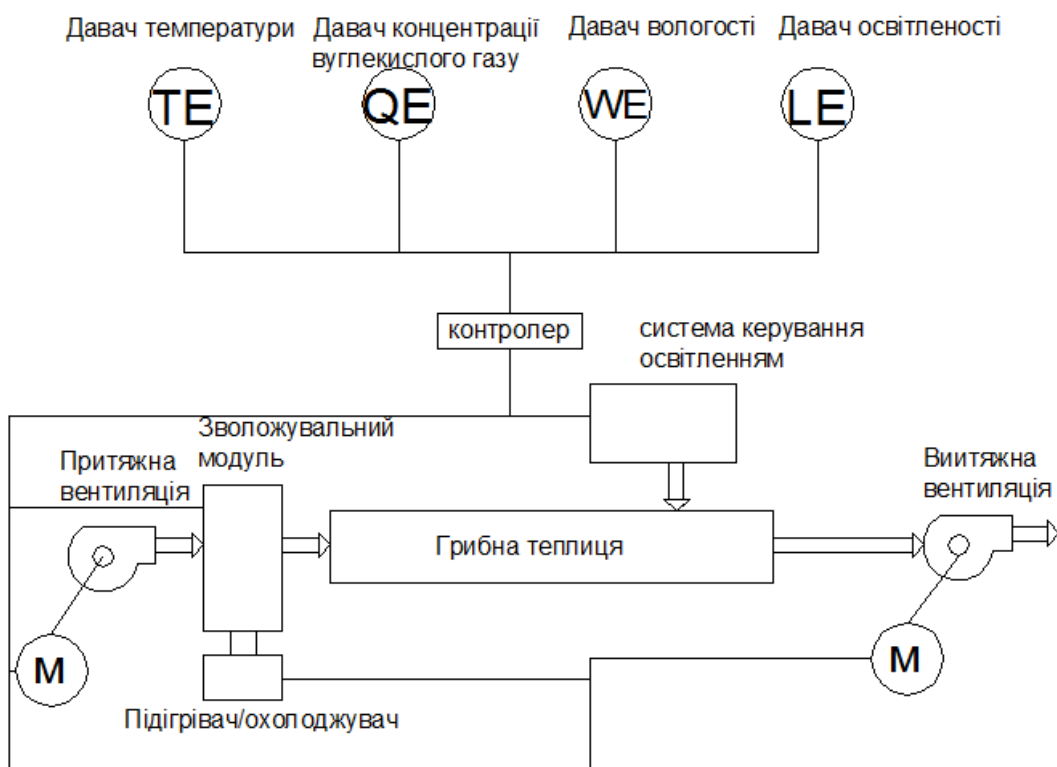


Рис 3.5 Системи культивування лисичок

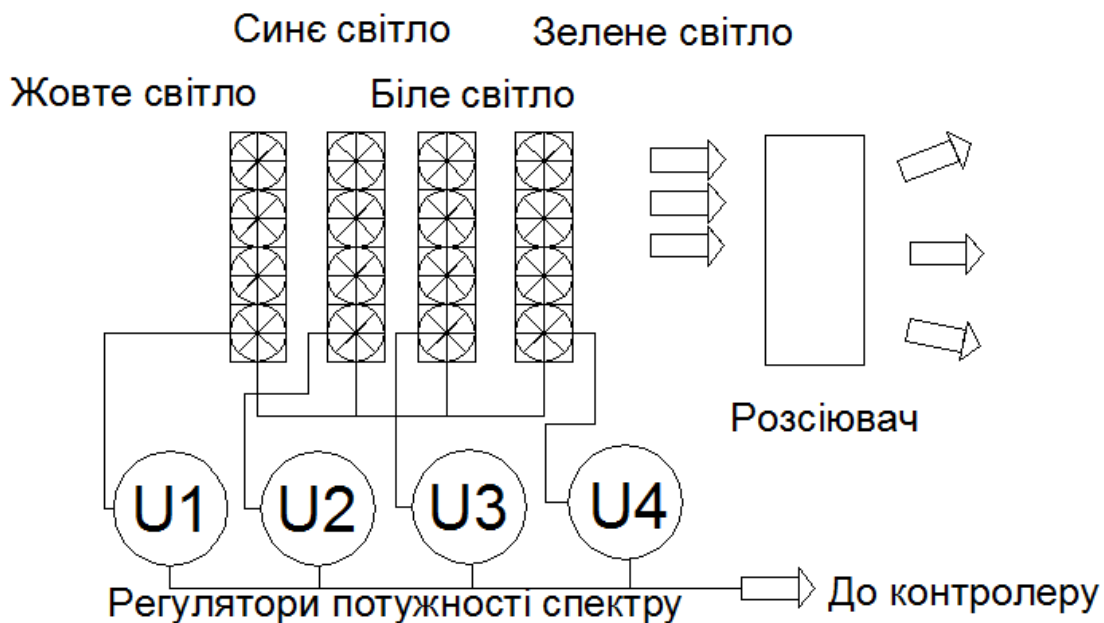


Рис 3.6 Системи розсіяного, контрольованого освітлення культивації лисичок

Увагу слід приділити тому, як лисички реагують на зміну світлового середовища у тривалій перспективі. У природі лисички орієнтуються на м'яке, розсіяне світло, що проходить крізь листяний полог. Цей світловий режим стабільний протягом дня, але має поступові зміни інтенсивності, що задають біологічний ритм росту гриба. У секції ці ритми відтворюються за допомогою світлодіодних систем, які у здатні регулювати спектральний склад і інтенсивність світла з точністю до відсотка. Освітлення у секції може змінюватися залежно від фази росту: у фазі розвитку міцелію світло мінімальне, у фазі ініціації воно зростає, а під час плодоношення стає більш теплим, стимулюючи утворення характерного золотистого забарвлення. Взаємодія освітлення та ферментативної активності міцелію є ключовим аспектом моделювання: світло може підсилювати або послаблювати певні ферменти, що розкладають складові субстрату. У системі автоматизації це враховується шляхом аналізу температури субстрату та його рН після зміни інтенсивності освітлення [48].

Не менш складним є вплив вологості повітря на стабільність плодових тіл. Лисички мають особливу будову шапочки, що включає мікропористу поверхню, яка активно випаровує вологу. Завдяки цій властивості гриб підтримує внутрішній водний баланс. У штучному середовищі надмірна вентиляція або надто сухе повітря порушують цей баланс. Якщо мікрошар вологи навколо плодових тіл руйнується, лисички втрачають здатність підтримувати свою структуру, висихають або деформуються. Тому система зволоження секції працює так, щоб утворювати фоновий вологий туман, який не осідає великими краплями, але створює мікросередовище на рівні плодів. Взаємодія цього туману з повітряними потоками є важливим фактором, який ПЛК контролює за допомогою датчиків вологості та аналізу камер спостереження, що оцінюють прозорість повітря та наявність мікрокрапель.

Субстрат у секції має динамічну хімічну структуру. У період активного росту міцелію рівень азоту та фосфору може зменшуватися, тоді як концентрація органічних кислот зростає. Це призводить до зміни рН субстрату, що впливає на подальший розвиток гриба. Система автоматизації у секції повинна враховувати не лише миттєві значення рН, а й тенденцію їх зміни. Якщо рН знижується надто швидко, це може свідчити про надмірну ферментативну активність або про неправильний баланс компонентів субстрату. У таких випадках система може коригувати температуру, збільшуючи або зменшуючи інтенсивність ферментативних процесів. Якщо ж рН стабільний, ПЛК підтримує параметри на оптимальному рівні [2].

Окремим завданням є моделювання взаємодії субстрату і повітряної частини секції. Поверхня субстрату є перехідною зоною, де відбувається обмін теплом і вологою між субстратом і повітрям. Цей процес визначає швидкість висихання верхнього шару субстрату, що впливає на ініціацію плодоношення. Якщо поверхня пересихає надто швидко, міцелій у верхньому шарі формує захисні структури, які не переходять у стадію плодових тіл. У природних умовах цей процес уповільнюється шаром лісової підстилки, який утримує вологу. У секції ж цей ефект досягається за допомогою мікрокрапельного туману та

контролю вентиляції. ПЛК аналізує рівень вологості на поверхні субстрату і коригує роботу систем, щоб утримувати його у межах оптимального діапазону.

Модель автоматизованого керування у секції включає не лише підтримку стабільних параметрів, а й реагування на зміну поведінки міцелію. Система аналізує швидкість росту, яку визначають за допомогою теплових сенсорів, датчиків вологості субстрату та візуальних камер. Якщо система бачить, що інтенсивність росту збільшується, вона може передбачити можливе перегрівання субстрату і завчасно зменшити температуру повітря. Якщо ж ріст уповільнюється, система може збільшити вологість або змінити режим освітлення. Така модель є динамічною, оскільки базується на реальних даних і здатна коригуватися у реальному часі.

Усі дані, які збирає система, зберігаються в окремій базі, що дозволяє створювати довгострокові аналітичні графіки та моделі. На основі цих даних оператор може аналізувати, які режими були найбільш ефективними, які викликали стресові реакції у гриба, а які забезпечили максимальний врожай. Створення таких моделей дозволяє масштабувати технологію вирощування лисичок до промислових масштабів, де розмір секції може бути значно більшим, а кількість технічних засобів — більшою.

Серцем системи залишається ПЛК, який виконує логічні операції з об'єднання даних та формування керуючих впливів. Алгоритми ПЛК враховують інерційність системи: у великих секціях температура і вологість змінюються не миттєво, а поступово. Тому всі регулювання виконуються плавно, без різких змін, які можуть спричинити стрес у гриба. ПЛК координує роботу нагрівачів, охолоджувачів, системи вентиляції, зволоження, освітлення і фільтрації повітря [14].

У системі також реалізовано аварійні режими. Якщо датчик виходить з ладу, система може автоматично переходити у режим резервного керування, використовуючи середні значення з інших датчиків. Якщо виявлено різке підвищення  $\text{CO}_2$ , система збільшує вентиляцію, але робить це поступово, щоб не порушити мікроклімат. Якщо ж відбувається аварія у системі освітлення, ПЛК

може активувати резервні панелі, щоб уникнути різких змін у світловому середовищі.

Якщо ж у секції виникають патогени, такі як пліснява чи бактерії, система автоматично знижує вологість і збільшує вентиляцію, а також повідомляє оператора. Раннє виявлення патогенів є критично важливим, оскільки вони можуть швидко поширюватися. У експериментальній секції використовуються оптичні датчики і камери високої роздільності, які здатні виявляти аномальні плями або зміну текстури поверхні субстрату.

Завершальна інтегральна модель секції — це поєднання біологічної поведінки гриба, фізичних параметрів середовища та цифрової аналітики. Вона дозволяє створити систему, яка не лише стабілізує умови, а й самостійно адаптується до змін. Лисички у такій секції ростуть не як у звичайній теплиці, а як у високоточній лабораторній екосистемі, де кожна зміна параметра врахована, а кожен процес контролюється з точністю, недоступною у природі. Такий підхід дозволяє отримати стабільні врожаї високої якості та відтворити природні умови росту гриба у промислових масштабах.

### **3.8 Висновки до розділу 3**

У результаті опрацювання розділів, що охоплюють біологічні передумови вирощування лисичок, формування спеціалізованого мікроклімату, структуру субстрату, алгоритми автоматизованого керування, фази розвитку міцелію, інтелектуальні моделі прогнозування врожайності та комплексну інтегральну модель експериментальної секції, встановлено, що культивування лисичок у штучних умовах є складним багатофакторним процесом, який потребує поєднання біологічних знань та високоточного інженерного керування.

Аналіз біологічних передумов вирощування лисичок показав, що цей вид грибів характеризується високою чутливістю до стабільності середовища та має суттєві відмінності від традиційно культивованих грибів. Це обумовлює необхідність створення спеціалізованої експериментальної секції, здатної відтворювати природні лісові умови у контрольованому форматі. Формування

мікроклімату для лисичок повинно забезпечувати не лише підтримання температури та вологості, але й стабільний газообмін, мінімальні коливання параметрів та кероване розсіяне освітлення, яке є додатковим обов'язковим фактором розвитку плодкових тіл.

Дослідження структури субстрату для лисичок підтвердило його ключову роль як біологічної та фізико-хімічної основи процесу культивування. Субстрат виконує функцію джерела поживних речовин, регулятора вологості, теплового буфера та середовища для розвитку міцелію. Контроль його вологості, температури, кислотності та стабільності структури є необхідною умовою ефективного росту та формування врожаю, а також тісно пов'язаний із параметрами повітряного середовища секції.

Розроблені алгоритми керування мікрокліматом для лисичок базуються на принципі адаптивного автоматизованого регулювання з використанням зворотного зв'язку від системи давачів. Такий підхід дозволяє забезпечити плавність змін параметрів, уникати стресових впливів на міцелій та синхронізувати роботу всіх підсистем теплиці. Особливу роль відіграє багатозональне керування, яке дає змогу локально коригувати умови та підтримувати рівномірність мікроклімату в межах експериментальної секції.

Аналіз фаз розвитку міцелію лисичок показав, що кожен етап росту характеризується специфічними вимогами до параметрів середовища, а порушення їх стабільності негативно впливає на подальше плодоношення. Це обґрунтовує необхідність пофазного керування мікрокліматом та використання алгоритмів, що враховують динаміку біологічних процесів, а не лише фіксовані значення параметрів.

Інтелектуальні моделі прогнозування врожайності, побудовані на основі аналізу даних сенсорів і поведінки міцелію, дозволяють оцінювати перспективи розвитку плодкових тіл, своєчасно виявляти відхилення та коригувати режими роботи системи. Використання таких моделей підвищує ефективність виробництва, зменшує ризики втрати врожаю та створює умови для оптимізації ресурсних витрат.

Комплексна інтегральна модель експериментальної секції для вирощування лисичок об'єднує біологічні, фізичні та технічні процеси в єдину керовану систему. Вона забезпечує цілісність технологічного процесу, узгоджену роботу всіх підсистем та можливість адаптації до змін як внутрішніх, так і зовнішніх умов. Реалізація такої моделі підтверджує доцільність використання автоматизованих і інтелектуальних підходів для культивації вимогливих лісових грибів у промислових умовах.

Таким чином, сукупність розглянутих рішень формує науково та технічно обґрунтовану основу для створення експериментальної секції з вирощування лисичок у промисловій теплиці. Запропонований підхід відкриває перспективи подальших досліджень, удосконалення алгоритмів керування та розширення практичного застосування автоматизованих біотехнологічних систем у сучасному грибівництві.

## РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Охорона праці при вирощуванні грибів.

Організація безпечних умов праці під час вирощування грибів у промисловій теплиці є одним із ключових аспектів функціонування підприємства, оскільки технологічний процес передбачає постійну взаємодію персоналу з обладнанням, мікрокліматичними системами, системами водопостачання, вентиляції, освітлення та автоматизованого керування. Особливість такого виробництва полягає в тому, що теплиця є замкнутим простором зі штучно створеним середовищем, у якому параметри температури, вологості, освітлення та газового складу повітря регулюються автоматично, а це створює додаткові фактори ризику для працівників. Саме тому охорона праці повинна враховувати не тільки загальноприйняті норми, але й специфіку тепличних виробництв, де присутні водяні пари, електричні установки у вологому середовищі, системи підвищеної вологості, джерела теплової енергії та обладнання з рухомими елементами [24].

У теплицях, де культивуються гриби, особливо важливо підтримувати стабільний мікроклімат, і система його регулювання повинна працювати безперервно. Проте для персоналу така система може створювати небезпеки, пов'язані з високою вологістю, що збільшує ризики ковзання підлог, корозії металевих частин обладнання та можливості ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції. Тому на підприємстві мають бути впроваджені спеціальні вимоги до електробезпеки: усі електроприлади повинні мати захисні кожухи, водонепроникні корпуси та заземлення; розетки повинні розташовуватися вище рівня можливого зволоження; а обладнання — регулярно проходити перевірку діелектричної цілісності. Персонал допускається до роботи з електрообладнанням лише після спеціальної підготовки та інструктажу.

Важливим фактором безпеки є вентиляція, оскільки під час вирощування грибів у повітрі накопичуються водяна пара та вуглекислий газ. Система

вентиляції повинна підтримувати нормативний рівень газообміну, запобігати застою повітря та появі зон із підвищеною концентрацією CO<sub>2</sub>, які можуть бути небезпечними для персоналу. Робітники повинні входити до теплиці лише після провітрювання або при працюючій вентиляційній системі. Виконання будь-яких регламентних робіт, пов'язаних із вентиляційними каналами, допускається тільки після повного відключення вентиляторів та блокування системи автоматичного запуску, щоб уникнути раптового увімкнення [31].

У процесі обслуговування теплиці працівники контактують із водою, поживними розчинами, субстратними матеріалами та органічними залишками, що може створювати ризики біологічного та санітарного характеру. Хоча грибне виробництво не передбачає роботи з небезпечними хімічними речовинами, у теплиці можуть бути присутні природні мікроорганізми, спори плісняви або грибів-конкурентів. Для мінімізації ризиків персонал повинен працювати у захисному одязі, використовувати рукавички, вологостійке взуття та, за потреби, захисні маски, які запобігатимуть потраплянню спор до дихальних шляхів. Усі роботи з прибирання, санітарної обробки та підготовки приміщення до нового циклу вирощування проводяться у добре вентильованому середовищі.

Поверхні теплиці повинні мати протиковзке покриття, оскільки висока вологість є постійним фактором виробничого середовища. У місцях, де розташовані зволожувачі, системи туманоутворення та водопровідні магістралі, можливе утворення плівки води на підлозі, що підвищує ризик падінь. Тому підлоги мають бути обладнані дренажними канавами та нахилами для відведення конденсату. Регулярне прибирання поверхонь, очищення від води та органічних залишків є обов'язковими заходами для запобігання травмам.

Система автоматизованого керування теплицею також створює окремі вимоги до охорони праці. Оператор повинен розуміти принцип роботи ПЛК, структуру підключення датчиків та виконавчих механізмів, можливі небезпечні режими та аварійні сигнали. У випадку збою автоматики персонал повинен чітко знати, які дії необхідно виконати: від ізоляції пошкодженої ділянки до переведення системи у ручний режим. Система аварійного вимкнення повинна

бути доступною з усіх робочих зон, а оператори — пройти тренування щодо дій при аваріях.

Температурні коливання у теплиці можуть створювати ризики теплового удару, особливо якщо працівники входять із холодного приміщення у тепле. Тому необхідно запроваджувати поступовий режим адаптації персоналу до внутрішнього середовища, а також обмежувати час перебування у теплиці під час періодів інтенсивного прогрівання. У разі виконання робіт поблизу нагрівальних приладів чи ламп, працівники повинні використовувати теплоізоляційні рукавички та дотримуватися безпечної дистанції.

На підприємстві має бути організована система медичних оглядів, оскільки робота у замкнутому теплому та вологому середовищі може мати вплив на дихальну систему та загальний стан здоров'я працівників. Регулярний медичний контроль дозволяє виявити ранні ознаки алергічних реакцій на спори грибів або грибкові алергени, які можуть присутні у повітрі під час виробничого циклу.

Всі матеріали, що використовуються у теплиці, повинні відповідати вимогам пожежної безпеки. Хоча вирощування грибів не передбачає використання відкритого вогню чи легкозаймистих речовин, теплиця обладнана електричними мережами, вентиляційними двигунами та іншими приладами, що можуть створити пожежонебезпечні ситуації. Усі електричні щити мають бути оснащені автоматами захисту від перевантаження, а працівники — пройти інструктаж щодо використання порошкових або вуглекислотних вогнегасників.

Під час роботи із зволожувальними системами персонал повинен уникати контакту з високотисковими трубопроводами, які подають воду у форсунки. У разі пошкодження такої системи можливе неконтрольоване розбризкування води під тиском, що становить травмонебезпеку. Тому регламентні роботи проводяться лише після повного відключення подачі води та скидання тиску у системі.

Окрему увагу необхідно приділити організації безпечних технологічних проходів між рядами вирощування. Вузькі проходи у поєднанні з високою вологістю можуть створювати ризики ударів об обладнання або падінь. Ширина

проходів повинна бути достатньою для вільного руху персоналу, а конструкції стелажів — стійкими, міцними та надійно закріпленими, щоб унеможливити їх перекидання при випадковому контакті.

У комплексі всі ці заходи формують систему охорони праці, яка забезпечує безпечну роботу персоналу в умовах замкнутого високовологісного техногенного середовища. Впровадження регламентів з охорони праці дозволяє зменшити ризики травматизму, професійних захворювань та аварій, що значною мірою визначає ефективність функціонування тепличного грибного виробництва.

#### **4.2 Техніка безпеки та охорона праці при роботі з міцелієм.**

Робота з міцелієм у промислових умовах вирощування грибів належить до технологічних операцій підвищеної чутливості, оскільки міцелій є живим біологічним матеріалом, здатним реагувати на найменші порушення середовища, а персонал, який безпосередньо контактує з ним під час інокуляції, підготовки субстрату або обслуговування технологічних процесів, має дотримуватися строгих вимог безпеки. Міцелій грибів у промисловому виробництві зберігають, перевозять, змішують із субстратом і розподіляють у технологічних ємностях, що створює ряд ризиків, пов'язаних із мікробіологічним забрудненням, алергічними реакціями, порушенням санітарного режиму, а також можливими небезпеками, спричиненими неправильним поводженням з обладнанням, яке застосовується у процесі інокуляції [38].

Під час роботи з міцелієм особливо важливо забезпечити санітарну чистоту робочого середовища. Будь-яке мікробне забруднення поверхонь або субстрату може змінити поведінку міцелію, спричинити конкуренцію з небажаними мікроорганізмами, розвиток пліснявих грибів або бактерій, які не тільки погіршують якість продукції, а й становлять небезпеку для здоров'я працівників. Тому перед проведенням інокуляційних робіт всі робочі поверхні, інструменти та ємності підлягають дезінфекції, а працівники повинні використовувати індивідуальні засоби захисту, такі як стерильні рукавички,

халати, захисні маски або респіратори, що запобігають потраплянню спор та мікрочастинок у дихальні шляхи.

Міцелій у промисловому виробництві часто має високу концентрацію спор і структур гіф, які легко потрапляють у повітря. У момент відкриття контейнера зі свіжим міцелієм або при розподіленні його у субстрат можливе утворення аерозольної хмари, майже непомітної для ока, проте здатної викликати подразнення слизових оболонок або алергічні реакції. Тому всі операції, пов'язані з пересипанням, подрібненням або перемішуванням міцелію, повинні проводитися у приміщеннях із локальними системами витяжної вентиляції, що створюють ламінарні потоки повітря та запобігають його розсіюванню у робочу зону [45].

Субстрат, у який вносять міцелій, зазвичай має підвищену температуру після пастеризації, тому персонал повинен стежити, щоб субстрат був достатньо охолоджений і не створював ризику термічних опіків. Крім того, надто гарячий субстрат може пошкодити міцелій, що негативно впливає на якість та кількість урожаю. Робітники повинні виконувати вимірювання температури субстрату перед змішуванням з міцелієм, використовуючи термощупи, а під час перемішування субстрат часто має значну вагу, тому важливо дотримуватися правил підйому вантажів та застосовувати механізовані допоміжні засоби.

Під час інокуляції субстрату працівники мають уникати контакту шкіри з міцелієм, оскільки тривале чи часте контактування може спричинити подразнення або сенсibiliзацію організму до грибкових білків. Усі роботи проводяться у рукавичках з відповідним рівнем захисту, а при ознаках реакції організму працівник повинен бути направлений на медичний огляд. У приміщеннях, де працюють із міцелієм, забороняється приймати їжу, зберігати особисті речі або заходити у несанітарному одязі, оскільки це порушує стерильність.

Інокуляційні роботи часто виконуються за допомогою спеціалізованого обладнання, яке створює ризики механічного характеру. Мішалки, дозатори, транспортери для субстрату повинні бути обладнані захисними кожухами,

блокуючими пристроями та системами аварійного вимкнення. Персонал допускається до роботи з такими пристроями тільки після проходження навчання і має знати, як зупинити обладнання у випадку аварійної ситуації. Особливу увагу приділяють зоні шнекових транспортерів, де можливе затулювання рукавів або частин одягу, тому одяг робітників повинен бути приталеним, без звисаючих елементів.

Під час зберігання міцелію у холодильних камерах діють окремі правила безпеки. Холодильні камери повинні мати освітлення аварійного типу, а двері — можливість відкриття зсередини. Працівники не повинні заходити туди самі, а під час операцій зі зважування, переміщення або завантаження міцелію повинні уникати переохолодження та використовувати теплий спецодяг. Температура у камерах може бути низькою, що в умовах високої вологості сприяє утворенню льоду на поверхнях, тому підлога повинна мати протиковзке покриття.

Міцелій також може виділяти леткі речовини, які у замкнутому просторі підвищують концентрацію органічних сполук у повітрі. Тому система вентиляції у приміщеннях, де зберігають або пересипають міцелій, повинна працювати постійно, а рівень вентиляції — відповідати санітарним нормам. Працівники, які працюють у таких умовах тривалий час, повинні проходити медичний огляд з акцентом на дихальну систему.

Під час приготування субстрату для інокуляції можуть використовуватись дезінфікувальні розчини, гаряча вода та інше обладнання, що створює додаткові ризики. Робітники повинні уникати потрапляння дезінфікуючих засобів на шкіру та очі, а у разі контакту — негайно промивати уражені ділянки водою. Усі засоби зберігаються у закритих контейнерах, а роботи проводяться відповідно до інструкцій.

У роботі з міцелієм велике значення має профілактика перехресного забруднення різних культур грибів. Якщо у теплиці вирощують декілька видів, персонал повинен працювати у визначеному порядку, починаючи з найчутливіших культур і закінчуючи тими, що витримують ширший діапазон

умов. Усі інструменти після використання підлягають ретельній дезінфекції, а робоча зона — миттюється та просушується.

Важливим фактором є також психологічна підготовка персоналу. Робота з міцелієм вимагає уважності, акуратності, дисципліни та розуміння того, що будь-яке порушення санітарного режиму може зірвати виробничий цикл. Тому працівники повинні бути підготовлені до роботи у стерильних умовах, знати правила поведінки, реагування на аварійні сигнали та принципи функціонування обладнання [10].

Таким чином, охорона праці при роботі з міцелієм у промисловому виробництві є комплексом заходів, що охоплює санітарні вимоги, захист персоналу, правила роботи з обладнанням, регламенти вентиляції та температурного режиму, а також організаційні аспекти, спрямовані на забезпечення безпечного технологічного процесу. Дотримання цих вимог гарантує високу якість продукції, стабільність виробництва та збереження здоров'я працівників.

#### **4.3 Техніка безпеки та охорона праці при монтаж-налагоджувальних роботах у теплиці.**

Монтажно-налагоджувальні роботи, що виконуються у промисловій теплиці перед введенням її в експлуатацію або у період модернізації технологічних систем, належать до найбільш відповідальних та небезпечних етапів виробничої діяльності. На відміну від звичайної експлуатації тепличного комплексу, монтажні процеси передбачають роботу з електричними установками, вентиляційним обладнанням, трубопроводами, металевими конструкціями, автоматизованими системами керування, а також виконання операцій на висоті, у замкнених або погано вентильованих просторах. Тому охорона праці у цей період базується не лише на загальних нормах безпеки, а й на спеціальних технологічних регламентах, що враховують особливості тепличної конструкції та специфіку грибного виробництва [16].

Першим етапом організації безпечних монтажних-налагоджувальних робіт є підготовка робочої зони. У приміщенні теплиці до початку встановлення обладнання повинні бути видалені всі сторонні предмети, забезпечено рівне стабільне протиковзке покриття підлоги, а також організоване тимчасове освітлення достатньої яскравості, оскільки тепличні покриття та конструкції на етапі монтажу можуть частково перебивати природне освітлення. Усі роботи повинні виконуватися у сухих умовах, а у разі необхідності роботи на вологій підлозі персонал зобов'язаний використовувати ізоляційне взуття та гумові килимки для уникнення ураження електричним струмом.

Оскільки значна частина монтажних робіт пов'язана з підключенням електрообладнання, системи освітлення, нагрівальних елементів, датчиків, вентиляторів, насосів і автоматизованих блоків, до виконання цих операцій допускаються лише працівники з відповідною групою електробезпеки. Перед увімкненням живлення проводиться обов'язкова перевірка цілісності ізоляції кабелів, правильності заземлення, відповідності номінальних навантажень. Монтажники повинні працювати інструментом із діелектричними рукоятками та використовувати переносні лампи з напругою не більше 42 В для внутрішнього освітлення. Усі електричні роботи виконуються при відключеній напрузі, а на щиті повинні бути вивішені відповідні попереджувальні таблички.

Не менш відповідальною є робота із системами вентиляції, оскільки вони складаються з металевих коробів, кріпильних систем, вентиляторів і повітропроводів, які монтуються часто на висоті. Працівники, які виконують установку вентиляційних магістралей, повинні використовувати захисні каски, пояси безпеки, а під час роботи на висотних конструкціях — страхувальні системи. Усі конструкції вентканалів мають бути закріплені до несучих елементів теплиці з дотриманням допустимих навантажень, а монтажні роботи мають виконуватися лише після випробування кріплень на міцність [22].

Монтажно-налагоджувальні роботи у теплиці включають установку трубопроводів з водою, паром чи теплоносієм. Під час роботи з трубами існує ризик опіків, затоплення або пошкодження обладнання. Працівники повинні

виконувати роботи у захисних рукавицях, а перед підключенням трубопроводів мають пройти гідравлічні випробування для перевірки герметичності. Усі фланцеві з'єднання та ущільнення перевіряються візуально та інструментально. При роботі з гарячими трубами чи нагрівальними системами монтажники зобов'язані очікувати повного охолодження обладнання або застосовувати термостійкі засоби захисту.

Особливе місце у монтажно-налагоджувальному циклі займають роботи із системою автоматизації теплиці. Оскільки у сучасних тепличних комплексах встановлюються датчики температури, вологості, CO<sub>2</sub>, освітленості, витратоміри води, датчики рН, контролери ПЛК, виконавчі механізми і системні модулі, працівники повинні розуміти принципи роботи цих пристроїв і дотримуватися вимог електро- та інформаційної безпеки. Усі кабелі необхідно розташовувати у відповідних кабельних каналах, захищаючи їх від механічних ушкоджень та дії вологи. Під час налаштування ПЛК монтажники повинні забезпечити, щоб приводи, вентиляційні заслінки, нагрівачі та інші виконавчі елементи були у безпечному положенні і не могли увімкнутися неочікувано. Тестові запуски механізмів виконуються при мінімальній швидкості та у присутності відповідальних осіб.

Під час монтажу стелажів, лотків, блоків вирощування та інших конструкцій можливі ударні, стискальні та падальні травми. Вага металевих конструкцій часто значна, тому роботи проводяться бригадою з використанням механізованих підйомників, домкратів чи візків. Забороняється переміщення великогабаритних конструкцій вручну через небезпеку травм. Усі підйомні операції повинні виконуватися відповідно до вимог з вантажопідймальних робіт, а працівники мають бути ознайомлені з правилами сигналів і команд. Налагоджувальні роботи передбачають проведення перевірок роботи вентиляції, зволоження, нагріву та освітлення у реальних умовах теплиці. Перед подачею води у систему туманоутворення необхідно перевірити герметичність трубопроводів і форсунок. При першому запуску туманогенераторів доступ у теплицю обмежується, щоб виключити потрапляння високодисперсного

аерозолі до дихальних шляхів персоналу. Під час налаштування вентиляційних систем працівники не повинні перебувати у зоні повітряних потоків, які здатні підняти пил, частинки субстрату або конструктивні елементи.

Додаткову небезпеку становлять роботи із тепличним покриттям — полікарбонатом, склом чи плівкою. Зрізання, свердління або монтаж листових матеріалів вимагає захисту очей і рук, оскільки уламки чи гострі кромки можуть спричинити порізи та травми. Скляні панелі перевозяться у спеціальних контейнерах і встановлюються під наглядом старшого монтажника.

Важливою частиною охорони праці при монтажно-налагоджувальних роботах є організація безпечних умов праці у тепличному корпусі з урахуванням можливої підвищеної температури або вологості, особливо якщо частина інженерних систем працює у тестовому режимі. Працівники повинні мати доступ до питної води, місць відпочинку та можливості перервати роботу у випадку ознак перегріву чи погіршення самопочуття.

Наприкінці монтажу і під час налагодження обладнання проводиться серія випробувань, що можуть включати нагрів, запуск насосів, перевірку автоматики, тестування аварійних режимів. Персонал повинен виконувати ці роботи у безпечній зоні, не торкатися рухомих або нагрітих елементів і не перебувати у місцях можливого розбризкування чи викиду теплоносія. Після завершення всіх монтажних етапів теплиця очищається, а робочі місця приводяться у стан, придатний для подальшої експлуатації.

Таким чином, охорона праці під час монтажно-налагоджувальних робіт у теплиці зі складними інженерними системами передбачає комплекс заходів: організаційних, технічних, санітарних та індивідуальних. Їх дотримання є основою запобігання травматизму та гарантує безпечне введення теплиці в експлуатацію.

#### **4.4 Безпека у надзвичайних ситуаціях.**

Функціонування промислової теплиці в умовах надзвичайного періоду, зокрема під час дії воєнного стану, набуває принципово нового характеру,

оскільки виробничий процес має бути організований таким чином, щоб забезпечити максимальний рівень безпеки персоналу, збереження матеріальних цінностей та підтримання життєздатності технологічної інфраструктури у ситуаціях, пов'язаних з ракетними ударами, артилерійськими обстрілами, перебоями електропостачання, порушенням логістичних маршрутів та загрозами техногенного характеру. На відміну від звичайного режиму роботи, де охорона праці орієнтована переважно на виробничі фактори, у період воєнних дій та підвищеного ризику надзвичайних ситуацій обов'язковим є врахування зовнішніх загроз, які можуть виникнути раптово та вимагати негайної реакції.

У таких умовах першочерговим завданням підприємства є створення системи колективної та індивідуальної безпеки працівників. Усі працівники теплиці повинні бути ознайомлені з діями при повітряній тривозі, правилами укриття, шляхами евакуації, розташуванням найближчих захисних споруд та алгоритмами зупинки технологічного процесу. Приміщення теплиці, незважаючи на те, що вона здебільшого не є капітальною спорудою, повинна мати визначені безпечні маршрути для виходу у разі загрози. Персонал повинен знати, які саме ділянки можуть становити небезпеку під час вибухової хвилі, які конструкції можуть бути пошкоджені та які елементи обладнання можуть стати вторинними вражаючими чинниками.

Системи життєзабезпечення теплиці, включаючи електропостачання, водопостачання, вентиляцію та автоматику, повинні бути оснащені засобами резервування. Воєнні події часто супроводжуються знеструмленням, пошкодженням трансформаторних підстанцій та перебоями у роботі електромереж, тому теплиця повинна мати резервні джерела живлення — дизельні або бензинові генератори, інверторні системи з акумуляторами, резервні лінії живлення для ПЛК та систем моніторингу. Персонал повинен пройти спеціальні інструктажі щодо безпечного використання генераторів, правил зберігання пального та дій у разі задимлення або несправності двигуна.

Особливу увагу необхідно приділити протипожежній безпеці. Пошкодження ліній електропередач, удари поблизу теплиці, коливання напруги

та можливі короткі замикання можуть призвести до займання електрообладнання або елементів інфраструктури. Усі електроштити повинні бути обладнані автоматичними вимикачами, а у приміщенні теплиці необхідно мати відповідну кількість сертифікованих вогнегасників. Працівники мають бути навчені правилам гасіння електричних пожеж та знати порядок дій при задимленні приміщення, а також місцезнаходження аварійних виходів [5].

У період воєнного стану існує й ризик потрапляння уламків або вибухової хвилі у тепличний комплекс. Хоча теплиця не має товстих бетонних стін, її конструкція повинна бути перевірена на стійкість до вібрацій, ударних навантажень та паразитних коливань. Особливо це стосується обладнання, яке кріпиться на каркас теплиці — вентиляторів, труб, освітлювальних систем, кабельних трас, стелажних конструкцій. Монтажні елементи повинні бути укріплені таким чином, щоб у разі пошкодження конструкції не допустити падіння обладнання на персонал або субстрат. Усі кабельні та трубопровідні магістралі повинні мати додаткові механічні фіксатори, що запобігають їх обриву.

Системи вентиляції, водопостачання та автоматики у надзвичайний період можуть працювати в обмеженому режимі. Тому персонал повинен знати, як переводити теплицю у режим енергозбереження, які процеси можна припинити, а які критично важливі для збереження продукції. Такі режими включають мінімальну вентиляцію для запобігання застою повітря, підтримання мінімального рівня вологості, періодичне освітлення та ручне керування системами у разі виходу ПЛК з ладу.

У воєнний час важливим фактором є психологічний стан працівників. Постійні сигнали тривоги, необхідність швидкої евакуації та стресові умови можуть впливати на концентрацію уваги, що підвищує ризики травматизму. Працівники повинні проходити інструктажі з безпечної поведінки в умовах стресу, а керівництво — забезпечувати чергування та зміну графіків, щоб уникнути перевтоми. Робота у теплиці повинна припинятися при оголошенні повітряної тривоги, а персонал — прямувати до укриття у найкоротший час.

Транспортні маршрути, що забезпечують доставку субстрату, обладнання, сировини або міцелію, під час воєнного стану також можуть бути пошкоджені чи небезпечні. Тому підприємство повинно мати альтернативні шляхи та резервні запаси сировини, щоб уникнути зупинки виробництва через перебої з логістикою. Під час приймання вантажів персонал повинен дотримуватися вимог безпеки, оскільки транспорт може перебувати під ризиком ураження або пошкодження.

Особливу увагу необхідно приділити захисту здоров'я персоналу від небезпечних чинників, пов'язаних з можливими аваріями техногенного характеру, такими як пошкодження трубопроводів, витоки води або поживних розчинів, перегорання електричних приладів, вихід з ладу вентиляційних систем. У надзвичайний період навіть невелика аварія може призвести до значних наслідків, тому персонал повинен мати чіткий алгоритм дій — від первинної локалізації ушкодження до негайного повідомлення керівництва та відповідних служб.

Таким чином, охорона праці та техніка безпеки у період воєнного стану є комплексною системою, що включає організаційні, технічні, інженерні та психологічні заходи. Головним пріоритетом є безпека персоналу та збереження інфраструктури теплиці. Усі працівники повинні бути навчені, забезпечені засобами захисту, мати доступ до укриття, знати алгоритми дій при надзвичайних ситуаціях та працювати відповідно до оновлених регламентів, адаптованих до умов воєнного часу. Лише за таких умов можливе стабільне функціонування виробництва у період підвищених зовнішніх загроз.

#### **4.5 Висновки до розділу 4.**

У результаті аналізу умов праці у промисловому грибному виробництві встановлено, що основними небезпечними та шкідливими чинниками є підвищена вологість повітря, замкнений характер приміщень, наявність електрообладнання у вологому середовищі, можливе накопичення вуглекислого газу та біологічні фактори. Забезпечення безпечних умов праці у грибниці

вимагає комплексного підходу, який включає організацію ефективної вентиляції, дотримання вимог електробезпеки, використання індивідуальних засобів захисту та регламентне обслуговування технологічного обладнання.

Впровадження автоматизованих систем керування мікрокліматом дозволяє зменшити безпосередній контакт персоналу з небезпечними зонами, підвищити стабільність виробничого процесу та знизити ризик травматизму. Дотримання санітарно-гігієнічних вимог, організація безпечних проходів і використання протиковзких покриттів є необхідними умовами для збереження здоров'я працівників та забезпечення безперервної роботи грибного виробництва.

Аналіз умов праці при роботі з міцелієм показав, що даний етап виробничого процесу потребує підвищених вимог до санітарії, стерильності та захисту персоналу від біологічних факторів. Основними ризиками є вплив аерозольних частинок, можливість алергічних реакцій, мікробіологічне забруднення та небезпеки, пов'язані з використанням інокуляційного та змішувального обладнання.

Застосування засобів індивідуального захисту, локальних систем вентиляції та регламентованих процедур дезінфекції забезпечує зниження виробничих ризиків і стабільність технологічного процесу. Організація контрольованих зон, дотримання температурного режиму та правил поводження з біологічними матеріалами є необхідними умовами безпечної роботи з міцелієм. Дотримання вимог охорони праці на цьому етапі сприяє не лише захисту персоналу, а й підвищенню якості та чистоти виробництва.

Проведений аналіз монтажних-налагоджувальних робіт у теплиці показав, що цей етап характеризується підвищеною небезпекою через виконання робіт з електрообладнанням, вентиляційними та трубопровідними системами, металоконструкціями, а також можливістю роботи на висоті та у замкнених просторах. Забезпечення безпечних умов праці вимагає чіткої організації робочих зон, використання справного інструменту, дотримання вимог електробезпеки та застосування страхувальних і захисних засобів.

Виконання монтажних-налагоджувальних робіт відповідно до нормативних вимог, проведення інструктажів і використання засобів колективного та індивідуального захисту дозволяє мінімізувати ризики травматизму та аварійних ситуацій. Важливу роль відіграє поетапне введення обладнання в експлуатацію та перевірка систем у безпечних режимах, що забезпечує надійність роботи теплиці та безпеку персоналу у подальшій експлуатації.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У ході виконання роботи було розроблено комплексну автоматизовану систему керування промисловою теплицею для вирощування грибів, яка забезпечує високоточне підтримання мікрокліматичних параметрів та створення оптимальних умов для культивування різних видів грибів. Проведений аналіз існуючих технологічних рішень, а також детальне вивчення біологічних особливостей шампіньйонів, глив і лисичок дозволили сформуванню науково обґрунтований підхід до організації багатозонального тепличного середовища з диференційованими режимами його роботи.

Виробничий простір теплиці було поділено на кілька функціональних секцій, у кожній з яких реалізовано індивідуальний мікроклімат, адаптований до специфічних вимог окремого виду грибів. Система автоматизації, побудована на базі сучасних датчиків, виконавчих механізмів і програмованих логічних контролерів, забезпечує безперервний моніторинг температури, вологості, концентрації CO<sub>2</sub>, характеристик субстрату та рівня освітлення. Такий підхід дозволив створити саморегульований технологічний комплекс, здатний підтримувати стабільні умови вирощування без участі оператора, а також адаптуватися до коливань зовнішніх факторів.

Особливу увагу в проєкті приділено експериментальній секції, призначеній для культивування лисичок — виду грибів, для якого характерні специфічні та складні природні умови. Розроблена модель керування світлом, вологістю, газообміном і структурою субстрату дозволила максимально точно відтворити лісове середовище в межах теплиці. Це створює передумови для подальших експериментальних досліджень та розширення асортименту грибної продукції у промислових масштабах.

Запровадження систем автоматичного керування значно підвищує ефективність виробництва, дозволяє зменшити витрати ресурсів, підвищити якість продукції та мінімізувати вплив людського фактора. Робота також охоплює питання охорони праці та техніки безпеки як у звичайних умовах, так і

в період дії воєнного стану. Розроблені рекомендації забезпечують захист персоналу, стійкість технологічної інфраструктури та безперервність виробничих процесів у надзвичайних умовах.

Таким чином, виконаний дипломний проєкт демонструє ефективність комплексної інтеграції біологічних принципів вирощування грибів із сучасними технологіями автоматизації. Отримані результати підтверджують можливість створення високопродуктивного, енергоощадного й адаптивного тепличного комплексу, здатного забезпечити стабільне виробництво та підтримання високої якості грибної продукції. Проєкт має значний науково-практичний потенціал і може бути основою для розвитку нових технологічних рішень у галузі промислового грибівництва та автоматизованого аграрного виробництва.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. «Управління мікрокліматом у тепличних комплексах» : навч. посіб. НУБіПУ України, 2021. URL: [https://dglib.nubip.edu.ua/bitstream/123456789/7678/1/Upravlinnia\\_mikroklimatom\\_teplits.pdf](https://dglib.nubip.edu.ua/bitstream/123456789/7678/1/Upravlinnia_mikroklimatom_teplits.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
2. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень (ДСН 3.3.6.042-99). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/va042282-99> (дата звернення: 25.11.2025).
3. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» : картка документа. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0148858-13> (дата звернення: 25.11.2025).
4. ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» : картка документа. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0012858-18> (дата звернення: 25.11.2025).
5. Автоматизація мікроклімату у теплицях : курсова робота (PDF). Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. URL: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/22711/1/Automat\\_mikroklimat.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/22711/1/Automat_mikroklimat.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
6. Методичні вказівки «Проектування вентиляції промислових теплиць». Харківський національний аграрний університет. URL: [https://eprints.kname.edu.ua/41277/1/Metod\\_Vent\\_Teplits.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/41277/1/Metod_Vent_Teplits.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
7. Моніторинг параметрів мікроклімату у тепличних комплексах : магістерська дисертація. НУ «Львівська політехніка». URL: [https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/49287/1/Magistr\\_teplyts\\_monitor.pdf](https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/49287/1/Magistr_teplyts_monitor.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
8. Автоматизована система контролю CO<sub>2</sub> та вологості : дипломна робота (PDF). КНУБА. URL: [https://library.knuba.edu.ua/bitstream/987654321/13459/1/CO2\\_vyhlyad.pdf](https://library.knuba.edu.ua/bitstream/987654321/13459/1/CO2_vyhlyad.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

9. «Вентиляція та кондиціонування у сільському господарстві» : навч. посібник. НУБіПУ України. URL: [https://dglip.nubip.edu.ua/bitstream/123456789/6443/1/Vent\\_kond\\_agro.pdf](https://dglip.nubip.edu.ua/bitstream/123456789/6443/1/Vent_kond_agro.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
10. Тепличні комплексні системи управління мікрокліматом : зб. наук. праць. Вінницький національний технічний університет. URL: [https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4753/1/Teplits\\_syst\\_ukr.pdf](https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4753/1/Teplits_syst_ukr.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
11. Автоматизація світлового режиму у теплицях : курсова робота. Чернігівський національний технологічний університет. URL: [https://dspace.cntu.edu.ua/bitstream/123456789/2035/1/Avtom\\_svitle\\_trud.pdf](https://dspace.cntu.edu.ua/bitstream/123456789/2035/1/Avtom_svitle_trud.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
12. Освітлення рослин у контрольованому середовищі : магістерська робота. ТОР (Тернопільська ОДА). URL: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/27123/1/Osvitl\\_roslyn.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/27123/1/Osvitl_roslyn.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
13. Проектування LED-освітлення виробничих та тепличних приміщень: метод. рекомендація. URL: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/19342/1/LED\\_teplyts\\_metod.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/19342/1/LED_teplyts_metod.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
14. Енергозбереження у системах вентиляції та освітлення теплиць : наукова стаття. Журнал «Екологічний вісник». URL: [https://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/ecol\\_v\\_p2023\\_3\\_7.pdf](https://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/ecol_v_p2023_3_7.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
15. Вплив мікроклімату на продуктивність грибних культур : стаття. Журнал «Агронаука». URL: [https://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/agron\\_2024\\_5\\_9.pdf](https://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/agron_2024_5_9.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
16. Системи автоматичного керування мікрокліматом теплиць : дипломна робота. Національний університет біоресурсів і природокористування України. URL: [https://dglip.nubip.edu.ua/bitstream/123456789/8215/1/ASK\\_mikroklimat\\_teplyts.pdf](https://dglip.nubip.edu.ua/bitstream/123456789/8215/1/ASK_mikroklimat_teplyts.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

17. Дослідження режимів вентиляції у грибних теплицях. Наукові праці ХНАУ. URL: [https://eprints.kname.edu.ua/48611/1/Vent\\_grib\\_teplyts.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/48611/1/Vent_grib_teplyts.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

18. Контроль температури та вологості у спорудах захищеного ґрунту. Вісник НУБіПУ України. URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Tech/article/view/14567/13498> (дата звернення: 25.11.2025).

19. Автоматизована система керування мікрокліматом грибної ферми. КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/51234/1/ASK\\_gribna\\_ferma.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/51234/1/ASK_gribna_ferma.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

20. Мікроклімат виробничих приміщень агропромислового комплексу. Навчальний посібник. URL: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/19877/1/Mikroklimat\\_APK.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/19877/1/Mikroklimat_APK.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

21. Дослідження концентрації CO<sub>2</sub> у теплицях з контрольованим середовищем. Вісник аграрної науки. URL: [https://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/van\\_2022\\_7\\_11.pdf](https://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/van_2022_7_11.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

22. Автоматизація контролю газового середовища у тепличних комплексах. Одеська національна академія харчових технологій. URL: [https://dspace.onu.edu.ua/bitstream/123456789/32118/1/CO2\\_teplyts.pdf](https://dspace.onu.edu.ua/bitstream/123456789/32118/1/CO2_teplyts.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

23. Вплив освітлення на розвиток грибних культур. Журнал «Мікологія і фітопатологія». URL: [https://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/mfp\\_2021\\_4\\_6.pdf](https://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/mfp_2021_4_6.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

24. Системи світлодіодного освітлення для теплиць. Львівський національний аграрний університет. URL: [https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/56421/1/LED\\_teplytsi.pdf](https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/56421/1/LED_teplytsi.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

25. Регулювання спектрального складу світла в агротехнологіях. Вісник ХНТУСГ. URL: [https://khntusg.com.ua/bitstream/123456789/2847/1/Spektr\\_LED\\_agro.pdf](https://khntusg.com.ua/bitstream/123456789/2847/1/Spektr_LED_agro.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
26. Проектування енергоефективних тепличних систем. Навчальний посібник. URL: [https://dspace.nau.edu.ua/bitstream/NAU/48192/1/Energy\\_teplyts.pdf](https://dspace.nau.edu.ua/bitstream/NAU/48192/1/Energy_teplyts.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
27. Автоматизація вентиляційних систем теплиць. Черкаський державний технологічний університет. URL: [https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/123456789/6123/1/Vent\\_auto\\_teplyts.pdf](https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/123456789/6123/1/Vent_auto_teplyts.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
28. Моделювання процесів тепло- та вологообміну в теплицях. Вісник ВНТУ. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/3325/3114> (дата звернення: 25.11.2025).
29. Інтелектуальні системи керування мікрокліматом теплиць. Сумський державний університет. URL: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/90231/1/Smart\\_teplyts.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/90231/1/Smart_teplyts.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
30. Енергоефективні технології освітлення у сільському господарстві. Наукові записки ТНТУ. URL: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/21456/1/Energy\\_LED\\_agro.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/21456/1/Energy_LED_agro.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
31. Автоматизовані системи керування мікрокліматом аграрних споруд: навч. посіб. URL: [https://dglip.nubip.edu.ua/bitstream/123456789/9156/1/ASK\\_agro.pdf](https://dglip.nubip.edu.ua/bitstream/123456789/9156/1/ASK_agro.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
32. Проектування систем вентиляції тепличних господарств. URL: [https://eprints.kname.edu.ua/39841/1/Vent\\_teplyts\\_project.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/39841/1/Vent_teplyts_project.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).
33. Світлотехнічні параметри світлодіодних систем у теплицях. URL: [https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/58341/1/LED\\_light\\_agro.pdf](https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/58341/1/LED_light_agro.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

34. Контроль вологості та температури у грибних камерах вирощування. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48762/1/Mushroom\\_climate.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48762/1/Mushroom_climate.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

35. Методи регулювання CO<sub>2</sub> у приміщеннях аграрного призначення. URL: [https://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/apk\\_2021\\_6\\_8.pdf](https://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/apk_2021_6_8.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

36. Інтелектуальні системи керування теплицями : дисертація. URL: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/86420/1/Smart\\_greenhouse\\_UA.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/86420/1/Smart_greenhouse_UA.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

37. Вплив світлового спектра на розвиток грибів. URL: [https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/biotech\\_2022\\_3\\_5.pdf](https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/biotech_2022_3_5.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

38. Автоматизація аграрних виробництв : підручник. URL: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/17342/1/Avtom\\_agro\\_pidr.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/17342/1/Avtom_agro_pidr.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

39. Світлодіодні технології в рослинництві та грибівництві. URL: [https://dspace.nau.edu.ua/bitstream/NAU/45231/1/LED\\_agro\\_fungi.pdf](https://dspace.nau.edu.ua/bitstream/NAU/45231/1/LED_agro_fungi.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

40. Енергоефективні системи освітлення тепличних комплексів. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/3478/3265> (дата звернення: 25.11.2025).

41. Автоматизований контроль параметрів повітря у теплицях. URL: [https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/123456789/6891/1/Air\\_control\\_teplyts.pdf](https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/123456789/6891/1/Air_control_teplyts.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

42. Моделювання мікроклімату у спорудах захищеного ґрунту. URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Tech/article/view/15244/14120> (дата звернення: 25.11.2025).

43. Системи управління освітленням на базі LED-матриць.  
URL:[https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/28411/1/LED\\_matrix\\_control.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/28411/1/LED_matrix_control.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

44. Комп'ютерно-інтегровані системи агровиробництва.  
URL:[https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/5121/1/CIM\\_agro.pdf](https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/5121/1/CIM_agro.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

45. Світловий режим у біотехнологічних процесах.URL: [https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/biotech\\_2020\\_4\\_9.pdf](https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/biotech_2020_4_9.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

46. Проєктування систем автоматизації тепличних господарств.  
URL:[https://dspace.onu.edu.ua/bitstream/123456789/35671/1/ASK\\_teplyts\\_design.pdf](https://dspace.onu.edu.ua/bitstream/123456789/35671/1/ASK_teplyts_design.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

47. Автоматичне регулювання температури у виробничих приміщеннях.URL:[https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/60192/1/Temp\\_control\\_indoor.pdf](https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/60192/1/Temp_control_indoor.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

48. Методичні рекомендації з вирощування грибів у контрольованому середовищі.URL:[https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u284/griby\\_kontrol\\_seredov\\_yshche.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u284/griby_kontrol_seredov_yshche.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

49. Системи автоматизації у грибівництві.  
URL:[https://dglib.nubip.edu.ua/bitstream/123456789/7021/1/Avtom\\_gribivnytstvo.pdf](https://dglib.nubip.edu.ua/bitstream/123456789/7021/1/Avtom_gribivnytstvo.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).

50. Комплексна автоматизація тепличних та грибних комплексів.  
URL:[https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/31254/1/Complex\\_teplyts\\_griby.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/31254/1/Complex_teplyts_griby.pdf) (дата звернення: 25.11.2025).